

# MENDAKI GUNUNG KEMUSKILAN

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



**Karya Lain oleh Richard Dawkins**

*THE SELFISH GENE*

*THE EXTENDED PHENOTYPE*

PEMBUAT ARLOJI YANG BUTA (diterbitkan oleh CFI)

SUNGAI DARI EDEN (diterbitkan oleh CFI)

Gambar asli oleh Lalla Ward

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



# **MENDAKI GUNUNG KEMUSKILAN**

**Richard Dawkins**

Diterjemahkan oleh Wahyu Ginting

W.W. Norton & Company

New York London

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



Hak cipta © 1996 oleh Richard Dawkins

Hak cipta gambar asli © 1996 oleh Lalla Ward

Hak cipta dilindungi undang-undang

Edisi Amerika Pertama 1996

Pertama kali diterbitkan oleh Norton 1997

Dicetak di Amerika Serikat

Teks pada buku ini dikomposisi di Centaur. Komposisi oleh Justine Burkat Trubey menggunakan Adobe Pagemaker 6.0. Produksi oleh RR Donnelley Harrisonburg

Desain buku oleh Margaret M. Wagner

*Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*

Dawkins, Richard, 1941-

*Climbing mount improbable / Richard Dawkins ; original drawings by Lalla Ward.*

p. cm.

Termasuk daftar pusaka dan indeks.

ISBN 0-393-03930-7

1. Seleksi alam. 2. Genetika evolusi. 3. Morfogenesis. I. Judul

QH375.D376 1996

575.01'62 – dc20

96 – 19138

CIP

ISBN 978-0-393-35408-9 pbk.

W.W. Norton & Company, Inc.  
500 Fifth Avenue, New York, N.Y. 10110  
[www.wwnorton.com](http://www.wwnorton.com)

W.W.Norton & Company Ltd.  
15 Carlisle Street, London W1D 3BS

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



*Untuk Robert Winston,  
dokter dan insan yang baik*

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



# *Daftar Isi*

Ucapan Terima Kasih	<i>vii</i>
Ucapan Terima Kasih untuk Gambar	<i>ix</i>
1 Menghadap Gunung Rushmore	1
2 Belenggu Sehalus Sutra	50
3 Pesan dari Gunung	99
4 Lepas Landas	150
5 Empat Puluh Jalur Menuju Pencerahan	138
6 Museum Semesta Cangkang	273
7 Embrio Kaleidoskopis	307
8 Serbuk Sari dan Peluru Ajaib	349
9 Pengganda Robot	377
10 'Kebun Selingkung'	409
Daftar Pustaka	451



## Ucapan Terima Kasih

CIKAL BUKU INI adalah rangkaian Kuliah Natal Royal Institution saya, yang disiarkan oleh BBC dengan tajuk besar *Growing Up in the Universe*. Tajuk itu harus saya relakan karena, sejak saat itu, sedikitnya tiga buku lain sudah terbit dengan judul yang hampir sama persis. Lagi pula, buku saya ini telah berkembang dan berubah. Maka, tidak adil jika menamainya buku tentang rangkaian Kuliah Natal tersebut. Begitupun, saya berterima kasih kepada Direktur Royal Institution karena telah memberikan saya kehormatan untuk bergabung ke dalam silsilah historis Kuliah Natal, yang dicikal-bakali oleh Michael Faraday. Bryson Gore dari Royal Institution, bersama dengan William Woppard dan Richard Melman dari Inca Television, berperan besar dalam rangkaian kuliah tersebut, dan jejak pengaruh mereka masih akan ditemukan dalam buku yang telah banyak diubah dan diperlebar ini.

Michael Rodgers membaca dan mengkritik secara konstruktif naskah-naskah awal yang berisi lebih banyak bab dari yang dicetak di sini, dan dengan tegas menyarankan rekonstruksi seluruh buku ini. Fritz Vollrath dan Peter Fuchs menelaah Bab 2, sementara Michael Land dan Dan Nilsson melakukan hal serupa untuk Bab 5. Keempat orang ahli ini telah dengan murah hati mengagihkan ilmu mereka saat saya menimbanya. Mark Ridley, Matt Ridley, Charles Simonyi, dan Lalla Ward Dawkins membaca naskah akhir seluruh buku ini dan memberikan kritik berguna serta semangat peneguh hati sebagaimana perlunya. Mary Cunnane dari W. W. Norton dan

Ravi Mirchandani dari Viking Penguin telah dengan murah dan besar hati memahami dan memaklumi saat buku ini berkembang, melebar liar, dan akhirnya mengerucut kembali ke lingkup yang lebih bisa ditangani. John Brockman mengawasi di belakang dengan dorongan yang membesarkan hati, tak pernah mengganggu, tapi selalu siap membantu. Para ahli komputer adalah pahlawan, yang jarang dielu-elukan. Di buku ini, saya menggunakan program dari Peter Fuchs, Thiemo Krink, dan Sam Zschokke. Ted Kaehler berkolaborasi dengan saya dalam menggagas dan menuliskan program sulit *Arthromorphs*. Di paket program ‘watchmaker’ saya sendiri, saya kerap terbantu oleh saran dan pertolongan dari Alan Grafen dan Alun ap Rhisiart. Staf Koleksi Zoologi dan Entomologi dari University Museum at Oxford telah meminjamkan spesimen dan menyumbangkan saran ahli mereka. Josine Meijer adalah peneliti gambar yang giat dan panjang akal. Istri saya, Lalla Ward Dawkins, membuat gambar-gambar di buku ini (mengecualikan tata letaknya) dan cintanya terhadap Penciptaan Darwinian terpancar dari tiap-tiap gambarnya.

Saya aturkan terima kasih kepada Charles Simonyi, tidak hanya karena telah bermurah hati memberikan posisi *Public Understanding of Science* yang kini saya jabat di Oxford, tapi juga karena telah mengutarakan visinya—yang sewarna dengan visi saya—tentang seni menjelaskan sains kepada khalayak umum: Jangan tinggi hati. Coba ilhami semua orang dengan indahnya kebenaran ilmu pengetahuan dan buat penjelasanmu semudah yang diizinkan kejujuran. Begitupun, yang sulit jangan kau abaikan. Lebih giatlah kau menjelaskan kepada para pembaca yang siap untuk lebih giat memahami.

## Ucapan Terima Kasih untuk Gambar

Gambar oleh Lalla Ward: 1.7, 1.9, 1.10, 1.13, 1.14, 2.9, 3.1, 3.3, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.1, 5.15, 6.3, 6.4, 6.10, 6.13, 6.15, 7.3, 7.8, 7.15a, 7.16, 8.2, 8.3, 8.6; 1.2 (bersumber pada Hölldobler dan Wilson); 1.3 (bersumber pada Wilson); 1.11 (bersumber pada Eberhard); 2.6 (bersumber pada Bristowe); 5.30 (bersumber pada M. F. Land); 7.10 (bersumber pada Brusca dan Brusca); 7.11 (bersumber pada Collins Guide to Insects); 7.17 (bersumber pada Brusca dan Brusca); 10.6 (bersumber pada Heijn dari Ulenberg).

Gambar buatan komputer (CGI) dari penulis: 1.14, 1.15, 1.16, 5.3\*, 5.5\*, 5.6\*, 5.7\*, 5.9\*, 5.10\*, 5.11\*, 5.12, 5.20\*, 5.28, 6.2\*, 6.3\*, 6.5, 6.6, 6.8, 6.11, 6.12, 6.14, 7.1, 7.9, 7.12, 7.13, 7.14 (gambar dengan tanda bintang direka ulang oleh Nigel Andrews); oleh Jeremy Hopes 5.13.

Heather Angel: 1.5, 1.11b, 5.21, 8.1. Ardea: 1.8 (Hans D. Dossenbach), 1.11a (Tony Beamish), 6.7 (P. Morris), 9.3e (Bob Gibbons). Euan N. K. Clarkson: 5.28. Bruce Coleman: 10.3a (Gerald Cubitt). W. D. Hamilton: 10.1, 10.2, 10.4, 10.5, 10.7. Ole Munk: 5.31. NHPA: 6.1 (James Carmichael Jr). Chris O'Toole: 1.6a dan b. Oxford Scientific Films: 1.4 (Rudie Kuiter), 2.1 (Densey Clyne), 5.19 (Michael Leach), 5.19b (J. A. L. Cooke), 10.2b (K. Jell), 10.3b (David Cayless). Portech Mobile Robotics Laboratory, Portsmouth: 9.2. Prema Photos: 8.5 (K. G. PrestonMafham). David M. Raup: 6.9. Science Photo Library: 9.3a (A. B. Dowsett), 9.3b (John Bavosi), 9.3c (Manfred Kage), 9.3d (David Patterson), 9.6 (J. C. Revy). Dr Fritz Vollrath: 2.2, 2.3, 2.4, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13. Zefa: 9.1.

1.1 dari Michell, J. (1978) *Simulacra*. London: Thames and Hudson.

2.5 dari Hansell (1984).

2.7 dan 2.8 dari Robinson (1991).

2.14 dan 2.15 dari Terzopoulos *et al.* (1995) © 1995 oleh Massachusetts Institute of Technology.

## UCAPAN TERIMA KASIH UNTUK GAMBAR

- 3.2 atas izin dari Hamilton Spectator, Kanada.
- 4.1 atas izin dari J. T. Bonner 1965, © Princeton University Press.
- 5.2 dari Dawkins (1986) (gambar oleh Bridget Peace).
- 5.4a, b dan d, 5.8a-e, 5.24a dan b dari Land (1980) (direka ulang oleh Hesse, 1899).
- 5.4c dari Salvini-Plawen dan Mayr (1977) (bersumber pada Hesse, 1899).
- 5.16a dan b Hesse dari Untersuchungen, ber die organe der Lichtempfindung bei niederen thieren, Zeitschrift für Wissenschaftliche Zoologie, 1899.
- 5.17, 5.19d dan e, 5.25, 5.26 atas izin dari M. F. Land.
- 5.18a dan f, 5.27, 5.30 gambar oleh Nigel Andrews. 5.22 gambar oleh Kuno Kirschfeld, direproduksi atas izin dari Naturwissenschaftliche Rundschau, Stuttgart.
- 5.23 atas izin dari Dan E. Nilsson dari Stavenga dan Hardie (ed.) (1989).
- 5.29a-e atas izin dari Walter J. Gehring et al., dari Georg Halder *et al.* (1995).
- 6.16 dari Meinhardt (1995).
- 7.2, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 dari Ernst Haeckel (1904) *Kunstformen der Natur*. Leipzig and Vienna: Verlag des Bibliographischen Instituts.
- 7.15b dari Raff and Kaufman (1983) (bersumber pada Y. Tanaka, 'Genetics of the Silkworm', dimuat di *Advances in Genetics* 5: 239–317, 1953).
- 8.4 dari Wilson (1971) (dari Wheeler, 1910, bersumber pada F. Dahl).
- 9.4 Jean Dawkins.
- 9.5 © K. Eric Drexler, Chris Peterson dan Gayle Pergamit. Hak cipta dilindungi undang-undang. Dicetak ulang atas izin dari Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution. William Morrow, 1991.

## BAB 1

### MENGHADAP GUNUNG RUSHMORE

SAYA BARU SELESAI MENYIMAK SEBUAH CERAMAH YANG pokok bahasannya adalah buah ara. Bukan ceramah ilmu tumbuh-tumbuhan, tapi ceramah kesusastraan. Kami diceramahi tentang ara dalam sastra, ara sebagai metafora, perubahan persepsi tentang ara, ara sebagai lambang yoni dan daun ara sebagai penutup sekadarnya, 'ara' sebagai hinaan, konstruksi sosial ara, prasaran D. H. Lawrence tentang cara makan buah ara di masyarakat, 'membaca ara', dan – hemat saya – 'ara sebagai teks'. Hasil renungan akhir pembicaranya adalah sebagai berikut. Dia mengarahkan perhatian kami pada kisah Kejadian tentang Hawa yang menggoda Adam untuk memakan buah dari pohon pengetahuan. Dia mengingatkan, Kitab Kejadian tidak menyebut secara khusus buah yang dimaksud. Umum menganggapnya buah apel. Namun, dia curiga bahwa itu sebetulnya buah ara, dan dengan kalimat pendek yang menohok ini dia mengakhiri pidatonya.

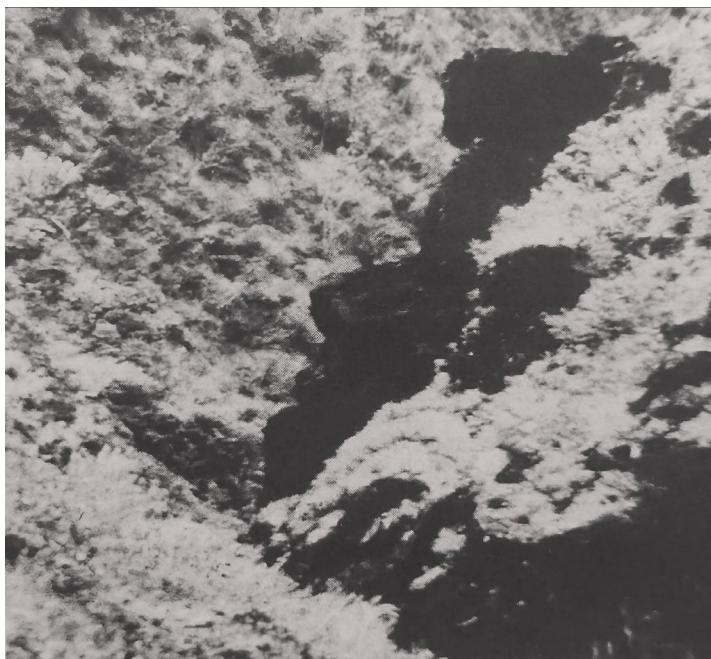
Yang begitu itu biasa jadi bahan pikiran kalangan sastra tertentu, tapi gagasan seperti itu justru memancing saya untuk berpikir literal. Si pembicara barang tentu tahu bahwa Taman Eden dan pohon pengetahuan yang baik dan yang jahat tidak pernah ada. Jadi apa yang sesungguhnya dia coba utarakan? Mungkin samar-samar dia merasa bahwa 'tampaknya', 'agaknya', 'kelihatannya', 'barangkali', 'kalau boleh saya istilahkan', boleh jadi 'benar' bahwa buah dalam

kisah tersebut ‘mestinya’ adalah buah ara. Tapi cukup sudah. Bukan berarti kita harus serba harfiah dan tak boleh berkias kira, tapi penceramah kita yang jatmika ini melewatkannya begitu banyak hal. Ada paradoks tulen dan puisi sejati yang tersembunyi di dalam buah ara, dengan kepelikan yang merangsang rasa ingin tahu dan pesona yang menggugah cita rasa seni. Di buku ini, saya ingin memosisikan diri untuk bisa menuturkan cerita asli ara. Tapi cerita ara hanyalah satu dari jutaan cerita lain dengan gramatika dan logika Darwinian—walau cerita ini merupakan satu di antara cerita-cerita yang ruwetnya paling memuaskan dalam evolusi. Menggunakan metafora utama buku ini, di pucuk salah satu puncak tertinggi Gunung Kemusikan, tinggallah sebatang pohon ara. Tapi puncak-puncak setinggi yang ditempati pohon ara seyogianya ditaklukkan pada akhir ekspedisi. Sebelum itu, ada banyak yang perlu dikatakan, segenap visi kehidupan yang perlu dibentuk dan dijelaskan, teka-teki yang harus dipecahkan, dan paradoks yang harus dilucuti.

Seperti tadi saya katakan, pada intinya yang terdalam, cerita ara sama dengan cerita setiap makhluk hidup lainnya di planet ini. Walaupun berbeda di detail permukaannya, semua itu adalah variasi, dengan DNA dan 30 juta cara DNA memperbanyak diri sebagai temanya. Di rute kita nanti, kita akan melihat jaring laba-laba. Kita akan melihat kecerdasan yang dipakai untuk membuat dan memfungsikannya — kecerdasan yang melinglungkan, walau terjadi dalam ketidaksadaran. Kita akan merekonstruksi evolusi sayap dan belalai gajah, yang terjadi dengan pelan dan perlahan-lahan. Kita akan melihat bahwa mata, yang evolusinya kadang tampak luar biasa pelik, sebenarnya telah berevolusi paling

tidak empat puluh – dan bahkan mungkin enam puluh – kali secara independen di seluruh kerajaan hewan. Kita akan memprogram komputer untuk mempermudah imajinasi kita saat menyusuri museum raksasa berisi seluruh makhluk yang tak terbilang jumlahnya, yang pernah hidup dan sudah mati, dan bahkan sepupu imajiner mereka, yang tak pernah lahir, yang jumlahnya lebih tak terbilang lagi. Kita akan menelusuri jalur-jalur Gunung Kemuskilan, mengagumi jurang-jurangnya yang curam dari jauh, sambil selalu waspada mencari lereng-lereng landai di seberangnya. Makna dari amsal Gunung Kemuskilan, dan juga banyak hal lainnya, akan dibuat terang. Saya perlu mengawali dengan menjernihkan ihwal desain semu di alam, kaitannya dengan desain manusia sungguhan, dan hubungannya dengan kebetulan. Itulah tujuan Bab 1.

Museum Sejarah Alam di London memiliki koleksi unik berisi batu-batu yang kebetulan mirip dengan benda yang biasa kita lihat: sepatu lars, tangan, tengkorak bayi, bebek, ikan. Batu-batu ini dikirim oleh orang-orang yang sungguh curiga bahwa kemiripan tersebut ada maknanya. Tapi batu-batu biasa memang melapuk ke bermacam-macam bentuk sehingga tidak mengherankan jika, kadang-kadang, kita menemukan batu yang mengingatkan kita pada bentuk sepatu lars atau seekor bebek. Dari semua batu yang diperhatikan orang saat berkeliling, museum ini telah mengumpulkan batu-batu yang mereka pungut dan simpan sebagai barang koleksi. Ribuan batu tidak dikoleksi karena cuma batu. Kemiripan batu-batu koleksi museum ini dengan benda tertentu bersifat kebetulan dan tidak bermakna, walau bisa memancing tawa. Demikian pula kiranya saat kita merasa melihat bentuk wajah atau



Gambar 1.1 Kebetulan belaka. Garis wajah Presiden Kennedy di sebuah lereng di Hawaii.

hewan di awan atau garis tepi bukit karang. Kemiripannya kebetulan.

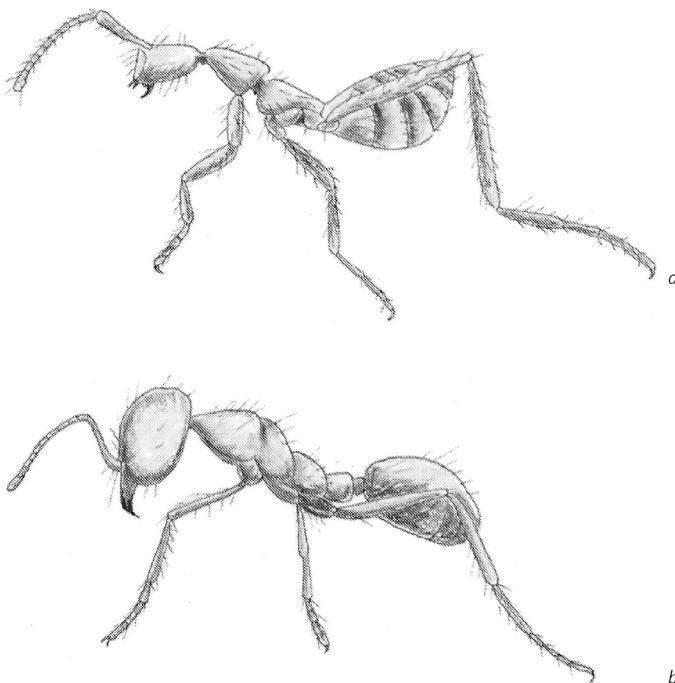
Lereng karang pada Gambar 1.1 konon mirip dengan wajah mendiang Presiden Kennedy. Begitu diberi tahu, Anda bisa melihat profilnya agak mirip dengan John atau Robert Kennedy. Tetapi ada yang tidak menyadari kemiripan itu dan tentu mudah untuk percaya bahwa kemiripannya semata-mata karena kebetulan. Di lain pihak, Anda tidak bisa menghasut pikiran orang yang waras bahwa Gunung Rushmore, di Dakota Selatan, kebetulan saja melapuk alami

hingga membentuk wajah Presiden Washington, Jefferson, Lincoln, dan Theodore Roosevelt. Kita langsung tahu bahwa wajah-wajah itu sengaja dipahat (atas arahan Gutzon Borglum). Keempat wajah itu tentu bukan kebetulan, melainkan murni merupakan hasil rancangan. Perbedaan antara Gunung Rushmore dan pelapukan alami yang menimbulkan kemiripan dengan John Kennedy (atau Gunung St Pierre di Mauritius atau keganjilan lain akibat pelapukan alami) adalah ini. Jumlah detail kemiripan wajah-wajah di Gunung Rushmore dengan wajah-wajah aslinya terlalu besar untuk terjadi secara kebetulan. Wajah-wajah itu dapat dikenali dengan jelas, dilihat dari berbagai sudut sekalipun. Di lain pihak, bayangan yang kebetulan mirip dengan Presiden Kennedy seperti tampak pada Gambar 1.1 teramat hanya jika tebing tersebut dilihat dari sudut tertentu dan dalam kondisi cahaya tertentu. Ya, batu karang dapat melapuk hingga menyerupai bentuk hidung bila dilihat dari titik ketinggian tertentu, dan mungkin beberapa batu karang lain kebetulan menyerupai bentuk bibir. Tidak sulit membayangkan kebetulan biasa seperti ini bisa terjadi, terlebih jika fotografernya bisa dengan leluasa memilih sudut bidiknya dan hanya satu sudut saja yang membuatkan kemiripan (ditambah satu fakta lainnya, yang akan saya ulas sebentar lagi: bahwa otak manusia tampak giat dan gandrung mencari-cari wajah). Tapi Gunung Rushmore perkara lain. Empat kepala di tebingnya jelas-jelas hasil rekayasa. Ada pemahat yang merancang, menggambar di atas kertas, mengukur dengan teliti setiap jengkal tebing, dan menyelia regu-regu pekerja yang menggunakan bor pneumatik dan dinamit untuk memahat keempat wajah yang masing-masing setinggi enam puluh kaki itu. Pelapukan alami mungkin bisa menghasilkan

efek yang sama dengan dinamit yang diledakkan dengan cerdik. Namun dari semua cara melapuknya gunung secara alami, hanya sekelumit saja yang hasilnya bisa mirip wajah empat manusia tertentu. Sekalipun kita tidak tahu riwayat Gunung Rushmore, bisa kita perkirakan tingkat kemusikilan empat kepala tersebut terpahat oleh pelapukan alam teramat sangat tinggi – seperti melempar koin empat puluh kali dan tiap kalinya muncul gambar kepala.

Saya rasa, pada prinsipnya – walau tak selalu pada praktiknya – perbedaan antara kebetulan dan rancangan sudah jelas. Namun, bab ini akan menunjukkan kategori benda ketiga yang jauh lebih susah dibedakan. Saya akan mengistilahkannya desainoid. Benda-benda desainoid adalah tubuh-tubuh hidup beserta produk-produknya. Benda-benda desainoid tampak didesain; begitu meyakinkannya sampai-sampai sebagian orang – atau malah kebanyakan orang – merasa benda-benda itu memang didesain. Mereka-mereka ini keliru. Tetapi mereka benar kalau meyakini bahwa benda-benda desainoid mustahil ada karena kebetulan. Benda-benda desainoid tidak bersifat kebetulan. Benda-benda ini justru terbentuk oleh proses yang luar biasa non-acak sehingga timbul ilusi desain yang nyaris sempurna.

Gambar 1.2 menampilkan patung hidup. Lazimnya, kumbang tidak tampak seperti semut. Maka, jika saya melihat kumbang yang terlihat hampir sama persis dengan semut – lebih lagi, kumbang yang mencari makan di dalam sarang semut – akal saya boleh curiga bahwa kemiripan tersebut ada artinya. Hewan yang di atas sebetulnya adalah kumbang – sepupu lebih dekatnya adalah kumbang biasa atau kumbang kebun – tapi perawakannya mirip semut, jalannya seperti semut, dan

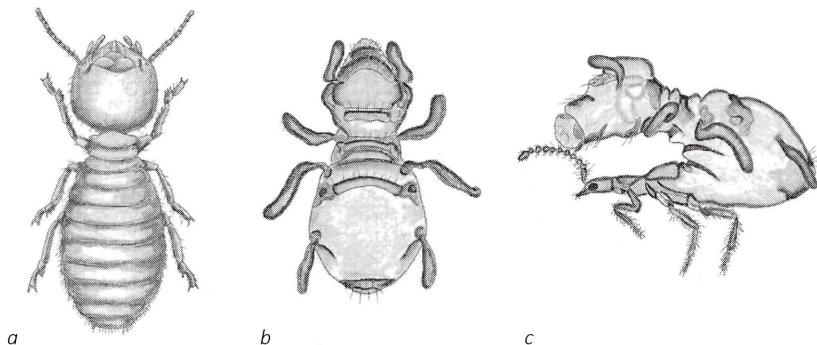


Gambar 1.2 Kemiripan yang tidak dirancang, tetapi bukan kebetulan. Kumbang yang meniru semut, *Labidus praedator* (a) dan semut, *Mimeciton antennatum* (b).

hidupnya di antara semut di dalam sarang semut. Hewan yang di bawah adalah semut sungguhan. Seperti patung yang mirip benda aslinya, kemiripan tersebut bukan kebetulan. Perlu ada penjelasan lain, selain kebetulan belaka. Penjelasan yang seperti apa? Karena semua kumbang yang tampak persis semut hidup di sarang semut, atau setidaknya bersinggungan dekat dengan semut, mungkinkah penyebabnya semacam zat kimiawi dari semut, atau semacam infeksi dari semut, yang tergosok ke badan kumbang dan mengubah tumbuh

kembangnya? Tidak, penjelasan yang sebenarnya – seleksi alam Darwinian – jauh berbeda, dan kita akan bahas itu nanti. Untuk saat ini, cukuplah kalau kita yakin bahwa kemiripan ini, dan contoh-contoh ‘mimikri’ lainnya, tidak terjadi secara kebetulan. Semua kemiripan itu terjadi karena rancangan atau karena proses yang membawa hasil yang sama impresifnya dengan hasil rancangan. Kita akan melihat beberapa contoh mimikri satwa lainnya dan, untuk sementara, belum menjelaskan bagaimana kemiripan-kemiripan tersebut bisa terjadi.

Contoh sebelumnya menunjukkan betapa piawainya kumbang itu jika dia memang ‘berniat meniru’ serangga dari jenis lain. Tapi coba lihat makhluk pada Gambar 1.3b. Dia tampak seperti rayap. Untuk perbandingan, lihat Gambar 1.3a, gambar rayap sungguhan. Spesimen di Gambar 1.3b seekor serangga, tetapi bukan rayap. Itu sebenarnya hewan kumbang. Saya akui saya pernah melihat peniru yang lebih baik di dunia serangga, seperti kumbang peniru semut yang saya contohkan tadi. ‘Kumbang’ di sini agak ganjil. Kaki-kakinya tampak kurang bersendi, seperti balon yang dipuntir-puntir. Karena, seperti serangga lainnya, kumbang punya kaki bersendi, mungkin Anda berpikir mestinya kumbang ini lebih pandai meniru kaki bersendi rayap. Kalau begitu, apa jawaban dari teka-teki ini? Mengapa si peniru ini tampak seperti balon hewan tiruan dan bukan serangga bersendi sungguhan? Jawabannya dapat dilihat di Gambar 1.3c, salah satu pemandangan paling menakjubkan di seluruh sejarah alam. Gambar menunjukkan tampak samping si kumbang peniru rayap. Yang kecil runcing itu kepala kumbangnya (bisa dilihat, matanya di dekat antena bersendi yang biasa). Kepalanya menempel pada batang tu-



Gambar 1.3 (a) Rayap sungguhan, *Amitermes hastatus*; (b) kumbang, *Coatonachthodes ovambolandicus*, yang meniru rayap; (c) cara triknya dilakukan.

buh atau dada ramping yang memuat tiga kaki bersendi kumbang asli, yang digunakan untuk berjalan. Trik tiru-tiru ini dilakukan dengan perutnya. Perutnya diangkat dan dilengkungkan sampai menggantung dan menutupi kepala, dada, dan kaki-kakinya seperti payung. Rupa ‘rayap’ direkayasa dari separuh belakang perut kumbang itu. ‘Kepala rayap’ adalah ujung belakang perut si kumbang. ‘Kaki-kaki’ dan ‘antena rayap’ dibentuk dari bonggol-bonggol perutnya yang bergelebar. Tak heran mutu mimikrinya tak setinggi standar sepupu peniru semut si kumbang ini dari gambar sebelumnya. Omong-omong, kumbang peniru rayap ini hidup di sarang rayap, mencari makan sebagai parasit dengan cara yang mirip dengan kumbang peniru semut pada Gambar 1.2. Walau tak begitu mirip, kalau ditimbang materi-materi awalnya, kumbang peniru rayap ini tampak mencapai prestasi pematung yang lebih mengesankan daripada kumbang peniru semut. Alasannya? Karena si peniru semut melakukannya de-



Gambar 1.4 Samaran yang sempurna. Naga laut berdaun betina, *Phycodurus eques*, dari Australia.

ngan mengubah rupa tiap bagian tubuhnya supaya tampak seperti tiap bagian tubuh terkait si semut. Sementara itu, si peniru rayap melakukannya dengan mengubah rupa bagian tubuhnya yang sama sekali berbeda, yaitu perut, supaya mirip dengan sekujur tubuh rayap.

Favorit saya di antara ‘patung-patung’ satwa adalah naga laut berdaun (Gambar 1.4). Hewan ini ikan, semacam kuda laut, yang tubuhnya dipahat membentuk rumput laut. ‘Dedaunan rindang’ pada tubuhnya itu adalah alat pelindung diri, karena hewan ini hidup di antara dan amat sulit dibedakan dari rumput laut. Bagaimanapun juga, mimikrinya terlalu apik

untuk dianggap kebetulan. Ia lebih dekat ke Gunung Rushmore dari pada tebing Kennedy. Keyakinan saya ini didasarkan pada jamaknya hal mengesankan yang dicapainya dengan menampilkan diri sebagai hal yang bukan dirinya; dan juga pada kenyataan bahwa tidak biasanya ikan memiliki proyeksi apa pun yang menyerupai bentuk tersebut. Dalam hal ini, prestasi naga laut berdaun sebanding dengan kumbang peniru rayap, bukan kumbang peniru semut.

Sejauh ini kita telah membahas benda-benda yang sama mengesankannya dengan patung realistik, benda-benda yang kita rasa bukan kebetulan saking miripnya dengan benda-benda yang lain. Naga laut berdaun dan kumbang peniru semut adalah patung-patung desainoid: Perawakannya sungguh-sungguh tampak seolah keduanya dirancang oleh seorang seniman untuk menyerupai hal lain. Namun, patung hanyalah salah satu jenis benda yang dirancang manusia. Artefak-artefak lain buatan manusia mengesankan kita bukan lewat kemiripannya dengan sesuatu, melainkan dengan kegunaannya untuk tujuan tertentu. Pesawat terbang berguna untuk penerbangan. Cawan berguna untuk menampung air. Pisau berguna untuk memotong.

Jika Anda menawarkan imbalan untuk batu-batu yang secara alami cukup tajam untuk memotong, dan juga batu-batu yang kebetulan, karena bentuknya, dapat menampung air, Anda mungkin akan menerima kiriman pisau dan cangkir darurat yang efektif. Batu api kerap patah sedemikian rupa sehingga menyisakan tepi yang tajam dan, jika Anda teroka semua runtuhan dan tambang batu di dunia ini, tentu akan Anda temukan belati alami yang berguna. Di antara macam-macam rupa yang terbentuk oleh batu yang melapuk, sebagian

mungkin mengandung cekungan yang bisa menampung air. Beberapa jenis kristal tertentu secara alami mengerak di dalam batu alam bundar yang kopong, tapi tebal. Bila dibelah, batu ini bisa menjadi dua buah cangkir. Orang bahkan memberinya nama: geode. Saya menggunakan geode sebagai penindih kertas di meja kerja saya dan, kalau saja permukaan cekung dalamnya tidak kasar sehingga susah dicuci, saya mau menjadikannya cangkir minum.

Kita bisa dengan mudah mereka-reka ukuran efisiensi yang akan menunjukkan bahwa buli-buli yang alami kalah efisien dari yang buatan. Efisiensi adalah ukuran kegunaan dibagi biaya. Kegunaan sebuah buli-buli dapat diukur dalam satuan kuantitas air yang ditampungnya. Biaya dapat dengan mudah diukur dalam satuan-satuan yang sepadan: kuantitas bahan buli-buli itu sendiri. Efisiensi dapat diartikan sebagai volume air yang dapat ditampung sebuah buli-buli dibagi volume bahan yang digunakan untuk membuat buli-buli itu sendiri. Batu kopong di atas meja kerja saya bisa menampung 87,5 cc air. Volume batunya sendiri (yang saya ukur dengan metode Eureka-di-Bak-Mandi Archimedes yang masyhur itu) adalah 130 cc. Maka, efisiensi ‘buli-buli’ ini adalah sekitar 0,673. Angka ini sangat rendah, kendati tidak mengherankan sebab batu itu memang tidak dirancang untuk menampung air. Kebetulan saja dia bisa menampung air. Saya baru saja melakukan pengukuran yang sama untuk gelas anggur, yang efisiensinya ternyata sekitar 3,5. Kendi krim perak teman saya bahkan lebih efisien lagi. Kendi itu bisa menampung 250 cc air sementara volume perak yang dipakai untuk membuatnya hanya 20 cc. Maka, angka efisiensinya tinggi: 12,5.

Tidak semua buli-buli rancangan manusia efisien menurut standar ini. Sebuah buli-buli tebal di dapur bisa menampung 190 cc air sementara volume marmer yang dipakai untuk membuatnya 400 cc. Maka, 'efisiensinya' hanya 0,475, lebih rendah bahkan dari batu alam berongga tadi. Mengapa bisa begitu? Jawabannya bena. Buli-buli marmer itu adalah cobek, benda yang tidak ditujukan untuk menampung air. Cobek adalah alat penggiling manual untuk melumat bumbu dan makanan lainnya dengan ulek: sebatang alu begap yang ditumbukkan kuat-kuat ke bagian dalam cobeknya. Gelas anggur tidak bisa dijadikan cobek; pasti pecah berkeping-keping karena tekanan uleknya. Ukuran efisiensi yang kita reka untuk buli-buli tidak cocok bila buli-buli itu dirancang untuk menjadi cobek. Kita perlu mereka-reka rasio kegunaan/biaya yang lain, yang ikut menghitung daya tahan terhadap ulek sebagai variabel kegunaannya. Lantas, apakah geode alam layak disebut cobek yang dirancang dengan baik? Geode mungkin lulus uji kekuatan, tetapi jika digunakan sebagai cobek, permukaan bagian dalamnya yang kasar dan berkarang pasti menyulitkan, karena celah-celahnya justru melindungi bahan yang hendak diulek. Karena itu, ukuran efisiensi cobek harus kita sempurnakan dengan menyertakan sebuah indeks kehalusan permukaan lengkungan dalamnya. Bahwa cobek marmer saya merupakan hasil rancangan bisa dicermati dari bukti yang lain: tampang denahnya yang membentuk lingkaran sempurna, dipadu dengan lekuk bibir dan alas tiangnya yang elegan sebagaimana tampak dari samping.

Kita bisa mereka-reka ukuran serupa untuk efisiensi pisau dan, saya yakin, pecahan batu alam yang kebetulan kita temukan di sebuah tambang akan kalah efisien, bukan hanya dengan

belati baja Sheffield, melainkan juga dengan batu-batu api yang dipahat apik, yang dipamerkan museum dalam koleksi benda-benda Zaman Batu Akhir.

Ada cara lain untuk menimbang bahwa buli-buli dan pisau alami – yang terbentuk tanpa disengaja – tidak efisien jika dibandingkan dengan buli-buli dan pisau buatan. Dalam proses mencari sebuah alat batu yang cukup tajam, atau sebuah bejana batu yang cukup kedap, sejumlah besar batu tak berguna harus diperiksa dan dibuang. Saat kita mengukur jumlah air yang ditampung sebuah buli-buli, dan membaginya dengan volume bahan batu atau tanah liatnya, alangkah lebih adil jika kita menyertakan jumlah batu atau tanah liat yang terbuang ke dalam bilangan biaya pembaginya. Untuk buli-buli buatan yang diproduksi dengan teknik cetak putar, biaya tambahan ini dapat diabaikan. Untuk patung yang dipahat, biaya serpihan yang terbuang memang ada, walau kecil. Untuk buli-buli atau pisau alam pungutan, ‘biaya pembuangannya’ akan membeludak. Sebagian besar batu tidak dapat menampung air dan tidak tajam. Sebuah industri yang sepenuhnya bertumpu pada *objet trouvé*, pada benda-benda temuan yang dijadikan alat dan perkakas, daripada alat dan perkakas yang dibentuk secara artifisial, akan memiliki bobot mati inefisiensi yang besar sekali dari timbunan benda yang dibuang karena dianggap tidak berguna. Rancangan lebih efisien dibanding temuan.

Sekarang, mari arahkan perhatian pada benda-benda desainoid—benda-benda hidup yang tampak seolah telah dirancang, tetapi sebetulnya dibentuk dengan proses yang sama sekali berbeda—dimulai dengan buli-buli desainoid. Kantong semar (Gambar 1.5) bisa saja dianggap sebagai buli-



Gambar 1.5 Buli-buli desainoid. Kantong Semar, *Nepenthes pervillei*, dari Seychelles.

buli jenis lain semata, tetapi tumbuhan ini punya ‘rasio ekonomi’ yang ciamik, sebanding dengan gelas anggur – kalau

bukan kendi perak – yang saya ukur tadi. Penampakannya memberi kesan bahwa tumbuhan ini dirancang sempurna, tidak cuma untuk menampung air tetapi untuk menenggelamkan serangga dan mencernanya. Kantong semar meramu wewangian yang ampuh memikat serangga. Bau yang sedap itu, diperkuat pola warna yang menggoda, menarik mangsa ke puncak kantong. Di situ, serangga hinggap di luncuran terjal yang licinnya lebih dari sekadar kebetulan, lengkap dengan rambut-rambut yang merunduk dan ditempatkan secara strategis untuk merintangi perjuangan mangsa naik kembali. Saat mangsa jatuh – yang hampir selalu terjadi – ke dalam lambung gelap kantong itu, di dalamnya tidak hanya ada air yang menenggelamkan. Detailnya, yang diterangkan oleh kolega saya Dr. Barrie Juniper, mencengangkan dan saya akan ceritakan dengan ringkas.

Walau bisa menjerat serangga, kantong semar tidak punya rahang, otot, dan gigi untuk menggiling mangsa agar siap dicerna. Mungkin tumbuhan bisa saja menumbuhkan gigi dan rahang pengunyah, tapi pada praktiknya ada solusi yang lebih mudah. Air di kantongnya menampung belatung sekampung dan makhluk-makhluk lainnya. Mereka tinggal hanya di empang tertutup yang dibuat oleh kantong semar, dan mereka punya rahang yang tak dimiliki tumbuhan itu. Jasad korban-korban kantong semar diganyang dan diurai oleh mulut-mulut dan cairan pencernaan belatung-belatung kaki tangannya ini. Tumbuhan itu sendiri hidup dengan memakan sisa-sisa, yang diserapnya melalui lapisan kantongnya.

Kantong semar tidak hanya secara pasif menerima jasa para belatung yang kebetulan jatuh ke dalam kolam pribadinya. Tumbuhan ini giat menyediakan jasa yang dibutuhkan

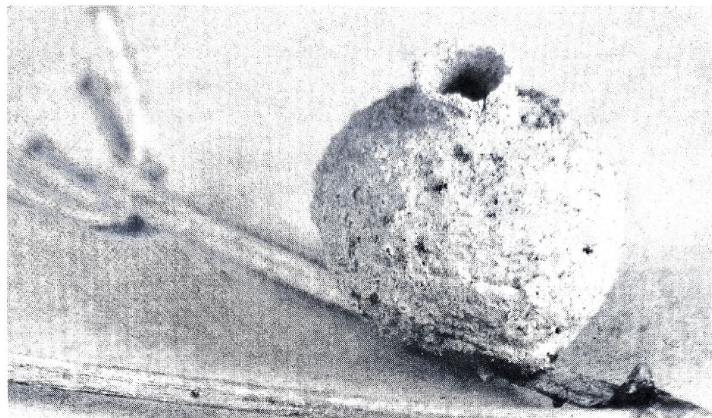
gerombolan belatung sebagai imbalannya. Cobalah teliti air di kantong semar dan Anda akan menemukan satu fakta mencengangkan. Airnya tidak kohong, seperti yang biasa terjadi pada genangan air di kondisi serupa, tetapi – anehnya – kaya akan oksigen. Tanpa oksigen ini belatung-belatung itu tak dapat membiak, tapi dari mana datangnya oksigen itu? Dibuat oleh kantong semar itu sendiri, dan tumbuhan ini seolah-olah dirancang khusus untuk mengoksidasi air tersebut. Sel-sel yang melapisi kantongnya lebih kaya akan klorofil penghasil oksigen ketimbang sel-sel luar yang menghadap matahari dan udara. Kebalikan dari kelaziman yang mengejutkan ini bisa diterangkan: Sel-sel sebelah dalam memang dikhususkan untuk mengeluarkan oksigen langsung ke air di dalam kantong. Kantong semar tidak cuma meminjam rahang-rahang belatung: ia menyewanya, dengan bayaran oksigen.

Perangkap-perangkap desainoid lainnya juga jamak. Perangkap lalat Venus sama elegannya dengan kantong semar, dengan penyempurnaan tambahan berupa bagian-bagian yang bergerak. Serangga mangsa mengaktifkan perangkap dengan memicu rambut-rambut peka pada tumbuhan itu, yang rahang-rahangnya menutup dengan cerdiknya. Jaring laba-laba adalah perangkap paling terkenal dari semua perangkap buatan hewan, dan kita akan membahasnya tuntas di bab berikutnya. Salah satu padanan bawah airnya adalah jaring yang dibangun oleh larva lalat kadis yang hidup di sungai. Larva kadis juga terkenal karena prestasinya sebagai pembangun rumah untuk dirinya sendiri. Berbagai spesies lain menggunakan batu, tangkai, daun, atau cangkang keong kecil.

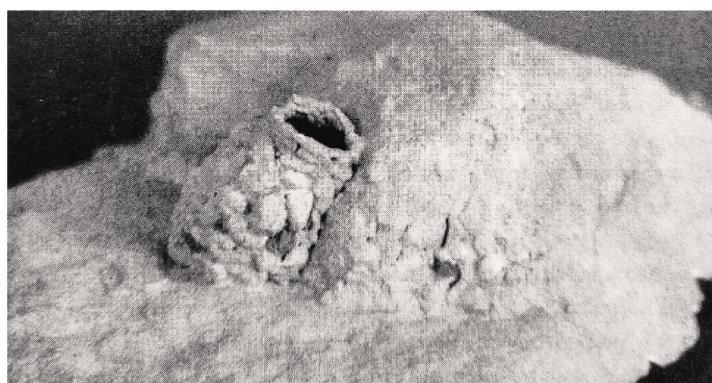
Lazim di berbagai belahan dunia, adalah perangkap kerucut undur-undur. Makhluk menakutkan ini adalah larva dari seekor lalat jala – nama yang lemah lembut kedengarannya. Undur-undur mengintai tepat di bawah pasir di dasar lubangnya, menunggu semut atau serangga lain terjerumus. Lubang itu mencapai bentuknya yang hampir kerucut sempurna – yang menyulitkan korban untuk merangkak keluar – bukan karena rancangan tetapi sebagai akibat dari aturan-aturan fisika sederhana, yang dimanfaatkan lewat cara undur-undur melakukan penggalian. Dari dasar lubang menurun itu, undur-undur melontarkan pasir tepat ke tepi lubang dengan sentakan kepalanya. Menyentakkan pasir dari dasar sebuah lubang sama efeknya dengan mengosongkan jam pasir dari bawah: Pasirnya secara alami membentuk kerucut sempurna dengan tingkat kecuraman yang dapat diprediksi.

Gambar 1.6 membawa kita kembali ke buli-buli. Banyak tawon penyendirinya mengeramkan telur-telurnya di tubuh mangsa, yang telah disengat hingga lumpuh dan kemudian disembunyikan di sebuah lubang. Tawon-tawon ini menutup rapat lubang itu supaya tak terlihat, larva akan memakan daging si mangsa dari dalam dan akhirnya muncul sebagai tawon dewasa bersayap untuk menggenapi daurnya. Sebagian besar spesies tawon penyendirinya menggali lubang sarang mereka di tanah. Tawon *potter* membuat ‘lubang’nya dari tanah liat – sebuah buli-buli bundar yang ditenggerkan secara tidak mencolok pada setangkai ranting di atas pohon (Gambar 1.6a). Seperti kantong semar, buli-buli ini akan meraih skor positif pada tes efisiensi kita untuk desain semu. Lebah-lebah soliter (penyendirinya) menunjukkan pola bersarang di lubang serupa, tetapi hewan ini memberi makan larva-larvanya

dengan serbuk sari, bukan hewan mangsa. Seperti kalangan tawon *potter*, banyak spesies lebah mason membangun sarang buli-buli mereka sendiri. Buli-buli pada Gambar 1.6b dibuat bukan dari tanah liat melainkan dari batu-batu kecil



a.



b.

Gambar 1.6 Buli-buli desainoid yang dibuat oleh hewan-hewan pengrajin:  
(a) tawon *potter* dan (b) lebah *mason*.

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

yang dilekatkan. Terlepas dari kemiripannya dengan wadah efisien buatan manusia, ada hal lain yang cukup menakjubkan tentang spesimen yang difoto ini. Meski tampak hanya satu, sebetulnya ada empat buli-buli. Tiga yang lain ditutupi oleh lebah dengan lumpur yang mengeras untuk memberi kesan mirip dengan batu di sekitarnya. Tak satu pemangsa pun akan menemukan larva kecil yang sedang berkembang di dalam buli-buli itu. Klaster buli-buli ini bisa terlihat oleh kolega saya, Christopher O'Toole, saat ia berkunjung ke Israel, hanya karena lebahnya belum tuntas menutup buli-buli yang terakhir.

Buli-buli serangga ini memiliki tanda-tanda khas 'rancangan'. Di kasus ini, lain dari kantong semar, buli-bulinya benar-benar ditempa dengan perbuatan seekor makhluk terampil—meski mungkin secara tak sadar. Buli-buli tawon *potter* dan lebah mason sekilas tampak lebih mirip dengan buli-buli buatan manusia daripada kantong semar. Tetapi tawon dan lebah tidak dengan sadar atau sengaja merancang buli-buli mereka. Walau buli-buli itu dibentuk, dari tanah liat atau batu, dengan tindak-tanduk serangga-serangganya, hal ini tidak berbeda dari cara tubuh serangga itu sendiri dibuat selama masa perkembangan embrionik. Mungkin terdengar janggal, tapi biar saya jelaskan. Sistem sarafnya tumbuh sedemikian rupa hingga otot, anggota tubuh, dan rahang tawon hidup bergerak dengan pola-pola terkoordinasi. Konsekuensi dari gerakan-gerakan anggota tubuh yang teratur ini adalah bahwa tanah liat diramu dan ditata ke dalam bentuk sebuah buli-buli. Serangga itu kemungkinan besar tidak tahu apa yang dilakukannya dan mengapa. Dia tidak punya konsep sebuah buli-buli sebagai karya kriya, atau sebagai wadah, atau sebagai



Gambar 1.7 Seni kriya desainoid, (a) Sarang burung manyar dan (b) burung prenjak, *Orthotomus sutorius*, dengan sarangnya.

bilik pengerman. Otot-ototnya bergerak sesuai perintah saraf-sarafnya, dan buli-buli adalah hasilnya. Karena itulah kita dengan tegas—meski takjub—mengelompokkan buli-buli tawon dan lebah sebagai desainoid, bukan hasil rancangan: tidak dibentuk oleh kehendak kreatif hewan itu sendiri. Sebenarnya, kalau mau adil, saya tidak tahu pasti tawon tidak memiliki kehendak kreatif dan rancangan sejati atau tidak. Cukuplah bagi saya kalau penjelasan saya tetap berlaku sekalipun tawon punya kehendak kreatif. Begitu pula dengan sarang (Gambar 1.7) dan punjung burung, rumah dan jaring kadis, tetapi tidak untuk patung-patung Gunung Rushmore atau alat-alat yang dipakai untuk memahatnya—semua itu memang benar-benar hasil rancangan.



Gambar 1.8 Gedung pencakar langit serangga dijejer dari utara ke selatan.  
Gundukan rayap kompas di Australia.

Karl von Frisch, ahli zoologi ternama dari Austria yang menerjemahkan tarian lebah, pernah menulis: 'Kalau kita bayangkan sejenak rayap itu setinggi manusia, bukit tertinggi mereka, jika diperbesar dengan skala setara, akan hampir satu mil tingginya, empat kali tinggi Gedung Empire State di New York.' Gedung-gedung pencakar langit pada Gambar 1.8 dibuat oleh rayap-rayap kompas Australia. Hewan ini disebut rayap kompas karena gundukannya selalu dijejerkan dari utara ke selatan sehingga bisa dijadikan kompas oleh penapak tilas yang tersesat (seperti halnya parabola yang, di Inggris, tampaknya semua menghadap selatan). Keuntungannya bagi rayap adalah bahwa permukaan luas dan rata dari gundukan itu dihangatkan oleh mentari di kala fajar dan senja hari. Tetapi gundukan itu terlindungi dari teriknya matahari siang karena hanya ujung lancipnya saja yang menghadap utara –

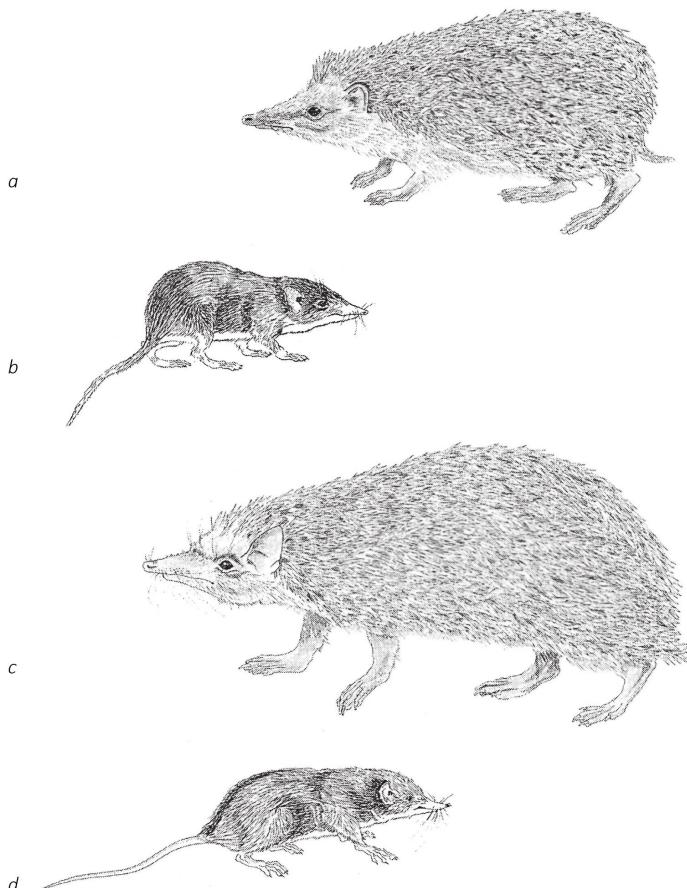
tempat matahari berada pada tengah hari di belahan bumi selatan. Wajar kalau kita berpikir rayap-rayap tersebut telah merancang trik cerdik ini sendiri. Tetapi prinsip yang membuat perilaku konstruksi mereka tampak berakal identik dengan prinsip yang membuat rahang dan kaki rayap tampak didesain. Keduanya tidak didesain. Keduanya desainoid.

Artefak satwa, seperti rumah kadis dan rayap, sarang burung, atau bejana lebah mason, memang menakjubkan, tetapi merupakan kasus khusus di antara benda-benda desainoid – sebuah keganjilan yang menarik. Nama ‘desainoid’ mengacu, utamanya, pada jasad hidup itu sendiri dan bagian-bagiannya. Jasad hidup dibentuk bukan oleh tangan, paruh, atau rahang terampil, melainkan oleh serangkaian proses pertumbuhan embrionik yang berbelit-belit. Penggemar sistem klasifikasi yang saksama mungkin memandang artefak seperti bejana tawon sebagai ‘benda-benda desainoid golongan kedua’ atau sebagai kategori madya di antara yang didesain dan yang desainoid, tetapi saya rasa ini justru membingungkan. Memang, bejana itu terbuat dari lumpur, bukan sel-sel hidup, dan dibentuk dengan gerakan anggota tubuh yang sekilas mirip dengan gerakan tangan pembuat bejana manusia. Namun, semua ‘desain’, semua kelebihan, semua kesesuaian bejana untuk menjalankan tugas berguna, berasal dari dua sumber yang jauh berbeda pada kedua kasus tersebut. Bejana buatan manusia dibayangkan dan direncanakan dengan proses kreatif imajinasi di benak pembuat bejana, atau dengan peniruan sengaja atas gaya pembuat bejana yang lain. Kelebihan dan kesesuaian bejana buatan tawon dengan tujuannya timbul dari proses yang sangat lain – dari proses yang sama persis dengan proses yang

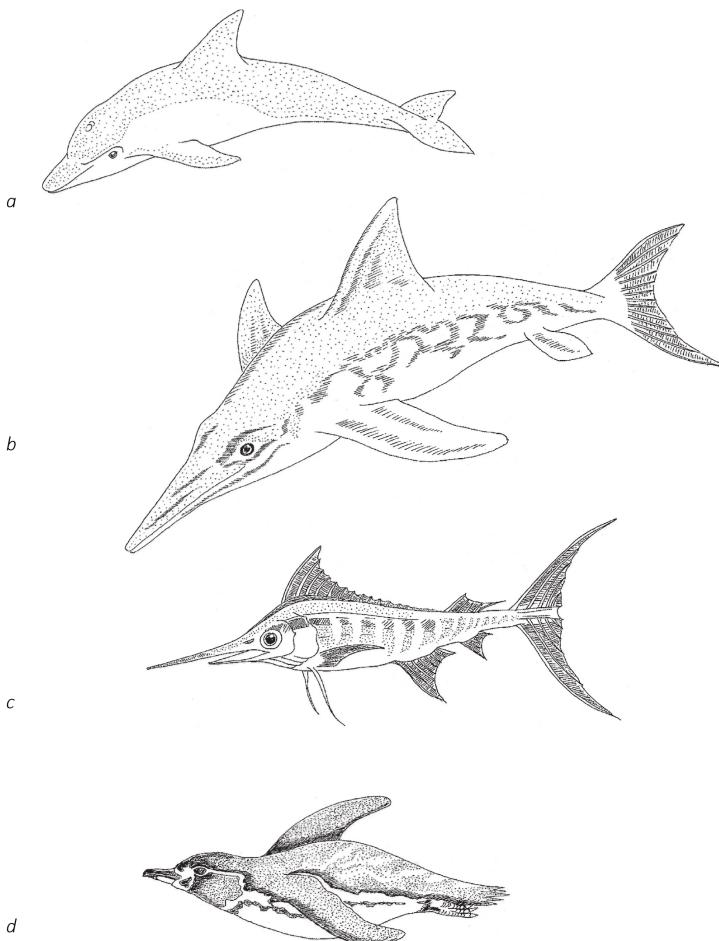
menimbulkan keeleganan dan kesesuaian tubuh tawon itu sendiri. Hal ini akan menjadi kian jelas jika kita lanjut membahas tubuh hidup sebagai benda desainoid.

Salah satu indikasi desain sejati dan desain semu desainoid adalah kesan kuat akan kemiripan di antara suatu benda dan benda-benda lainnya. Kepala-kepala di Gunung Rushmore jelas didesain karena mirip dengan sosok-sosok presiden sungguhan. Kemiripan naga laut berdaun dengan rumput laut, sama jelasnya, juga bukan kebetulan. Akan tetapi, mimikri semacam ini, dan kemiripan kumbang dengan rayap atau serangga tongkat dengan ranting, sama sekali bukan satu-satunya kemiripan yang mengesankan di dunia makhluk hidup. Kita sering terkesima dengan kemiripan antara organ hidup dan perangkat buatan manusia untuk tujuan yang sama. ‘Mimikri’ antara mata manusia dan kamera buatan manusia sudah bukan rahasia sehingga tidak perlu dijabarkan di sini. Insinyur biasanya merupakan kalangan yang paling mumpuni untuk menelaah cara kerja tubuh hewan dan tanaman, karena mekanisme yang efisien – entah didesain entah desainoid – wajib mematuhi prinsip-prinsip yang sama.

Kerap terjadi: Tubuh-tubuh hidup menjadi serupa satu sama lain bukan karena saling meniru, melainkan karena bentuk yang mirip tersebut masing-masing berguna bagi diri mereka masing-masing. Landak dan *tenrec* berduri pada Gambar 1.9 begitu mirip satu sama lain, sampai-sampai hampir percuma menggambar keduanya. Keduanya berkerabat lumayan dekat, sama-sama tergolong dalam ordo *Insectivora*. Akan tetapi, bukti lain menunjukkan jarak kekerabatan keduanya cukup jauh untuk meyakinkan kita bahwa evolusi perawakan berduri kedua makhluk ini terjadi secara terpisah, kemungkinan untuk

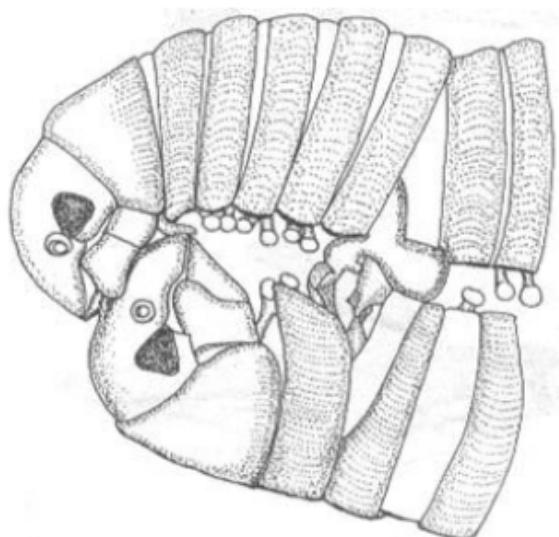


Gambar 1.9 Hewan sering mirip dengan hewan lain yang punya kebutuhan serupa, ketimbang dengan kerabat lebih dekatnya. Landak Aljazair, *Erinaceus algirus* (a), adalah sepupu dekat landak tikus, *Neotetracus sinensis* (b). Tenrec landak bertubuh lebih besar, *Setifer setosus* (c), adalah sepupu dekat tenrec ekor panjang, *Microgale melanorrachis* (d).

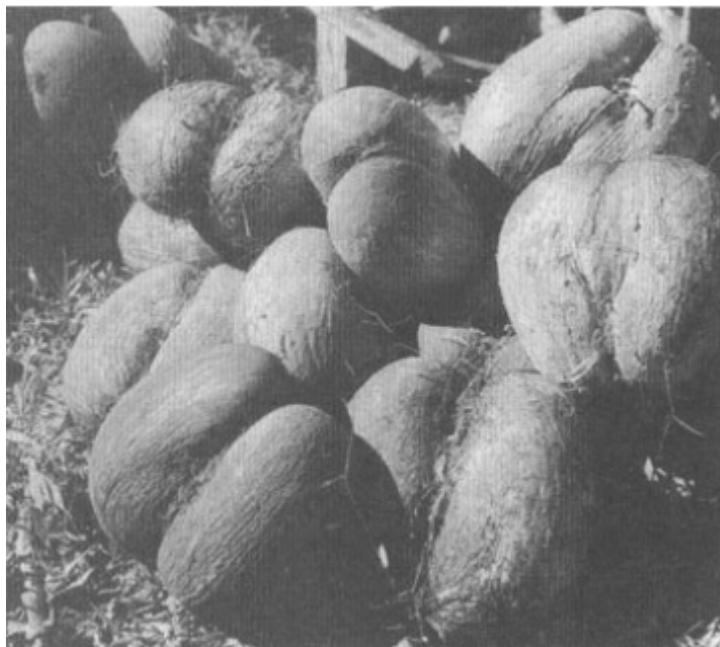


Gambar 1.10 Evolusi konvergen: evolusi perampingan garis tubuh yang terjadi secara terpisah: (a) Lumba-lumba hidung botol, *Tursiops truncatus*; (b) *Ichthyosaurus*; (c) marlin biru, *Makaira nigricans*; dan (d) penguin Galapagos, *Spheniscus mendiculus*.

alasan yang searah: Duri adalah pelindung diri dari pemangsa. Hewan-hewan berduri ini masing-masing digambar bersebelahan dengan seekor hewan mirip tikus, sepupu yang lebih dekat dengannya ketimbang hewan berduri yang lain. Gambar 1.10 menyuguhkan contoh yang lain. Hewan-hewan yang berenang cepat di dekat permukaan air laut kerap berkonvergensi ke bentuk tubuh yang sama. Para insinyur akan menamai bentuk tubuh ini ramping (*streamlined*). Gambar tersebut menunjukkan seekor lumba-lumba (mamalia), seekor ichthyosaurus yang sudah punah (dan bisa dianggap sebagai padanan lumba-lumba dari golongan reptilia), seekor ikan marlin (ikan bertulang), dan seekor penguin (burung). Hal semacam ini disebut evolusi konvergen.



Gambar 1.11 Kaki seribu, *Cylindroiulus punctatus*, dalam posisi sanggama misionaris.



Gambar 1.12a Kasus kemiripan yang kebetulan di alam liar: coco de mer.

Konvergensi yang terlihat nyata tidaklah selalu bermakna. Orang-orang – tidak semuanya misionaris – yang memuliakan sanggama 'tatap muka' sebagai ciri kemanusiaan yang lebih agung mungkin akan terkesima melihat hewan kaki seribu di Gambar 1.11. Jika kita sebut ini konvergen, kemungkinan besar penyebabnya bukan kebutuhan yang serupa; namun, karena terbatasnya jumlah cara bagi jantan dan betina untuk menjajarkan tubuh-tubuh mereka, dan ada banyak alasan mengapa yang dipilih adalah salah satu di antaranya.

Dan kita pun kembali ke topik pembuka kita tentang kebetulan murni. Ada makhluk hidup yang menyerupai benda lain tetapi kemiripannya mungkin tidak cukup nyata untuk dianggap

bukan kebetulan. Merpati Luzon (*Gallicolumba luzonica*) punya sejumput bulu merah yang ditempatkan sedemikian rupa hingga memberi kesan mirip luka tikam pada dadanya, tetapi kemiripan ini barangkali tidak berarti apa-apa. Sama kebetulannya: kemiripan coco de mer (kelapa Maladewa/kelapa laut) dengan pinggul seorang wanita (Gambar 1.12a). Pada contoh garis wajah Kennedy di tebing, alasan kita merasa kemiripan-kemiripannya kebetulan bersifat statistis. 'Luka tikam' merpati Luzon terbentuk hanya dari bulu-bulu warna merah. 'Mimikri' semu coco de mer, harus diakui, memang mengesankan. Ada dua atau tiga ciri yang mirip, bukan hanya satu. Bahkan ada bagian yang terkesan seperti bulu kemaluan. Akan tetapi, otak manusia berupaya keras dan giat mencari kemiripan, khususnya pada bagian-bagian tubuh yang kita anggap menarik. Saya menduga, inilah yang terjadi pada persepsi kita terhadap coco de mer, sama seperti saat kita menangkap kesan wajah Kennedy di lereng bukit.

Demikian pula halnya dengan ngengat kepala maut (Gambar 1.12b). Memang otak kita punya kegandrungan yang hampir-hampir saru untuk melihat wajah, dasar dari salah satu ilusi paling mencolok yang dikenal para ahli psikologi. Cobalah beli topeng di toko kostum, lalu acungkan dengan sisi berongganya menghadap orang lain (dan dengan latar belakang yang membuat kedua lubang matanya tampak mencolok). Orang itu kemungkinan akan mengira itu wajah utuh (tidak berongga). Konsekuensinya ganjil sekali, yang akan kentara jika Anda dengan perlahan memutar topeng ke arah samping. Ingat bahwa otak orang yang melihatnya 'mengira' wajahnya wajah utuh, padahal sebetulnya topeng berongga. Ketika to-



Gambar 1.12b Kasus kemiripan yang kebetulan di alam liar: ngengat kepala maut, *Acherontia atropos*.

peng berongga itu bergerak ke kiri, satu-satunya cara mengakurkan laporan pandangan mata dengan praduga otak bahwa wajahnya utuh adalah dengan mengira topeng bergerak ke arah sebaliknya. Dan inilah ilusi yang persisnya dilihat orang yang memandang. Wajah itu akan tampak berputar ke arah yang berlawanan dengan arah putaran sebenarnya.

Jadi, agaknya kemiripan ngengat kepala maut dengan wajah adalah kebetulan. Akan tetapi, perlu saya tambahkan bahwa salah seorang teoretikus evolusi kita yang paling dihormati, Robert Trivers, yang kini berkarier di Universitas Rutgers, New Jersey, yakin bahwa mimikri wajah pada punggung serangga

boleh jadi merupakan bentuk adaptasi untuk menakut-nakuti calon pemangsa seperti burung (kita mengira wajah pada ngengat itu tengkorak manusia, tetapi bisa saja itu sebetulnya wajah monyet). Barangkali dia benar dan, jika memang begitu, semestinya saya menempatkan contoh ini pada kategori 'desainoid' saya. Untuk alasan yang berbeda, adaptasi yang sama mungkin juga dilakukan oleh hewan peniru wajah lainnya, kepiting samurai Jepang. Kepiting ini, pada batoknya, punya kemiripan (walau, harus saya katakan, bukan kemiripan yang amat mengesankan) dengan ciri-ciri wajah bengis kesatria samurai. Dikatakan bahwa, selama berabad-abad, nelayan Jepang – dipicu kegandrungan alami otak untuk melihat wajah – telah mengamati adanya kemiripan tipis dengan wajah pada batok-batok beberapa kepiting. Karena percaya takhayul atau atas dasar rasa hormat, nelayan tidak tega membunuh kepiting dengan wajah serupa manusia (lebih khususnya, wajah serupa seorang samurai) dan membuangnya kembali ke laut. Menurut teori ini, banyak nyawa kepiting terselamatkan oleh rupa mirip wajah manusianya, dan kepiting-kepiting dengan ciri-ciri wajah manusia terjelas di satu generasi menyumbang jumlah keturunan yang timpang (sangat dominan) pada generasi berikutnya. Oleh karena itu, generasi-generasi yang muncul kemudian lebih diuntungkan ketimbang generasi-generasi terdahulu, dan derajat kemiripannya pun lambat laun meningkat.

Ketika tadi kita membahas cara mendapatkan pisau batu hanya dengan mencarinya, kita sepakat bahwa sebilah pisau tajam dapat 'dibuat' dengan cara memeriksa semua batu dan menyingkirkan yang tumpul-tumpul—majoritas besarnya.

Jika kita geledah semua runtahan dan tambang batu, tentu akan kita temukan batu yang memiliki, tidak hanya bilah yang baik, tetapi juga gagang yang nyaman. Tidak sepenuhnya simplistik kalau dikatakan bahwa industri farmasi bekerja dengan cara memeriksa banyak sekali molekul yang dihasilkan secara sembarang, lalu menguji kemanjuran sebagian kecil molekul yang tampak menjanjikan. Namun, kita sudah semufakat bahwa mencari adalah metode yang amat tidak sangkil untuk mendapatkan alat yang berguna. Jauh lebih baik kalau dengan sengaja kita pahat atau kikir bahan dasar yang sesuai, seperti batu atau baja. Akan tetapi, bukan begitu cara membuat benda-benda desainoid—benda-benda hidup yang terkesan dirancang. Benda-benda hidup, pada akhirnya, timbul dari proses yang agak mirip dengan proses ‘mencari’, tetapi lain dari pencarian murni.

Mungkin terdengar aneh mengatakan hal ini tentang batu, tetapi tetap akan saya katakan dan uraikan. Batu tidak punya keturunan. Jika batu punya keturunan seperti dirinya, anak-anaknya itu akan mewarisi dari orang tua mereka sifat memiliki keturunan. Artinya, akan ada cucu dan cicit pada generasi-generasi yang jumlahnya tidak ditentukan. Mungkin Anda berpikir, spekulasinya terlalu mengada-ada dan, lagi pula, buat apa? Untuk menjawabnya, coba lihat benda lain yang ketajamannya mungkin sama-sama tidak disengaja, tetapi yang memang punya keturunan.

Daun keras memita pada sebagian alang-alang cukup tajam tepi-tepiinya. Ketajaman ini mungkin merupakan produk susulan tidak disengaja dari sifat-sifat lain daun tersebut. Kulit Anda bisa tersayat daun tajam alang-alang. Meski cukup mengganggu, sayatan itu tidak sampai membuat Anda curiga

adanya kesengajaan. Barang tentu, sebagian daun lebih tajam dari daun yang lain dan Anda bisa mencari alang-alang tertajam yang ada di tepi danau. Sekarang, berikut ini perbedaannya dengan batu. Daun tajam alang-alang tadi jangan cuma dipakai sebagai alat pemotong, tapi coba kembang biakkan. Atau kembang biakkan dari tanaman tempat Anda mencabut daun tajam itu. Atur supaya alang-alang tertajam saja yang bisa melakukan penyerbukan silang, matikan yang tumpul – atau, yang jelas, pastikan alang-alang tertajamlah yang paling banyak berkembang biak. Bukan sekali, melainkan bergenerasi-generasi. Saat generasi berganti generasi, Anda akan melihat bahwa alang-alang yang agak tumpul dan agak tajam masih ada, tetapi jumlahnya makin jauh tertinggal dari alang-alang lain yang makin lama makin tajam. Setelah 100 generasi, Anda mungkin sudah membiakkan alang-alang yang daunnya cukup tajam untuk mencukur janggut hingga licin. Jika alang-alang dibiakkan untuk menambah kekakuan sekaligus kelancipan tepi daunnya, lambat laun Anda bisa menggorok leher dengan patahannya.

Boleh dibilang, yang Anda perbuat hanyalah menemukan sifat yang dicari: tanpa memahat, mengerat, mencetak, atau menggosok di batu asah; hanya menemukan yang terbaik dari yang sudah ada. Daun-daun tajam ditemukan, daun-daun tumpul disingkirkan. Seperti cerita mencari batu-batu tajam, tetapi dengan satu tambahan signifikan: prosesnya kumulatif. Daun – atau tepatnya tumbuhan yang membuat daun – berkembang biak, sementara batu tidak. Setelah menemukan bilah terbaik dari satu generasi, Anda tidak cuma menggunakan hingga aus. Anda meneruskan sifat tajam



Gambar 1.13 Sayur-sayur ini dibiakkan dari satu leluhur, yaitu kubis liar, *Brassica olearacea*: (searah jarum jam dari atas ke kiri) kubis Brussel, kohlrabi, rutabaga, kubis bulat (*drumhead*), kembang kol, dan kubis savoy emas.

itu ke generasi berikutnya, untuk ditingkatkan kemudian, dengan membiakkannya. Proses ini bersifat kumulatif dan takberujung. Anda masih tetap terus mencari, tetapi karena genetika memampukan peningkatan kumulatif, spesimen terbaik pada satu generasi terbaru lebih baik dari yang terbaik pada satu generasi terdahulu. Seperti akan kita lihat di Bab 3, inilah makna Mendaki Gunung Kemuskilan.

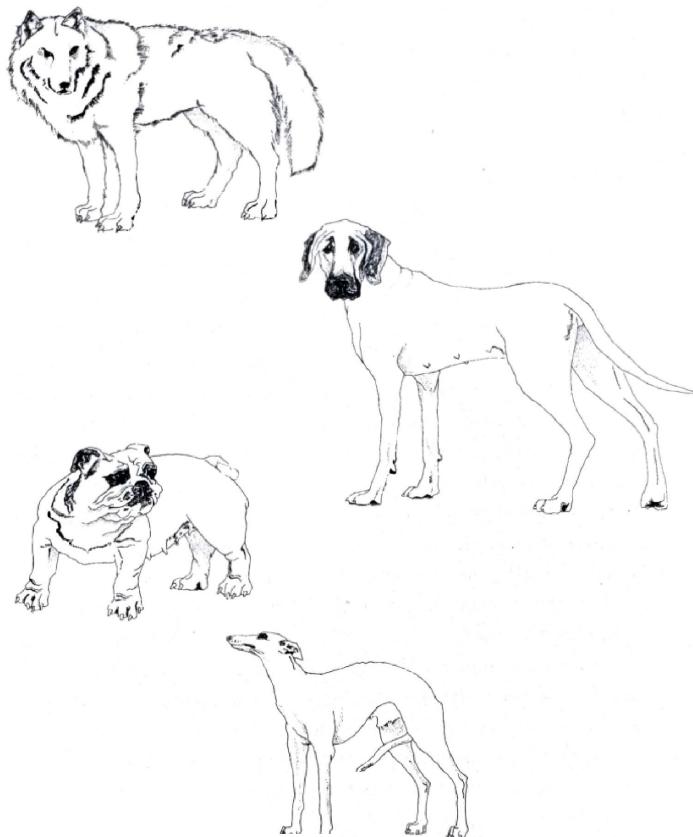
Alang-alang yang makin lama makin tajam adalah contoh untuk menjelaskan maksud saya. Tentu ada contoh-contoh nyata dari penerapan prinsip yang sama. Semua tumbuhan pada Gambar 1.13 diturunkan dari satu spesies liar, yaitu kubis liar, *Brassica oleracea*. Tumbuhan ini tidak istimewa dan tidak tampak mirip kubis. Namun hanya dalam beberapa abad, manusia telah membuat dan membentuk tumbuhan liar ini menjadi jenis-jenis tanaman pangan yang sangat berbeda. Demikian pula ceritanya dengan anjing (Gambar 1.14).

Kendati kawin silang antara anjing dan jakal dan antara anjing dan *coyote* memang terjadi, sebagian besar ahli kini telah menerima bahwa semua ras anjing jinak turun dari seekor serigala leluhur (kiri atas) yang hidup sekitar beberapa ribu tahun silam. Seolah-olah manusia telah membentuk-bentuk tubuh serigala layaknya periuk tanah liat. Tapi tentu kita tidak dengan harfiah menguli dan menekan-nekan tubuh serigala hingga berbentuk, katakanlah, whippet atau dachshund. Kita melakukannya dengan pencarian kumulatif atau, dalam istilah lazimnya, pembiakan selektif atau seleksi buatan. Para pembiak whippet menemukan anjing-anjing yang tampak sedikit lebih mirip whippet dari yang lain. Mereka membiakkan anjing-anjing itu, lalu menemukan anjing-anjing yang paling mirip whippet dari generasi berikutnya, dan

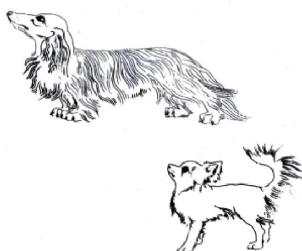
seterusnya. Tentu saja prosesnya tidak sesederhana itu melulu, dan para pembiak tidak memiliki konsep whippet modern di dalam benak mereka sebagai sasaran jauhnya. Barangkali mereka hanya suka melihat ciri-ciri fisik yang kini kita kenali sebagai mirip whippet atau, boleh jadi, perawakan yang terlihat itu muncul sebagai produk susulan dari pembiakan untuk tujuan lain, seperti kecakapan berburu kelinci. Namun, whippet dan dachshund, Great Dane dan bulldog, dibuat dengan proses yang lebih menyerupai kegiatan mencari daripada membuat kerajinan tanah liat. Begitu pun, proses tersebut tidak sama dengan kegiatan murni mencari karena sifatnya yang kumulatif dari generasi ke generasi. Itulah alasan saya menyebutnya *pencarian kumulatif*.

Benda-benda taksengaja semata-mata ditemukan. Benda-benda desain sama sekali tidak ditemukan, tetapi dibentuk, dicetak, diuli, dirakit, dipadu padan, dipahat – dibentuk-bentuk dengan satu atau lain cara. Benda-benda desainoid ditemukan secara kumulatif, entah oleh manusia, seperti kasus anjing jinak dan kubis, atau oleh alam, seperti kasus hiu, misalnya. Fakta hereditas memastikan bahwa peningkatan-peningkatan *taksengaja* yang *ditemukan* di tiap generasi terus terakumulasi dari generasi ke generasi. Di akhir sekian banyak generasi pencarian kumulatif, alhasil muncullah sebuah benda desainoid, yang dapat membuat kita berdecak kagum pada kesempurnaan desain semunya. Tapi desain tersebut bukan desain sejati karena dicapai dengan proses yang sama sekali berbeda.

Akan menyenangkan kalau mampu mendemonstrasikan proses ini kapan pun kita mau. Kurun generasi anjing sedikit lebih singkat dari kurun generasi kita. Begitu pun, butuh lebih



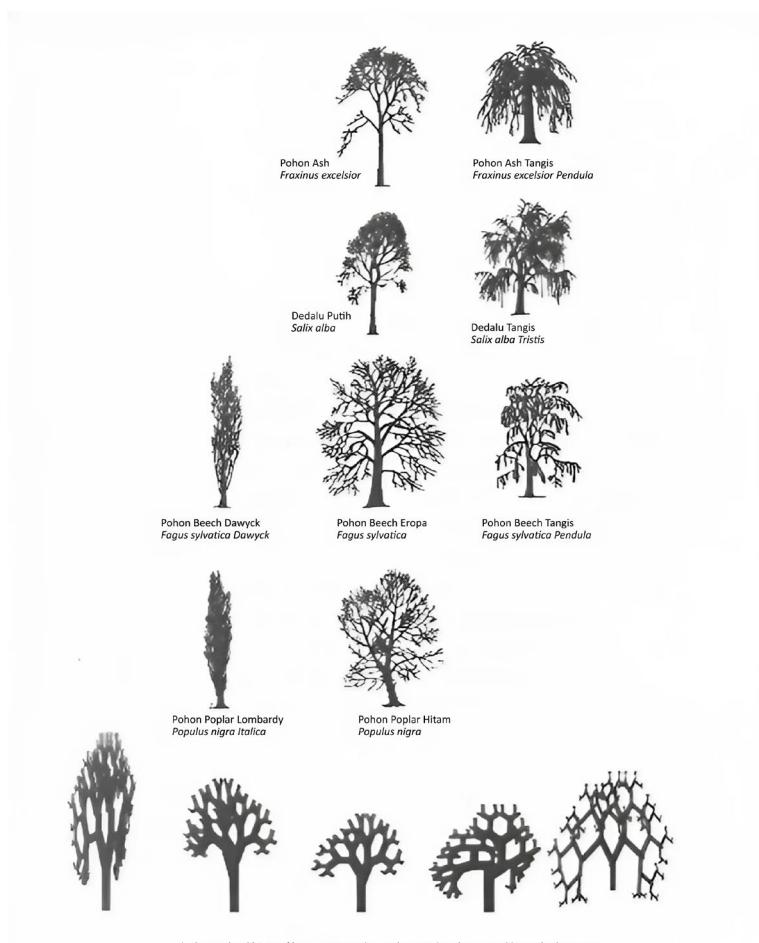
Gambar 1.14 Kekuatan seleksi buatan dalam membentuk binatang. Semua anjing jinak ini dibiakkan oleh manusia dari leluhur liar yang sama, seekor serigala (atas): Great Dane, bulldog Inggris, whippet, dachshund bulu panjang, dan chihuahua bulu panjang.



dari masa hidup manusia untuk melancarkan evolusi anjing ke tataran yang signifikan. Manusia telah membiakkan chihuahua dalam waktu kira-kira seperseribu dari kurun yang dibutuhkan alam untuk membiakkan serigala dari para leluhurnya yang seukuran (meski tidak sama bentuk dengan) chihuahua dan pemakan serangga dahulu, kala dinosaurus punah. Biarpun begitu, seleksi buatan makhluk hidup sungguhan – setidaknya, makhluk yang lebih besar dari bakteri – masih terlalu lambat untuk mendemonstrasikan hasil yang mengesankan bagi manusia yang tidak sabar dan pendek umur. Anda bisa memperlekas prosesnya hingga amat pesat dengan komputer. Komputer, dengan segala keterbatasannya, luar biasa kencang, dan dapat menyimulasikan apa pun yang bisa dengan persis didefinisikan, termasuk proses-proses reproduksi seperti pada hewan dan tumbuhan. Jika Anda menyimulasikan hereditas, syarat paling mendasar untuk adanya kehidupan itu, dan mengadakan mutasi acak yang terjadi sesekali, hasil yang timbul dari evolusi dalam beberapa ratus generasi pembiakan selektif sungguh akan membuat kita terpana. Saya memelopori pendekatan ini di buku saya *Pembuat Arloji yang Buta*, menggunakan program komputer yang bernama sama. Dengan program ini, Anda bisa membiakkan, dengan seleksi buatan, makhluk-makhluk yang disebut biomorf komputer.

Biomorf-biomorf komputer semuanya dibiakkan dari satu leluhur bersama yang tampak seperti ini , dalam pengertian yang sama seperti semua ras anjing dibiakkan dari seekor serigala. Sejumlah kelompok keturunan dengan 'mutasi genetik' acak tampil di layar komputer dan seorang manusia memilih mana dari para anggota tiap kelompok keturunan itu

## MENDAKI GUNUNG KEMUSKILAN



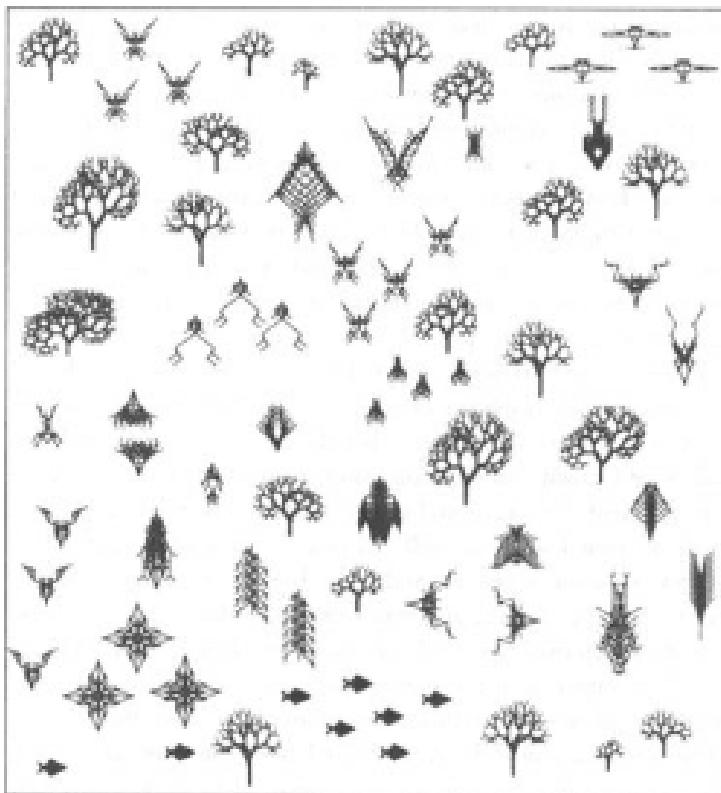
'Pohon-pohon' biomorf komputer yang beraneka wujudnya karena sedikit perbedaan gen

**Gambar 1.15 Pohon-pohon sungguhan dan pohon-pohon biomorf**  
komputer untuk menunjukkan bagaimana varietas-varietas dari spesies  
yang sama bisa meragam bentuk karena perubahan-perubahan agak kecil  
dalam aturan-aturan pertumbuhannya. Beberapa spesies pohon memiliki  
satu varietas 'tangis' (rindang) dan beberapa spesies telah berkonvergensi  
ke bentuk 'Lombardy' yang menjulang lurus ke langit.

yang akan dibiakkan. Ini perlu dijelaskan. Pertama, apa artinya ‘keturunan’, ‘gen’, dan ‘mutasi’ dalam konteks benda-benda komputer ini? Semua biomorf memiliki jenis ‘embriologi’ yang sama. Mereka pada dasarnya dibangun sebagai sebatang pohon bercabang, atau rangkaian segmental dari pohon-pohon bercabang yang digabung-gabungkan. Perincian dari pohon(-pohon) tersebut, seperti jumlah cabangnya, panjangnya, dan sudut cabang-cabangnya, dikendalikan oleh ‘gen-gen’ yang hanya berupa angka-angka di komputer. Gen-gen di pohon sungguhan, seperti di tubuh kita dan bakteri, merupakan pesan-pesan tersandi yang ditulis dalam bahasa DNA. DNA disalin dari generasi ke generasi dengan derajat kesetiaan tinggi, meski tidak sempurna. Di dalam tiap generasi, DNA ‘dibacakan’ dan memiliki pengaruh terhadap bentuk dari hewan atau tumbuhan tersebut. Gambar 1.15 menunjukkan bahwa, pada pohon-pohon sungguhan dan pohon-pohon biomorf komputer, perubahan pada segelintir gen saja dapat mengubah bentuk seluruh tumbuhannya dengan mengubah aturan-aturan pertumbuhan terprogram saat tiap ranting baru terbentuk. Gen-gen biomorf tidak terbuat dari DNA, tetapi perbedaan ini remeh untuk tujuan kita. DNA adalah informasi yang disandikan secara digital, persis seperti angka-angka dalam sebuah komputer, dan ‘gen-gen’ numerik diteruskan ke generasi-generasi biomorf dengan cara yang sama seperti DNA diturunkan ke generasi-generasi tumbuhan atau hewan.

Ketika sebuah biomorf beranak, anaknya mewarisi semua gen induknya (yang jumlahnya hanya satu karena tidak ada hubungan seksual), tetapi dengan kemungkinan mutasi acak. Sebuah mutasi adalah peningkatan atau penurunan kecil yang

acak dalam nilai numerik sebuah gen. Jadi, anak mungkin seperti induknya, tetapi dengan sudut yang sedikit lebih curam ke salah satu cabangnya karena nilai numerik dari Gen 6-nya telah naik dari 20 ke 21. Saat dalam mode pembiakan biomorf, komputer menggambarkan sebuah biomorf di pusat layar, dikelilingi oleh sekelompok keturunan yang telah bermutasi secara acak. Karena gen-gen mereka telah sedikit berubah, anak selalu memiliki kemiripan dengan induknya, dan dengan saudara-saudaranya, tetapi kerap menampilkan beberapa perbedaan tipis yang dapat ditangkap mata manusia. Dengan *mouse* komputer, seorang manusia memilih satu dari selayar penuh biomorf untuk 'dibiakkan'. Layar kemudian kosong, hanya menyisakan biomorf yang dipilih. Biomorf itu lantas bergeser ke selot induk di pusat layar dan 'menelurkan' satu kelompok keturunan mutan baru di sekeliling dirinya. Seiring generasi silih berganti, penyeleksi dapat memandu evolusi dengan cara yang sama seperti yang dilakukan manusia dalam memandu evolusi anjing jinak, tetapi dengan laju yang lebih cepat. Salah satu hal yang mengagetkan saya ketika pertama sekali menuliskan programnya adalah betapa cepatnya sebatang pohon biomorf bisa dievolusikan menjauh dari bentuk pohon asalinya. Saya mendapati bahwa saya bisa dengan sengaja membentuk 'serangga' atau 'bunga', 'kelelawar', 'laba-laba', atau 'pesawat tempur *spitfire*'. Tiap-tiap dari semua biomorf di Gambar 1.16 adalah produk akhir dari ratusan generasi pembiakan dengan seleksi buatan. Karena makhluk-makhluk tersebut berkembang biak di dalam sebuah komputer, kita bisa melejit ke banyak generasi evolusi dalam hitungan menit. Mainkan program ini beberapa menit di komputer modern yang cepat, dan Anda akan menyaksikan langsung cara kerja seleksi Darwinian. Biomorf-biomorf di ta-



Gambar 1.16 Taman safari biomorf hitam-putih, dibiakkan dengan program komputer 'Blind Watchmaker'.

man safari Gambar 1.16 tampak bagi saya mirip tawon, kupukupu, laba-laba, kalajengking, cacing pipih, kutu, dan 'makhluk-makhluk' lain yang samar-sama bersifat biologis sekalipun tidak mirip spesies tertentu di planet ini. Tapi semuanya adalah sepupu dari pohon-pohon yang berdiri di antara mereka, dan dari skuadron 'pesawat tempur *spitfire*' di pojok kanan atas. Dan mereka adalah sepupu yang terbilang

dekat. Semuanya memiliki jumlah gen yang sama (enam belas). Perbedaan mereka hanya terletak pada nilai-nilai yang disandikan secara numerik dari gen-gen tersebut. Kita bisa membentuk makhluk mana pun di taman safari tersebut menjadi makhluk lain mana pun, atau menjadi yang mana pun dari triliunan biomorf lain, hanya dengan pembiakan selektif.

Versi terbaru program ini dapat membiakkan biomorf yang juga meragam dalam hal warna. Versi terbaru itu dibuat berdasarkan program lama tetapi dengan ‘embriologi’ yang lebih rumit dan gen-gen baru yang mengontrol warna cabang-cabang pohonnya. Ada juga gen-gen baru yang menentukan bentuk tiap cabangnya (entah garis, entah persegi, entah bulat telur; entah berisi entah kosong) dan setebal apa garis-garisnya dilukiskan. Saat menggunakan program berwarna ini, saya ternyata mengikuti lorong-lorong evolusi yang tidak menuju serangga dan kalajengking tetapi menuju bunga dan pola-pola abstrak yang mungkin bagus dijadikan corak *wallpaper* atau ubin kamar mandi (Gambar 1.17). Istri saya, Lalla Ward, telah membordir empat dari biomorf-biomorf ini menjadi sarung kursi, dengan skala satu tusukan jarum sama dengan satu piksel komputer.

Biomorf ‘diseleksi secara artifisial’ oleh seorang penyeleksi manusia. Dalam hal ini, biomorf sama seperti kubis atau anjing ras. Namun, seleksi buatan membutuhkan penyeleksi manusia dan bukan pokok bahasan utama buku ini. Mengikuti cara Darwin, saya menggunakan seleksi buatan sebagai model untuk proses yang lain: seleksi alam. Akhirnya, tibalah waktunya untuk membicarakan seleksi alam itu sendiri. Seleksi alam seperti seleksi buatan, tetapi tanpa sang pemilih manusia. Jika pada seleksi buatan manusialah yang memutus-



Gambar 1.17 Taman safari biomorf yang dibiakkan dengan 'Colour Watchmaker'. Segitiga hitam dan putih di latar belakangnya ditambahkan sekadar sebagai dekorasi.

kan keturunan mana yang mati dan mana yang bereproduksi, pada seleksi alam, alamlah yang 'memutuskan'. Tanda kutip pada kata terakhir kalimat sebelumnya penting sekali karena alam tidak memutuskan dengan sadar. Mungkin tampak

sudah jelas sehingga tidak perlu ditegaskan, tetapi Anda akan kaget dengan jumlah orang yang berpikir seleksi alam menyiratkan adanya semacam pilihan pribadi. Mereka salah total. Faktanya hanyalah bahwa ada keturunan yang lebih berisiko mati sementara yang lain mampu bertahan hidup dan bereproduksi. Oleh karena itu, saat generasi berganti generasi, makhluk rata-rata dan tipikal di dalam populasi tersebut menjadi kian pandai dalam seni bertahan hidup dan bereproduksi. Perlu saya perjelas: kian pandai, bila diukur dengan standar mutlak tertentu. Belum tentu lebih efektif pada praktiknya karena ketahanan hidup terus-menerus diancam oleh makhluk-makhluk lain yang juga berevolusi dan menyempurnakan kemahirannya. Sebuah spesies boleh jadi secara progresif kian pandai menghindar dari para pemangsa; namun, karena pada saat yang sama para pemangsa juga kian pandai menangkap mangsa, perolehan bersihnya bisa jadi tidak ada. ‘Perlombaan senjata evolusioner’ semacam ini menarik, tetapi terlalu prematur bila kita membahasnya sekarang.

Seleksi alam relatif mudah dicapai di komputer, dan biomorf adalah contoh yang bagus. Adalah impian saya untuk juga menyimulasikan seleksi alam di komputer. Idealnya, saya perlu mengatur kondisi-kondisi perlombaan senjata evolusioner: ‘pemangsa’ dan ‘mangsa’ muncul di layar dan saling sikut menuju evolusi progresif sementara kita duduk santai menontonnya. Sayangnya, hal itu sulit sekali dilakukan, dan berikut ini alasannya. Tadi saya katakan bahwa ada keturunan yang lebih berisiko mati, dan mungkin tampak cukup mudah untuk menyimulasikan kematian nonacak. Namun, agar simulasi kematian alaminya baik, akhir hidup

makhluk komputer itu haruslah terjadi akibat ketaksempurnaan yang menarik, seperti kaki pendek yang membuat larinya lebih lambat dari para pemangsa. Biomorf komputer, misalnya rupa-rupa mirip serangga di Gambar 1.16, terkadang punya sulur-sulur kecil yang kita bayangkan tampak seperti kaki. Tetapi ‘kaki-kaki’ ini tidak digunakan untuk tujuan apa pun, dan tidak ada pemangsa. Tidak ada pula mangsa atau tumbuhan untuk dimakan. Dunia mereka tanpa cuaca, tanpa penyakit. Semua bahaya atau ancaman ini bisa saja kita simulasi. Tetapi proses menyimulasikan satu dari ancaman tersebut akan sama artifisialnya dengan seleksi buatan. Kita akan terpaksa melakukan sesuatu seperti memutuskan secara manasuka bahwa biomorf-biomorf yang tinggi kurus lebih lihai berkelit dari pemangsa ketimbang biomorf-biomorf bertubuh pendek gempal. Tidak sulit untuk memerintahkan komputer mengukur dimensi-dimensi biomorf dan memilih yang paling semampai untuk dibiakkan. Tetapi evolusinya akan mengarah ke titik yang kurang menarik. Makin lama, kita hanya akan melihat biomorfnya makin jangkung, seiring generasi berganti generasi. Tidak lebih dari yang bisa kita capai dengan menyeleksi individu yang paling jangkung secara artifisial dengan mata. Sifat-sifat nyata seleksi alam, yang mungkin dapat dicapai oleh simulasi yang baik, tidak ada dalam skenario itu.

Seleksi alam yang nyata jauh lebih canggih. Bisa juga dianggap jauh lebih rumit kendati juga bisa dipandang amat sederhana. Perlu disadari pula bahwa peningkatan pada satu dimensi yang mana pun, misalnya panjang kaki, hanyalah peningkatan yang tetap terbatas. Di kehidupan nyata, ukuran kaki bisa dianggap terlalu panjang (karena sudah justru merugikan

pemiliknya). Kaki-kaki panjang lebih rentan patah dan terbelit semak belukar. Dengan sedikit kecerdikan, kita bisa memprogram peristiwa yang sebanding dengan patah tulang dan terbelit belukar ke dalam komputer. Kita bisa membangun semacam fisika fraktur: mencari cara merepresentasikan deformasi akibat tekanan, deformasi akibat tarikan, koefisien kelenturan – semua bisa disimulasikan jika kita mengetahui prosesnya. Yang jadi masalah adalah hal-hal yang tidak kita ketahui atau yang belum terpikirkan, dan itu berarti hampir semua hal lainnya. Panjang kaki optimal juga dipengaruhi oleh sejumlah besar faktor yang belum kita pikirkan. Parahnya lagi, panjang hanyalah satu dari entah berapa banyak aspek dari kaki seekor hewan yang berinteraksi satu sama lain, dan dengan banyak hal lainnya, sehingga memengaruhi ketahanan hidupnya. Masih ada ketebalan, kekakuan, kerapuhan, bobot topangan, jumlah sendi pada kaki, jumlah kaki itu sendiri, kelancipan kaki. Dan itu semua baru urusan kaki saja. Probabilitas ketahanan hidup hewan tersebut dipengaruhi oleh semua bagian lain dari tubuhnya.

Selama kita mencoba menambahkan semua kontribusi tersebut pada ketahanan hidup seekor hewan secara teoretis, di dalam sebuah komputer, tetap ada manusia yang mengambil keputusan secara manasuka: programer komputernya. Yang idealnya perlu kita perbuat adalah menyimulasikan fisika lengkap dan ekologi lengkap, dengan pemangsa tiruan, mangsa tiruan, tumbuhan tiruan, dan parasit tiruan. Semua makhluk tiruan ini harus bisa berevolusi. Cara termudah untuk tidak terpaksa mengambil keputusan artifisial adalah sekalian keluar dari lingkungan komputer dan membangun makhluk-makhluk artifisial kita sebagai robot-

robot tiga dimensi, yang saling buru di dunia nyata tiga dimensi. Tapi lantas lebih murah bila kita sekalian saja mengamati hewan-hewan nyata di dunia nyata – yang membawa kita kembali ke titik awalnya! Tapi ini tidak sesembrono kelihatannya. Saya akan melanjutkan pembahasannya di bab lain. Sementara itu, ada sedikit hal lagi yang bisa kita lakukan di komputer, tetapi bukan dengan biomorf.

Salah satu penyebab utama biomorf tidak cocok untuk seleksi alam adalah karena biomorf dibangun dari piksel-piksel pijar pada layar dua dimensi. Dunia dua dimensi ini dalam banyak hal tidak dapat diaplikasikan pada fisika dunia nyata. Besaran-besaran seperti ketajaman gigi pemangsa dan kekuatan zirah tubuh pemangsa; besaran-besaran seperti kekuatan otot untuk kabur dari serangan pemangsa atau virulensi dari bisa tidak muncul secara alami di dunia piksel dua dimensi. Adakah contoh dunia nyata, misalnya, pemangsa dan mangsanya, yang dapat diaplikasikan, secara alami dan tanpa keartifisialan yang disengaja, pada simulasi di layar dua dimensi? Untungnya ada. Tadi saya sempat menyebut jaring laba-laba saat membahas perangkap desainoid. Laba-laba punya tubuh tiga dimensi dan hidup di dunia kompleks fisika normal seperti sebagian besar hewan lainnya. Tetapi, ada satu hal khusus dalam cara laba-laba berburu yang secara khas pas untuk disimulasikan pada lingkungan dua dimensi. Jaring bundar laba-laba yang biasa, bagaimana pun juga, adalah struktur dua dimensi. Serangga yang diperlukan bergerak di dimensi ketiga, tetapi pada momen kritisnya, ketika seekor serangga terperangkap atau berhasil lolos, peristiwa itu terjadi di satu bidang dua dimensi, bidang jaring laba-laba. Jaring laba-laba

adalah kandidat terbaik yang bisa saya bayangkan untuk simulasi menarik seleksi alam di layar komputer dua dimensi. Bab berikutnya dikhkususkan untuk mengisahkan cerita jaring laba-laba, diawali dengan sejarah alam jaring laba-laba sungguhan dan beranjak ke jaring tiruan komputer serta evolusinya dengan seleksi ‘alam’ di komputer.



## BAB 2

### BELENGGU SEHALUS SUTRA

CARA BAGUS UNTUK MENATA PEMAHAMAN KITA TENTANG makhluk hidup apa pun adalah dengan membayangkan, secara agak suka-suka hati, bahwa makhluk tersebut (atau, kalau Anda lebih suka, ‘perancang’ khayali dari makhluk tersebut) menghadapi serantai masalah atau tugas. Pertama, kita ketengahkan masalah awalnya, lalu kita pikirkan aneka solusi yang mungkin masuk akal. Kemudian, kita amati perilaku aktual makhluk-makhluk tersebut. Acap kali, hal tersebut membuat kita menyadari sebuah masalah baru yang dihadapi hewan-hewan semacam ini, dan rantai masalahnya pun berlanjut. Saya menerapkan metode ini di bab kedua *Pembuat Arloji yang Buta*, terhadap kelelawar dan teknik-teknik ekolokasinya yang canggih. Di sini, pada bab mengenai jaring laba-laba ini, saya akan menggunakan strategi yang sama. Perhatikan bahwa gerak maju perkembangan masalah yang menghadirkan masalah baru ini tidak terjadi di atas garis masa hidup seekor hewan. Kalau pun gerak maju itu berkaitan dengan waktu, jangka waktunya evolusioner. Namun, terkadang perkembangannya bukan temporal, melainkan logis.

Tugas besar kita adalah mencari cara efisien untuk menangkap serangga untuk dimakan. Salah satu kemungkinan solusinya adalah terbang cepat. Terbang seperti si mangsa itu sendiri. Terbang kencang sekali dengan mulut terbuka, sambil membidik jitu dengan mata yang jeli. Cara ini efektif untuk

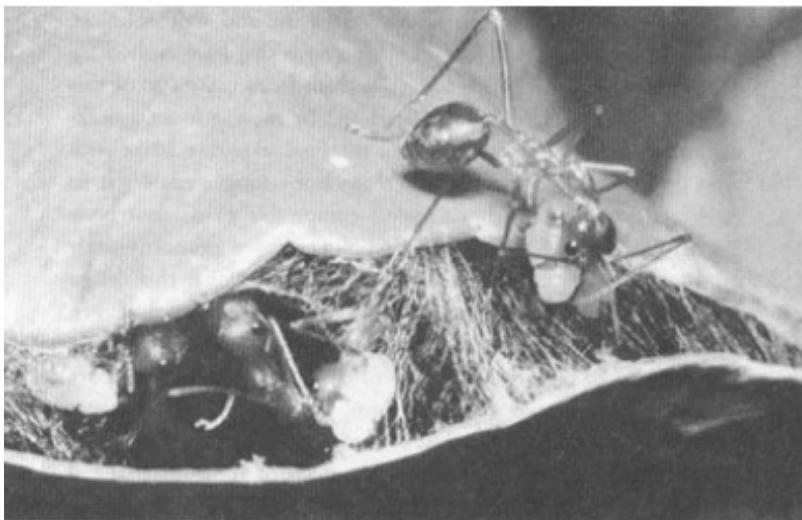
walet dan burung layang-layang, tetapi menelan ongkos mahal untuk perlengkapan terbang dengan kecepatan tinggi, manuver gesit, dan sistem kendali yang canggih. Demikian pula halnya dengan solusi si kelelawar, penerbang nokturnal yang menggunakan gema suara, bukan sinar cahaya, untuk mengendalikan misilnya.

Kemungkinan lain yang sama sekali berbeda adalah solusi ‘diam dan tunggu’. Belalang, bunglon, dan hewan-hewan kadal tertentu lainnya yang telah berevolusi secara mandiri dan konvergen untuk menyerupai bunglon menerapkan solusi ini dengan menyamarkan diri dan mengendap-endap lambat dan senyap hingga pukulan pemungkas dihantamkan dengan lengan atau lidah. Jangkauan lidah bunglon memampukannya untuk menangkap lalat di posisi mana pun dalam radius yang sebanding dengan panjang tubuhnya sendiri. Jangkauan lengan-lengan jepit belalang juga secara proporsional berada pada kisaran yang setara. Mungkin Anda berpikir rancangan ini bisa disempurnakan dengan memperpanjang radius tangkapannya lebih jauh lagi. Tetapi lidah dan lengan yang jauh lebih panjang dari panjang tubuh itu sendiri terlalu mahal untuk dibuat dan dirawat: lalat-lalat tambahan yang berhasil ditangkap tidak cukup untuk menutup biayanya. Adakah cara lebih murah untuk meluaskan ‘jangkauan’ atau radius tangkapannya?

Bagaimana kalau kita membangun jaring saja? Jaring harus dibuat dari bahan tertentu dan pasti ada harganya. Namun, lain dari lidah bunglon, bahan jaring tersebut tidak harus bergerak sehingga tidak perlu jaringan otot yang besar. Bisa berupa untaian tipis halus dan, karenanya, dengan biaya rendah, dapat dipintal untuk mencakup bidang yang jauh lebih

luas. Jika protein gemuk yang tadinya diserap untuk lengan atau lidah berotot itu diolah ulang menjadi benang sutra, panjangnya akan jauh melebihi jangkauan lidah seekor bunglon. Jaring tersebut pasti bisa menutup bidang yang luasnya 100 kali luas tubuh, tetapi tetap ekonomis dibuat dengan cairan yang dikeluarkan dari kelenjar-kelenjar kecil di tubuh itu.

Sutra adalah komoditas umum di antara artropoda (golongan besar di dalam kingdom animalia yang mencakup serangga dan laba-laba). Ulat-ulat bulu menambatkan dirinya ke sebatang pohon dengan seutas benang sutra. Semut rangrang menjahit dedaunan dengan benang sutra yang dikeluarkan oleh larva semut digendong dengan kedua capitnya bak puntalan (Gambar 2.1). Banyak ulat bulu membedung dirinya di kepompong sutra sebelum tumbuh menjadi hewan bersayap dewasa. Ulat tenda (*tent caterpillar*) membungkus pohon tempatnya bersarang dengan benang-benang halus. Seekor ulat sutra ternak meminta benang sutra yang hampir satu mil panjangnya ketika ia membangun kepompongnya. Tapi walaupun ulat sutra adalah fondasi industri sutra kita, sebetulnya laba-labalah yang merupakan empu pembuat sutra di kingdom animalia, dan memang mengherankan kalau sutra laba-laba tidak lebih banyak digunakan oleh manusia. Sutra laba-laba dipakai untuk membuat benang silang (*cross-hair*) presisi pada mikroskop. Dalam bukunya *Self-Made Man*, ahli zoologi dan seniman Jonathan Kingdon berspekulasi bahwa sutra laba-laba mungkin telah mengilhami anak-anak manusia untuk menciptakan salah satu produk teknologi terpenting kita: tali. Burung-burung pun mengenali kualitas-kualitas baik sutra laba-laba sebagai bahan: 165 spesies bu-



Gambar 2.1 Semut pekerja dengan sutra. Semut rangrang menggunakan larva sebagai puntalan hidup. *Oecophila smaragdina* dari Australia.

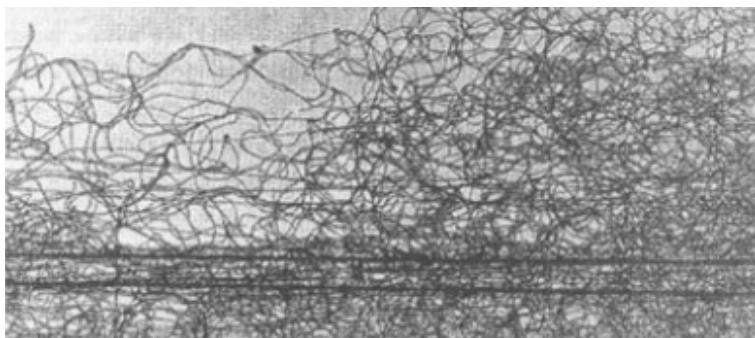
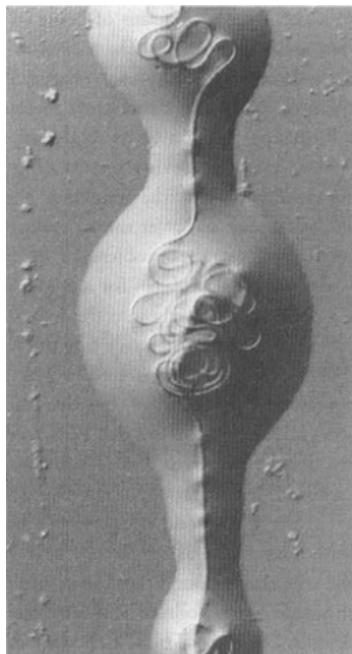
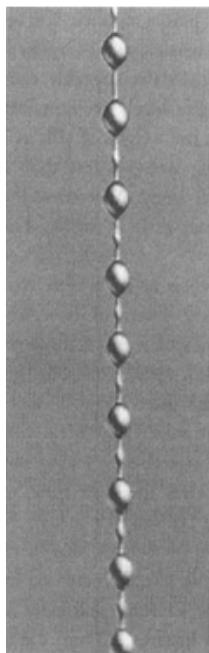
rung (tergolong ke dalam dua puluh tiga famili, yang menyiratkan bahwa teknik ini ditemukan berkali-kali secara mandiri) diketahui telah menggunakan sutra laba-laba sebagai salah satu bahan untuk membangun sarang-sarang mereka. Seekor laba-laba penenun bola, laba-laba kebun *Araneus diadematus*, mengeluarkan dari cerat-cerat di ujung belakang tubuhnya enam jenis sutra, yang dibuat di kelenjar-kelenjar terpisah di dalam perutnya. Jenis sutra yang disemburkannya pun gonta-ganti, sesuai tujuannya. Sutra telah digunakan laba-laba jauh sebelum hewan ini mengembangkan kemampuan untuk membangun jaring-jaring bola. Laba-laba peloncat pun, yang tidak pernah membangun jaring, meloncat ke udara dengan tali pengaman sutra tertambat, seperti pemanjat gunung yang terikat dengan tali ke pijakan aman terakhirnya.

Maka dari itu, benang sutra sudah tersedia sejak dulu kala di kotak perkakas laba-laba, dan pas sekali dipakai untuk menganyam jaring penangkap serangga. Jaring dapat kita bayangkan sebagai sarana untuk berada di banyak tempat sekaligus. Pada skalanya sendiri, laba-laba seperti burung layang-layang dengan nganga mulut paus. Atau seperti bunglon dengan lidah sepanjang lima puluh kaki. Jaring laba-laba luar biasa ekonomis. Jika lidah berotot bunglon barang tentu berat bila dibandingkan dengan bobot total tubuhnya, bobot sutra pada jaring laba-laba—yang panjangnya bisa hingga dua puluh meter untuk jaring yang besar—kurang dari seperseribu bobot tubuh laba-laba itu. Apalagi laba-laba mendaur ulang sutra dengan memakannya setelah digunakan sehingga sedikit sekali yang terbuang. Akan tetapi, teknologi jaring punya masalah-masalahnya sendiri.

Salah satu masalah takremeh bagi laba-laba di jaringnya adalah memastikan mangsa tidak lepas setelah terjerat. Ada dua bahayanya. Serangganya bisa dengan mudah mengoyak jaring dan menembusnya langsung. Masalah ini dapat dipecahkan dengan membuat sutranya sangat elastis, tetapi hal ini justru memperparah bahaya kedua: Serangganya memantul lepas dari jaring, seolah menyampuk trampolin saja. Sutra yang ideal, serat impian ilmuwan kimia, adalah sutra yang bisa meregang amat jauh untuk meredam tumbukan serangga yang terbang cepat; namun, untuk menghindari efek trampolin tadi, sekaligus mampu dengan lembut menyangga entak baliknya. Setidaknya beberapa jenis sutra laba-laba memiliki khazanah-khazanah ini, berkat struktur luar biasa rumit dari benang sutra itu sendiri, sebagaimana dijabarkan oleh Profesor Fritz Vollrath dan para

koleganya di Oxford, dan kini di Aarhus, Denmark. Benang sutra yang tampak diperbesar pada Gambar 2.2 dan 2.3 sebenarnya jauh lebih panjang dari kelihatannya karena sebagian besar panjangnya tergulung di dalam manik-manik renik yang berair. Seperti kalung yang manik-maniknya mengandung gulungan benang tambahan. Proses penggulungannya dilakukan dengan mekanisme yang belum dipahami sepenuhnya, tetapi hasilnya tidak diragukan. Benang-benang jaring tersebut mampu meregang hingga sepuluh kali panjang normalnya, dan tergulung balik dengan cukup perlahan sehingga mangsa tidak terpantul lepas dari jaring.

Ciri berikutnya yang dibutuhkan sutra agar mangsa tidak lepas adalah kerekatan. Zat yang melumuri sutra di dalam sistem gulungan yang tadi kita bicarakan tidak hanya berair, tetapi juga lengket. Sekali sentuh, serangga sulit lepas. Tetapi tidak semua laba-laba menghasilkan kerekatan dengan cara yang sama. Satu kelompok lain yang bernama laba-laba *cribellum* menghasilkan sutra berhelai jamak dari pistol sutra khusus yang disebut *cribellum*. Laba-laba lalu menyasak sutra berhelai jamak ini dengan melewatkannya melalui sisir khusus yang terpasang di tulang keringnya. Sutra berhelai jamak yang 'disasak' dengan cara ini menggumpal jadi belukar kusut (Gambar 2.4). Belitannya terlalu kecil untuk dilihat dengan mata telanjang, tetapi pas untuk membuat kaki-kaki serangga tersangkut. Benang-benang 'cribellum' sasakan ini juga rekat, seperti benang-benang lengket yang kita bahas tadi. Hanya saja, cara mencapai kerekatannya berbeda. Di satu sisi, laba-laba *cribellum* punya keuntungan. Benang-benang mereka tetap lengket untuk waktu yang lebih lama. Laba-laba



Gambar 2.2 Manik-manik renik di sepanjang benang sutra jaring laba-laba.

Gambar 2.3 Satu buah manik yang diperbesar untuk menunjukkan

gulungan benang di dalamnya, yang berfungsi sebagai 'mesin kerek'.

Gambar 2.4 Cara alternatif agar jaring bisa lengket: benang sasakan dari laba-laba *cribellum*.

yang melumuri jaringnya dengan lem harus membangun kembali jaring lekatnya dari nol setiap pagi. Memang—and hampir sulit dipercaya—pekerjaan itu beres dalam waktu kurang dari satu jam, tetapi menghadapi seleksi alam tiap menit sangat berharga.

Begini pun, benang-benang lengket kini menghadirkan sebuah masalah yang baru dan ironis. Entah dibalur lem entah disasak hingga kusut, benang-benang yang cukup lengket untuk menjerat serangga justru jadi sulit untuk dijalani laba-laba betina itu sendiri. Laba-laba tidak punya kekebalan ajaib, tetapi teknologi evolusi telah memunculkan ramuan solusi-solusi parsial untuk ancaman ‘gol bunuh diri ini’. Tungkai laba-laba pengguna lem diurapi dengan minyak khusus yang melindunginya dari kerekatan itu. Hal ini telah didemonstrasikan dengan mencelupkan tungkai laba-laba di eter, yang meluruhkan baluran minyak, sekaligus proteksinya. Solusi parsial kedua yang diterapkan laba-laba adalah dengan membuat sebagian dari benangnya takrekat, yakni jari-jari utama yang mengitar ke arah luar dari pusat jaringnya. Laba-laba betina hanya mondar-mandir di atas jari-jari utama ini saja, dengan kaki-kaki khusus yang bercakar kecil di ujungnya untuk mencengkeram benang-benang halus itu. (Laba-laba jantan juga membangun jaring. Untuk penjelasan atas bahasa seksis saya ini, lihat hal. 64.) Dihindarinya putaran lengket yang berkeluk-keluk di atas perancah yang dibuat dengan jari-jari itu. Mudah melakukannya karena dia biasanya diam dan menunggu di poros jaringnya, jadi jarak terdekat ke titik mana pun pada jaring hanya sependek satu jari-jari saja.

Sekarang, mari kita lihat serangkaian masalah yang dihadapi seekor laba-laba dalam membangun jaringnya. Tidak semua

laba-laba sama dan, pada segi-segi pentingnya, laba-laba kebun *Araneus diadematus*\* akan saya pakai sebagai perwakilannya. Masalah awal yang kita – maksudnya, laba-laba – hadapi adalah cara menambatkan benang pertama di sepanjang jarak senjang, misalnya di antara pohon dan karang, pada lokasi pembangunan jaring. Begitu benang penting pertama telah membentangi jarak tersebut, laba-laba bisa menggunakan sebagian benangnya sebagai jembatan. Tetapi bagaimana cara membangun jembatan pertamanya? Cara bodohnya adalah dengan berjalan turun dari pohon dan naik ke karang, sambil menyeret benang. Laba-laba kadang melakukannya, tapi masa tak ada solusi yang lebih imajinatif untuk masalah ini? Coba kita main layang-layang. Bukanakah kita bisa memanfaatkan sifat ringan dan melayang dari benang sutra itu sendiri? Benar. Berikut ini cara laba-laba melakukannya bila sedang mendapat angin. Dia mengulur seutas benang yang di ujungnya terdapat layar atau layang-layang sutra kecil yang gepeng. Layar ini menangkap angin dan mengambang. Layang-layangnya lengket dan, jika kebetulan mendarat di atas permukaan keras di seberang sana, dia akan menempel. Jika layang-layang gagal mendarat, laba-laba menariknya lagi, mendarur ulang sutra berharga dengan memakannya, dan mencoba lagi dengan layang-layang baru. Lama-kelamaan sebuah titian yang bisa dilewati telah terbentang dan laba-laba mengencangkan benang di ujungnya dengan melekatkannya. Jembatan kini siap diseberangi.

Jembatan pertama ini kemungkinan belum tegang karena panjang benangnya, ya, seadanya: tidak diukur khusus untuk rentang tersebut. Laba-laba bisa memperpendeknya untuk dijadikan salah satu tepi jaring; atau menariknya ke bawah

membentuk V untuk dijadikan dua jari-jari utama jaring. Masalahnya di sini: Walau benang bisa ditarik ke bawah membentuk V, V-nya kemungkinan besar kurang dalam untuk dijadikan dua jari-jari yang sama panjang. Solusi laba-laba untuk masalah ini adalah dengan tidak mengubah jembatan itu sendiri tetapi memakainya sebagai penopang sembari menggantinya dengan benang baru yang lebih panjang. Berikut ini cara laba-laba melakukannya. Berdiri di satu ujung jembatan, dia mengulur benang baru dari ujung belakang tubuhnya, dan menambatkannya dengan kencang. Lalu, jembatan lama digigitnya hingga putus, sambil tetap memegang ujung yang dipotong itu dengan kakinya. Dia berjalan menyeberang, ditopang sisa-sisa dari jembatan putus di depan, dan oleh benang baru yang dibuatnya di belakang. Dia adalah mata rantai hidup dari jembatannya sendiri, yang bergerak perlahan tapi pasti menyeberangi rentangnya. Untuk bagian jembatan awal yang telah diseberangnya itu, karena sudah purnatugas, dia pun memakannya. Dengan cara yang memukau ini (memakan jembatan lama sambil meniti jalan dan membuat jembatan baru di belakang), dia menyeberang dari ujung yang satu ke yang lain. Selain itu, ujung belakang laba-laba itu menyemprotkan sutra lebih kencang dari kecepatan mulut yang memakannya. Jadi, jembatan baru itu dibuat, dengan pengawasan yang teliti, lebih panjang dari jembatan lama. Kini terpasang kencang di kedua ujungnya, benang itu melengkung ke bawah dengan jarak yang pas untuk ditarik membentuk V dan dijadikan pusat jaringnya.

Untuk itu, laba-laba bergeser balik ke tengah-tengah jembatan baru dan dengan bobot tubuhnya menarik jembatan itu dari lengkung kendur ke bentuk V kencang. Kedua lengan V-nya

sempurna untuk dijadikan dua jari-jari utama jaringnya. Jari-jari mana yang perlu dibuat berikutnya sudah jelas. Tentu baik kalau laba-laba turun tegak lurus dari titik V demi mengamankan pusat jaring dari bawah dan menjaga agar V-nya tetap kencang sekalipun tanpa bobot laba-laba itu di ujungnya. Laba-laba mengikat benang baru ke ujung runcing V, dan turun layaknya bandul pemberat ke tanah, atau permukaan lain yang sesuai, tempatnya menambatkan benang vertikal itu. Tiga jari-jari utama jaring kini sudah terpasang kencang, dan tampak seperti Y.

Dua tugas berikutnya adalah menempatkan jari-jari lain dalam posisi melingkar ke arah luar dari pusat jaring, dan bingkai luar di sekeliling tepinya. Laba-laba kerap bisa dengan lihai memadukan keduanya sekaligus, menggunakan teknik-teknik pintar yang memukau untuk menangani dua atau bahkan tiga utas benang, yang kemudian diseret terpisah saat dia berjalan di sepanjang jari-jari yang ada. Di naskah awal bab ini, saya menjelaskan seperti apa persisnya sihir ajaib ini dilakukan, tetapi kepala saya sampai pusing dibuatnya. Waktu salah seorang editor saya mengeluh kepalanya pusing saat membacanya, walau agak terpaksa, saya mau membataalkan teksnya. Hasil dari tahap kerja laba-laba ini adalah roda dengan dua puluh lima atau tiga puluh jari-jari (jumlahnya berbeda-beda tergantung spesiesnya, dan tergantung individu laba-labanya), dan kerangka dasar jaring pun terpasang. Namun, seperti roda sepeda, jaring itu masih memiliki banyak ruang kosong yang bisa dilalui lalat. Sekalipun membentur salah satu utas benangnya, lalat tidak akan terjerat karena benang itu tidak lengket. Yang dibutuhkan sekarang adalah beruntai-untai benang yang dipasang melintangi jari-jari

radialnya. Ada beragam cara untuk memasangnya. Contohnya, laba-laba bisa mengisi tiap jarak senjang di antara jari-jari secara bergiliran, berjalan zig-zag dari satu sisi ke sisi lain sembari bergerak dari pusat ke arah tepi, lalu berbalik dan mengisi jarak senjang berikutnya, dan seterusnya. Tapi itu berarti laba-laba akan banyak gonta-ganti arah, dan itu berarti banyak tenaga dan waktu terbuang. Solusi yang lebih baik adalah berjalan memutar mengelilingi jaring, dan inilah yang dilakukan sebagian besar laba-laba, kendati kadang mereka juga berjalan balik lagi.

Begitu pun, entah berjalan zig-zag entah memutar, tetap ada permasalahan lainnya. Meletakkan benang lengket yang akan menjerat serangga adalah urusan presisi. Penjarakan jalanya harus benar-benar tepat. Sambungan-sambungan dengan jari-jari radialnya harus diposisikan dengan tangkas sehingga jari-jari tidak tertarik kacau, meninggalkan lubang-lubang yang bisa dilalui mangsa. Jika laba-laba mencoba mencapai pemosian yang pelik ini sembari menyeimbangkan diri di atas jari-jari saja, bobotnya kemungkinan akan menarik jari-jari itu keluar dari posisi yang benar, dan benang spiral lengketnya akan tersambung di titik yang salah dengan kekencangan yang keliru. Lebih lagi, di dekat tepi luar jaringnya, jarak senjang di antara jari-jari acap kali terlalu lebar untuk dapat dikangkangi kaki-kaki laba-laba. Tapi masalah-masalah ini mungkin dapat ditekan dengan mengawali pemasangan benang spiralnya dari pusat ke luar. Di dekat pusat jaring, jarak-jarak senjangnya kecil, dan jari-jarinya tidak rentan terdistorsi oleh bobot tubuh laba-laba karena saling menopang dengan padu. Saat laba-laba memutar ke arah luar, jarak-jarak senjang di antara jari-jari lantas melebar. Meskipun

begitu, saat tiap lingkar ditempatkan, lingkar dalam yang sudah dipasang dapat menjadi topangan penyambung di antara jarak-jarak senjang yang melebar itu. Namun, susahnya cara ini adalah bahwa tipe benang yang baik untuk menangkap serangga adalah yang sangat tipis dan elastis. Sehingga kurang kuat untuk dijadikan topangan. Saat semua lingkar akhirnya terpasang, jaring laba-laba itu lumayan kuat, tetapi, selama proses konstruksinya, jaring itu belum lengkap dan, karenanya, lemah.

Inilah masalah utama pemasangan lingkar penangkap yang tipis, tetapi itu bukan satu-satunya masalah. Ingat bahwa, walau jari-jarinya tidak lengket dan relatif ramah terhadap kaki-kaki laba-laba, sekarang kita sudah membahas sutra lengket yang secara khusus dirancang untuk menjerat mangsa. Sudah kita lihat bahwa laba-laba tidak sepenuhnya kebal terhadap kerekatan jaringnya sendiri. Sekalipun kebal, bila tiap lingkar dipakai sebagai jembatan sembari membangun lingkar berikutnya, kadar kerekatan lingkar tersebut pasti berkurang. Jadi, membangun lingkar lengket dari pusat jaring ke arah luar sambil berjalan di atas lingkar sebelumnya memang tampak seperti cara yang rapi, tetapi tetap ada tapinya.

Laba-laba mampu mengatasi kesulitan-kesulitan ini. Solusinya solusi yang mungkin juga terpikirkan oleh seorang pekerja konstruksi: perancah sementara. Dia memang membangun lingkarnya dari pusat ke arah luar. Tetapi lingkar itu bukan lingkar penjerat yang lengket, melainkan lingkar ‘pembantu’ sekali pakai, yang membantunya membangun lingkar lengket setelah itu. Lingkar pembantu ini tidak lengket, dan dipasang lebih jarang-jarang dari lingkar lengket versi final. Tidak

ampuh menangkap serangga, tetapi lebih kuat dari lingkar lengket yang dibuat kemudian. Karenanya jaring menjadi kencang dan kokoh; aman pula langkah laba-laba di antara semua jari-jari ketika tiba waktunya untuk membangun lingkar lengket yang asli. Laba-laba hanya butuh tujuh atau delapan kali keliling untuk memasang lingkar pembantu dari pusat ke tepi. Setelah tuntas, laba-laba menyumbat semua kelenjar sutra taklengketnya dan membuka meriam-meriam besarnya: moncong-moncong khusus yang hanya menyemburkan sutra lengket dan mematikan. Dia meniti balik langkah-langkah melingkarnya dari tepi ke pusat, sambil memasang benang dengan jarak yang lebih sempit dan seragam dari pemasangan ke arah tepi tadi. Lingkar pembantu sementara itu digunakan tahap demi tahap: tuntas satu tahap lalu lanjut ke tahap berikutnya. Saat tiap jari-jari diseberangi, lingkar baru yang halus dan lengket disambung dengan teliti ke sana, seringnya dengan bentuk sambungan apik, yang mengingatkan kita pada kawat kandang ayam atau jala nelayan. Omong-omong, sutra perancah sementara itu bukan sepah untuk dibuang, karena penggalan-penggalannya tetap menempel di jari-jari dan dimakan nanti, beserta seluruh bagian lainnya saat jaring akhirnya dibongkar. Laba-laba tidak langsung memakan sutra perancah, agaknya karena akan makan waktu untuk melepas penggalan-penggalan itu dari jari-jari.

Saat laba-laba tiba di pusat dalam perjalanan kembalinya itu, jaring tersebut belum lagi tuntas. Ketegangannya masih perlu diatur: disetel dengan pandai dan presisi seperti menyetem alat musik berdawai. Dia berdiri di pusat jaring dan menarik-narik pelan dengan kakinya untuk mengira-ngira ketegangannya, menambah atau mengurangi panjang benang

bila perlu, lalu berbalik dan mengulangi manuver itu dari sudut yang lain. Beberapa laba-laba membuat sulaman rumit di sekitar pusat jaring, yang dapat digunakan untuk menyetel ketegangan jaringnya.

Omong-omong soal instrumen berdawai, saya akan melantur dahulu ke laba-laba jantan. Sejauh ini, tokoh utama cerita kita laba-laba betina, tetapi bukan karena laba-laba jantan tidak membangun jaring (laba-laba jantan, dan bahkan laba-laba anakan yang baru lahir, bisa membangun jaring kecil), melainkan karena laba-laba betina lebih besar dan menonjol. Padukan ukuran betina yang lebih besar dengan fakta bahwa laba-laba, terlepas dari usia dan jenis kelaminnya, cenderung memakan segala yang bergerak dan lebih kecil dari mereka, maka muncullah masalah bagi si jantan. Laba-laba adalah makanan kumbang, semut, kaki seratus, kodok, kadal, tikus, dan banyak jenis burung. Ada beberapa kelompok tawon yang secara khusus menangkap dan menjadikan laba-laba makanan larva mereka. Tapi mungkin pemangsa terpenting laba-laba adalah laba-laba lain, dan hewan ini memang tidak membeda-bedakan spesies. Laba-laba mana pun, bila bertandang ke jaring laba-laba yang lebih besar, akan menghadapi bahaya maut yang harus dihadapi laba-laba jantan bila hendak kawin.

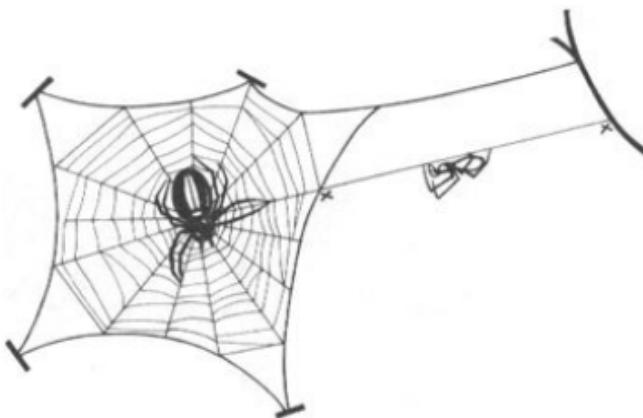
Bagaimana persisnya laba-laba jantan menangani masalah ini, berbeda-beda tergantung spesiesnya. Di beberapa contoh, laba-laba jantan membungkus seekor lalat dengan kemasan sutra dan mempersesembahkannya ke laba-laba betina. Dia menunggu hingga taring si betina terpendam aman di tubuh lalat itu, lalu mengawininya dengan alat seksualnya. Pejantan tanpa bingkisan bisa mati dimakan. Di lain pihak, pejantan terkadang mengecoh betinanya dengan bingkisan kosong,

atau merampas makanan itu dari rahang si betina dan kabur setelah kawin, mungkin untuk dipersembahkan ke betina yang lain. Pada spesies-spesies lain, siasatnya mengandalkan kondisi bahwa, tidak lama setelah berganti kulit dan sebelum cangkang barunya mengeras, laba-laba betina, bisa dibilang, tidak berdaya. Bila hal itu terjadi, laba-laba jantan mendapat angin. Dan di beberapa spesies, sanggama hanya terjadi tepat setelah laba-laba betina berganti kulit dan bersikap lunak dan patuh, atau setidaknya tak bisa angkat senjata.

Spesies-spesies lain menggunakan sebuah teknik yang lebih menarik, teknik yang memicu cerita sampingan saya ini. Laba-laba menghuni dunia tegangan halus. Benang-benang sutra ibarat tungkai tambahan, antena jelajah, hampir seperti mata dan telinga. Peristiwa dicerap melalui bahasa pengencangan dan pengenduran, peregangan dan pelemasan, pergeseran pada neraca-neraca ketegangan. Dawai-dawai hati laba-laba betina terbuat dari sutra yang tegang dan disetem dengan baik. Jika seekor pejantan ingin memukaunya dan terhindar dari, atau setidaknya menunda, risiko dimakan, dia baiknya memainkan dawai-dawai tersebut. Alasannya jelas: keselamatan nyawa sendiri. Di beberapa contoh, pejantan menempatkan diri tepat di tepi jaring laba-laba betina dan memetik jaring bak orang memetik harpa (Gambar 2.5). Dentingan berirama ini sudah pasti bukan dari serangga mangsa, dan bunyinya tampak menenteramkan laba-laba betina. Di banyak spesies, pejantan melebarkan jaraknya dari jaring laba-laba betina dengan menambatkan diri ke ‘benang kawin’ khususnya sendiri. Dia memetik benang khusus ini, seperti pemain jazz dengan bas *tea-chest* satu senar. Getarannya disalurkan di sepanjang benang kawin dan

bergaung di sekitar jaring laba-laba betina. Getaran tersebut meredam, atau menunda, nafsunya untuk makan, dan memancingnya untuk berjalan keluar, meniti benang kawin itu, ke sumber dentingan, tempat sanggama terjadi. Akhir ceritanya tidak selalu bahagia bagi tubuh fana si jantan, tetapi gen-gen abadinya kini tersimpan aman di dalam tubuh si betina. Dunia kita punya banyak laba-laba yang leluhur jantannya mati setelah kawin. Tetapi dunia kita hampa dari laba-laba yang bakal leluhurnya tak pernah kawin.

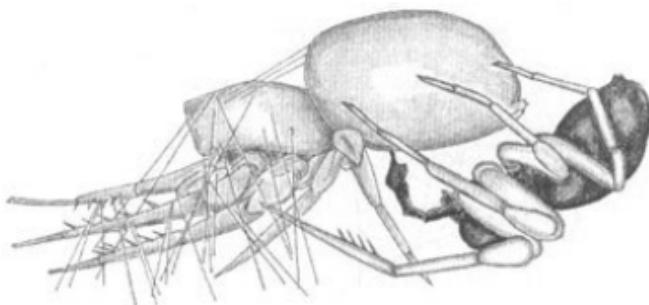
Sebelum beralih dari pembahasan soal seks dan sutra ini, coba tafsirkan sendiri cerita berikut. Ada spesies-spesies laba-laba yang pejantannya mengikat si betina dengan tali sutra – persis seperti para liliput mengikat Gulliver – sebelum mengawininya (Gambar 2.6). Orang mungkin mengira bahwa dia mengambil



Gambar 2.5 Demi kau dan si buah hati: laba-laba jantan dengan benang kawin tertambat di jaring laba-laba betina.

keuntungan dari redamnya sesaat naluri si betina untuk menangkap mangsa oleh hasrat seksualnya, dan mengikatnya supaya dia bisa melarikan diri ketika nafsu makan si betina sudah kembali. Saya tuturkan cerita yang pernah saya dengar: Kenyataannya, setelah kawin, laba-laba betina mudah saja memutus semua ikatan itu dan berjalan lagi sendiri. Mungkin belenggu ritual ini merupakan sisa-sisa simbolis dari aksi pembebatan purba yang sebenarnya. Atau mungkin si betina dihambat cukup lama semata-mata agar si jantan bisa mencuri *start* untuk kabur. Lagi pula, mana mau laba-laba jantan mengikat betinanya selamanya: Laba-laba betina harus bebas sehingga bisa bertelur; kalau tidak, dari perspektif genetika, semua upaya menantang bahaya ini sia-sia belaka.

Kita kembali ke topik utama: jaring laba-laba bundar dan cara membangun serta menggunakannya. Diskusi kita tadi terhenti saat laba-laba pembangun jaring berada di pusat jaringnya pada akhir proses konstruksi, dan kita sempat membahas caranya menyetel ketegangan benang. Melanjutkan daftar masalah dan solusi kita, jala yang cukup halus untuk menang-



Gambar 2.6 Laba-laba jantan mengikat betina bongsorinya dengan benang.

kap serangga terlalu halus untuk dilewati laba-laba dari satu sisi jaring ke sisi lainnya. Jalan panjang memutar ke tepi jaring acap kali dihindari dengan gawai sederhana bernama 'zona bebas'. Biasanya berupa lingkar di sekitar pusat jaring, yang sengaja tidak dipasangi benang spiral lengket. Pada beberapa spesies, contohnya spesies dari genus *Zygiella*, ada segmen jari-jari yang dibiarkan kosong pada jaringnya. Walaupun saya mengenalkan lubang ini seolah ia merupakan penghantar dari satu sisi jaring ke sisi yang lain, perannya untuk tujuan ini mungkin tidak sepenting yang Anda duga karena *Zygiella* tidak diam di pusat jaring seperti kebanyakan laba-laba lainnya. Dia berjaga di tempat persembunyian di luar jaring, untuk alasan yang membawa kita ke masalah laba-laba berikutnya.

Seperti telah kita lihat, laba-laba tidak kebal terhadap risiko dimakan, misalnya oleh burung. Kecuali dalam kondisi sudut cahaya tertentu, atau saat dihinggapi embun, jaring laba-laba agak sulit dilihat saking halusnya. Biasanya, ciri paling kentara dari jaring laba-laba adalah si pembangun jaring itu sendiri, yang siaga sempurna di tengah-tengahnya. Bertubuh bongsor dan mencolok di mata burung-burung, wajar bila laba-laba menunggu di luar jaringnya. Di lain pihak, gaya berburu laba-laba memang duduk diam dan menunggu mangsa untuk waktu yang lama, dan pusat jaring adalah pos tunggu yang logis karena merupakan titik simpang dari semua ruas jalan sutra yang tidak lengket. Dilema seperti ini menuntut kompromi, dan beda spesies beda pula cara komprominya. Laba-laba *Zygiella* betina boleh jadi menunggu di luar area jaring, tetapi dia tak pernah jauh dari pusatnya. Dia tetap terhubung dengan benang isyarat khusus yang direntangkan dari pos persembunyian ke titik tengah jaringnya. Benang

isyarat ini tegang, dan langsung menghantarkan getaran ke laba-laba yang menanti. Begitu ada tanda, dia bergegas meniti benang isyarat menuju pusat jaring, dan dari situ menyeberang melalui jari-jari arteri mana pun yang paling pintas membawanya ke target yang sudah terjerat. Benang isyarat ini terletak tepat di tengah-tengah segmen kosong yang saya sebutkan tadi. Untuk membuka kembali soalan tentang alasan segmennya dibiarkan kosong, mungkin karena, kalau ada tangga benang-benang lengket, laju larinya ke pusat jaring akan terhambat. Mungkin juga benang isyaratnya jadi kurang efisien menghantarkan getaran jika dilemahkan dengan kawat-kawat lintang.

Menunggu di luar jaring adalah kompromi yang dipilih oleh *Zygiella*, yang tentu saja membuat kecepatannya untuk menerkam sasaran sedikit lebih lambat dari yang semestinya saat mangsa bergulat dengan jerat sutranya (kalau Anda ingin tahu alasan pentingnya kecepatan, tak lama lagi kita akan membahasnya). Kompromi lainnya adalah duduk diam di pusat jaring, sekaligus mencoba sebisa mungkin tak tampak kentara. Laba-laba kerap membuat tikar sutra tebal di pusat jaring, yang di baliknya dia bisa bersembunyi atau di depannya dia bisa menyamarkan diri. Sebagian jaring dipasangi garis(-garis) sutra ekstra tebal yang disusun zig-zag dan mungkin bisa mengalihkan perhatian dari laba-laba itu sendiri, saat dia mengintai di tengah-tengahnya (tetapi, ada prasaran bahwa garis-garis tersebut sebetulnya bagian dari perangkat laba-laba untuk menyetel ketegangan benang di jaringnya). Sebagian laba-laba membangun hiasan-hiasan sutra tambahan di jaringnya. Hiasan-hiasan ini tampak agak mirip 'laba-laba tiruan' dan ada prasaran bahwa fungsinya adalah

menghindari catukan burung. Akan tetapi, ada pula yang menyarankan bahwa cara kerjanya jauh berbeda. Hiasan-hiasan itu memantulkan cahaya ultraviolet (yang tak terlihat oleh kita) sedemikian rupa hingga, di mata serangga, yang tampak adalah perca-perca langit biru atau, dengan kata lain, lubang.

Saya tadi menyebutkan bahwa laba-laba mesti bergegas ke TKP segera setelah seekor serangga terjerat di jaringnya. Buat apa repot-repot? Kenapa tidak menunggu saja sampai serangga itu lemas sendiri? Jawabannya adalah karena rontaan serangga kerap efektif. Kadang-kadang mangsa berhasil melepaskan diri, khususnya serangga besar dan kuat seperti tawon. Dan sekalipun mangsa tidak lepas, rontaannya bisa merusak jaring. Cara mencegah serangga meronta setelah terjerat adalah masalah laba-laba kita yang berikutnya.

Solusinya sederhana, dan brutal. Dengan panduan getaran dari rontaan mangsa, bergegaslah ke lokasi dan gigit dia hingga mati. Kalau rontaannya berhenti sejenak saat lokasi masih dicari, coba deteksi dengan memetik benang-benang radialnya dan merasakan, dari ketegangan benang-benang itu, mana yang tertindih bobot si mangsa. Begitu tiba di lokasi, terkam, gumul, dan coba suntikkan bisa saraf yang mematikan atau melumpuhkan. Kebanyakan laba-laba memiliki taring yang tajam dan kopong dengan kelenjar-kelenjar bisa (segelintir laba-laba, seperti *black widow* yang tersohor itu, berbahaya bagi manusia, tetapi mayoritas laba-laba biasa tak bisa menembus kulit manusia dan, sekalipun bisa, bisanya tak cukup untuk mencelakai hewan besar). Setelah taring berbisa dibenamkan ke tubuh si mangsa, laba-laba biasanya menahan

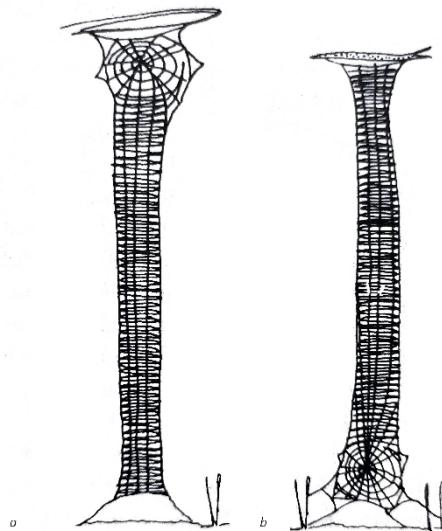
tubuh mangsa itu selama beberapa menit, menunggu hingga rontaannya berhenti.

Gigitan berbisa saya uraikan sebagai cara dasar untuk mematikemasukan korban yang meronta, tetapi itu bukan satu-satunya cara. Rata-rata cara lainnya – sudah bisa kita duga – tetap melibatkan sutra. Sebelum menggigit pun, kebanyakan laba-laba membelit mangsa dengan benang sutra ekstra untuk menambah sutra jaring yang sudah menjerat semua tungkai dan tubuhnya. Jika mangsanya berbahaya, misalnya tawon, laba-laba biasanya membebantnya dengan sutra, membedungnya rapat-rapat, lalu terakhir menusuk kafan putih itu dengan taringnya untuk menyuntikkan bisa pencabut nyawa.

Kupu-kupu dan ngengat, dengan sayap-sayap mereka yang besar dan bersisik, adalah masalah tersendiri. Sisik-sisiknya mudah terkelupas. Jika kita memegang ngengat, jari-jari kita tampak berdebu. Debu itu adalah bubuk halus yang terbuat dari sisik. Tumpahan debu ini membantu ngengat melepaskan diri dari jaring laba-laba karena pembubukan tampak menetralkan kerekatan benang-benangnya. Saat berada dalam bahaya, ngengat biasanya melipat sayapnya dan jatuh ke tanah. Entah karena alasan ini atau memang karena sayap-sayapnya masih tersangkut sebagian sehingga tidak bisa terbang, bila ngengat lepas dari jaring laba-laba, dia acap kali melakukannya dengan jatuh. Hal ini membuka peluang baru bagi laba-laba, peluang yang sudah direngkuhnya.

Michael Robinson, kini menjabat Direktur Kebun Binatang Nasional di Washington, dan istrinya Barbara, menemukan jaring laba-laba yang istimewa di Papua Nugini (Gambar 2.7a).

Gambar 2.7 Jaring bertangga, hasil evolusi yang terjadi secara terpisah: (a) dari Papua Nugini, (b) dari Kolombia.



Jaring bertangga di Papua Nugini pada dasarnya merupakan jaring bola biasa, tetapi dengan sisi bawah yang ditarik tegak lurus hingga sekitar 91,5 cm panjangnya. Laba-laba duduk di pusat jaring di dekat bagian paling atas. Saat ngengat menabrak jaring bola, kemungkinan besar dia akan terjun bebas. Tetapi laba-laba tangga Papua Nugini membuat jaring panjang ke bawah untuk menampung ngengat yang terguling jatuh. Makin jauh ngengat terguling di tangga, makin berkurang bubuk sisiknya dan makin besar kemungkinan dia tertahan cukup lama sehingga laba-laba dapat berpacu turun dan melesakkan gigitan mautnya. Tak lama setelah penemuan duet Robinson di Papua Nugini, kolega mereka William Eberhard menemukan padanannya di benua Amerika, (Gambar 2.7b) tepatnya di Kolombia. Bahwa jaring tangga ini diciptakan secara terpisah dari jaring tangga Papua Nugini

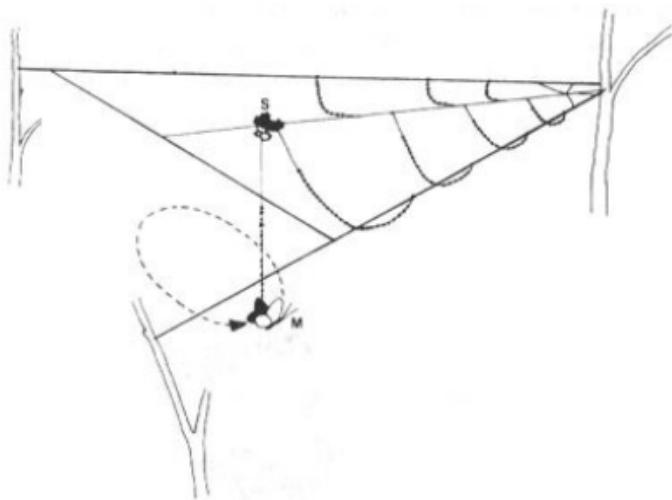
tampak pada perbedaan detailnya: pusat jaring yang berada di ujung bawah tangga, bukan di atas. Namun, cara kerjanya sama dan, tampaknya, untuk alasan yang sama pula: kedua spesies ini memang pemakan ngengat.

Maka, jaring tangga adalah satu solusi untuk masalah cara menghambat mangsa yang mencoba kabur, cara yang secara khusus ampuh terhadap ngengat. Teknik lain yang digunakan beberapa spesies laba-laba adalah jerat berpegas. Jaring laba-laba *Hyptiotes* tidak berbentuk bola sempurna, tetapi segitiga dengan empat jari-jari saja. Ada tali tambahan yang melekat ke sudut segitiga itu dan menjaga ketegangan struktur jaringnya. Namun, tali penopang utama ini, alih-alih tertambat langsung ke permukaan keras, justru dipegang oleh laba-labanya sendiri. Dialah yang menjadi sambungan di antara tali utama dan permukaan keras. Dia menarik tegang tali itu dengan kaki-kaki depan dan menggunakan sepasang kaki ketiganya untuk memegang segulung tali kendur. Dia diam siaga dalam posisi gantung yang berbahaya ini dan menunggu. Bila ada serangga yang menabrak jaringnya, laba-laba langsung bereaksi. Dia melepas pegas jeratnya, yang menyebabkan jaring ambrol sekaligus melontarkannya ke arah mangsa. Jika belum mempan, dia bisa mengambrolkan jeratnya dua atau tiga tahap lebih jauh dengan menyemprotkan sutra tambahan di belakang. Serangga mangsa kini terbelit tak berdaya di jaring yang ambrol. Laba-laba membungkus korbannya dengan balutan sutra tebal dan membawanya. Barulah dia akhirnya menggigit makhluk malang itu, menyuntikkan cairan pencerna, dan perlahan-lahan menyedot jasadnya yang sudah mencair melalui dinding

utra itu. Jaring segitiga itu kini sudah tidak dapat digunakan lagi dan harus dibangun ulang dari nol.

Mungkin itulah cara laba-laba *Hyptiotes* memecahkan masalah ini: Jaring yang tegang, walau efektif menangkap serangga, tetapi ringkik menghadapi rontaan kuat dari si mangsa. Serangga yang terjerat benang-benang lengket lebih gampang lepas kalau benang-benang tersebut tegang. Lain cerita kalau benang-benangnya kendur: Tak ada yang bisa ditarik lepas dan tubuh pun terbenam sutra lengket lebih dalam. Seperti pesawat supersonik yang bentuk optimal sayapnya untuk lepas landas itu berbeda dari bentuk optimal untuk terbang cepat, ketegangan optimal jaring laba-laba untuk menangkap mangsa berbeda dari ketegangan optimal untuk menjaga mangsa itu tetap terjerat. Sebagian pesawat mengatasi masalah dua bentuk optimal ini dengan berkompromi: performa yang tak terlalu buruk untuk kedua tugas (lepas landas dan terbang cepat). Sebagian yang lain – pesawat tempur bersayap ayun – memaksimalkan keduanya dengan memvariasikan geometri sayap-sayapnya, meski dengan risiko mekanisme yang lebih rumit. *Hyptiotes* membangun jaring dengan ketegangan bervariasi.

Laba-laba jaring bola yang biasa tampaknya lebih memilih ketegangan yang paling ampuh untuk menangkap mangsa dan mengandalkan kecepatannya sendiri untuk lincah menjelajahi jaring dan bergumul hingga korban lemas sebelum lepas. Laba-laba lain tampaknya memilih solusi lain dan membangun jaring dengan benang-benang yang sengaja dikendurkan (Gambar 2.8). Laba-laba *Pasilobus* membangun jaring segitiga yang areanya dibagi dua dengan seutas benang. Jala jerat yang lengket diefisienkan menjadi beberapa benang yang melin-

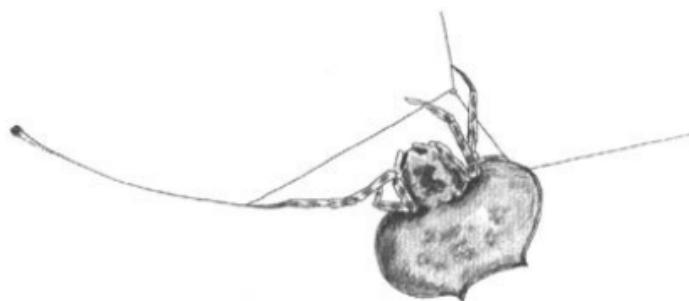


Gambar 2.8 Jaring laba-laba *Pasilobus* dengan benang-benang yang mudah putus.

tang kendur. Yang cerdik dari lintangan-lintangan benang ini – sebagaimana ditemukan dengan apik oleh Michael dan Barbara Robinson di Papua Nugini – adalah salah satu ujungnya yang sangat mudah lepas. Setelah menabrak dan menempel di salah satu utasnya, serangga seperti ngengat langsung membuat benang khusus itu putus di ujung yang satu, tetapi tetap menempel di ujung yang lain. Mangsa kini terbang berputar-putar bak pesawat mainan yang digantung dengan tali. Mudah saja bagi laba-laba untuk menarik tali itu dan menewaskan mangsanya. Keuntungan dari siasat ini mungkin adalah bahwa serangga tidak dapat meronta-ronta karena semuanya begitu longgar sehingga dia tidak bisa menyentak keras dan lepas. Atau, bisa juga, fungsi utama dari benang-benang yang mudah putus itu kembali ke konteks salah satu masalah kita tadi: cara meredam gaya tumbukan

serangga yang terbang cepat tanpa memantulkannya balik seperti trampolin. Pada kasus jaring segitiga yang pertama, boleh jadi segitiga *Pasilobus* adalah turunan yang lebih ringkas dari jaring bola yang sempurna. Kendati demikian, ada satu genus lain, *Poecilopachys*, yang juga menerapkan prinsip cepat-putus yang sama pada jaring bola yang sempurna. Kali ini, lain dari kebanyakan jaring bola, jaringnya mendatar, bukan tegak lurus.

Bila jaring segitiga laba-laba *Pasilobus* adalah versi efisien dari jaring bola laba-laba *Poecilopachys*, efisiensi (reduksi) yang paling ekstrem adalah utas benang laba-laba bola *Mastophora* (Gambar 2.9). Bolas adalah senjata yang awalnya diciptakan oleh masyarakat asli Amerika Selatan dan masih digunakan oleh para *gaucho* (koboi) untuk berburu, misalnya, *rhea*, burung besar takterbang di padang rumput Amerika. Senjata ini memiliki pemberat, seperti sepasang bola atau batu, pada ujung talinya. Bolas disambit ke arah mangsa dengan tujuan membelit kaki dan merobohkannya. Waktu masih muda, Charles Darwin bereksperimen dengan bolas sembari berkuda



Gambar 2.9 Laba-laba bolas

dan malah menangkap kudanya sendiri, membuat para *gaucho* tertawa geli dan, mungkin, kudanya sakit hati. Mangsa laba-laba bolas selalu ngengat jantan dari famili *Noctuidae*, dan ini ada alasannya. Ngengat *Noctuidae* betina memikat pejantannya dari kejauhan dengan mengeluarkan bau yang khas. Laba-laba bolas memancing ngengat-ngengat jantan untuk datang menjemput ajal dengan meracik bau yang amat serupa. 'Bolas' adalah bulatan berat pada ujung seutas benang sutra yang dipegang laba-laba dengan satu 'tangannya'. Dia mengayun-ayunkan bolas itu hingga membelit seekor ngengat, lalu menariknya. Pemberat ini lebih canggih dari kantong berisi batu milik para *gaucho*. Bulatannya terbuat dari gulungan ketat tali sutra yang disisipkan ke dalam setetes air, seperti manik-manik renik nan lengket pada jaring bola. Saat laba-laba menyambit bolasnya, gulungan sutra itu mengurai otomatis bak tali pancing saat kail dilempar. Jika ngengat terkena bolas, dia menempel dan terbang berputar-putar. Kelanjutan ceritanya sama dengan cerita laba-laba dengan benang-benang yang mudah putus tadi. Ngengat ditarik dan digigit. Laba-laba bolas hidup di Amerika Selatan, dan menarik membayangkan bahwa masyarakat asli di sana mungkin mendapat akal untuk merancang bolas mereka dengan mengamati aksi laba-laba ini.

Dari tadi kita melihat varian dan versi efisien dari jaring bola yang standar. Saatnya untuk kembali ke jaring bola itu sendiri. Di akhir bab sebelumnya, kita mengetengahkan pertanyaan tentang bagaimana model komputer seleksi buatan, seperti program biomorf, dapat diubah menjadi model seleksi alam – dengan alam yang buta, bukan mata manusia, sebagai pihak penyeleksinya. Kita sepakat bahwa kekurangan biomorf

adalah ketakterkaitannya dengan dunia fisik yang nyata, tempat untuk bertahan hidup dan berhasil atau gagal. Kita bisa membayangkan ada biomorf yang berperilaku layaknya pemangsa, mengejar-ngejar biomorf lain yang berperilaku layaknya mangsa. Namun, tampaknya tak ada cara alami dan tanpa rekayasa untuk memutuskan fitur-fitur biomorf mana yang akan menjadikan mereka pandai, atau tidak begitu pandai, menangkap mangsa atau meloloskan diri dari mangsa. Mata manusia dapat melihat sepasang taring berliur dan raku terpasang di salah satu ujung tubuh seekor biomorf (Gambar 1.16, hal. 42). Tetapi rahang yang menganga ini, seseram apa pun tampaknya dalam imajinasi kita, tidak dapat membuktikan keampuhannya karena tidak bergerak, tidak menghuni dunia fisik tempat ketajamannya bisa menembus cangkang atau kulit sungguhan. Taring dan kulit hanyalah pola-pola piksel pada layar pijar dua dimensi. Ketajaman dan ketangguhan, kerapuhan dan ke-berbisa-an – di layar komputer, makna besaran-besaran ini hanyalah makna-makna rekayasa yang didefinisikan dalam angka-angka manasuka oleh programer. Kita bisa dengan cepat membuat gim komputer yang mempertarungkan angka-angka, tetapi kemasan grafis dari angka-angka tersebut hanya untuk mempercantik saja. Kata *manasuka* dan *rekayasa* pun menyiratkan syarat yang tak terpenuhi. Pada titik inilah, di akhir bab sebelumnya, kita dengan rasa lega kembali ke jaring laba-laba. Ini ada benda alam yang dapat disimulasikan secara tak manasuka.

Di alam nyata, jaring bola menghadapi dua kondisi. Jika jalanya terlalu kasar, lalat bisa bebas melewatinya. Jika jalanya terlalu halus, laba-laba pesaing akan mencapai hasil yang hampir

sama dengan sutra yang lebih sedikit dan, karenanya, menghasilkan lebih banyak keturunan untuk meneruskan gen-gennya yang lebih pandai berhemat itu. Seleksi alam menemukan kompromi yang efisien. Jaring yang digambar di layar komputer memiliki sifat-sifat yang berhubungan, secara tidak manusuka, dengan lalat-lalat yang digambar di layar yang sama. Di layar komputer, ukuran jala adalah besaran yang benar-benar bermakna, dalam kaitannya dengan ukuran 'lalat' komputer. Jumlah total garis ('biaya sutra') adalah contoh besaran lain yang serupa. Rasio antara keduanya, yang menentukan efisiensi, dapat diukur dengan margin keartifisialan rekayasa yang cukup tipis. Beberapa prinsip fisika yang lebih rumit pun bisa diimpor ke dalam model komputernya, dan Fritz Vollrath (sumber informasi yang saya tuliskan di bab ini), bersama kolega fisikawannya Lorraine Lin dan Donald Edmonds, telah mengawali upaya ini dengan baik. Lebih mudah menyimulasikan 'kelenturan' dan 'ambang tekan putus' di 'sutra' komputer ketimbang menyimulasikan, misalnya, 'kelincahan' dalam 'berkelit' dari 'pemangsa' komputer, atau 'kewaspadaan' dalam 'mendeteksi'nya. Tetapi di bab ini kita akan lebih memperhatikan model-model perilaku membangun jaring itu sendiri.

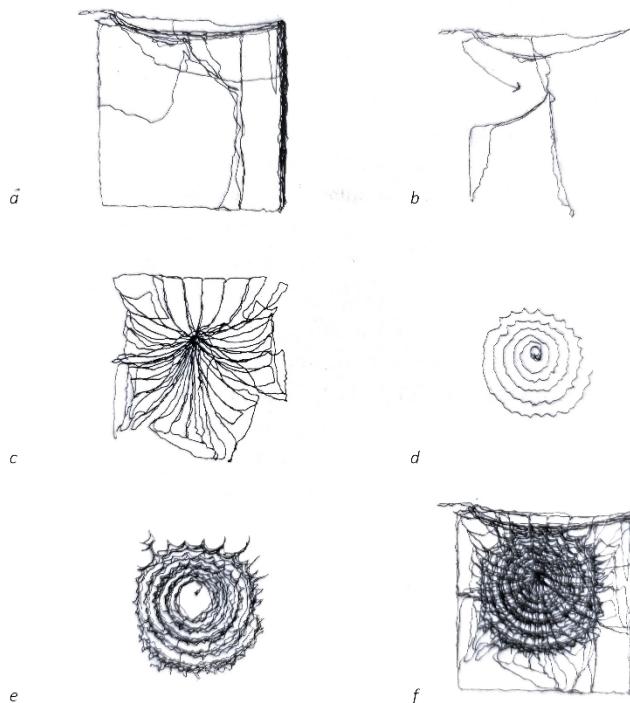
Dalam menulis aturan-aturan simulasi untuk laba-laba komputer, programer dibekali dengan banyak riset mendetail tentang aturan-aturan yang nyata diikuti laba-laba sungguhan, dan titik-titik keputusan yang berada di garis alir perilaku laba-laba. Profesor Vollrath dan para anggota tim peneliti laba-laba internasionalnya berada di garis depan riset ini dan, karenanya, mumpuni dalam mewujudkan pengetahuan tersebut ke dalam program komputer. Dan menulis program

komputer memang cara bagus untuk merangkum pengetahuan tentang aturan-aturan apa pun. Sam Zschokke adalah anggota tim yang telah merangkum, dalam format komputer, informasi deskriptif tentang gerakan-gerakan yang teramat dari laba-laba pembangun jaring. Programnya diberi nama 'Move Watch'. Peter Fuchs dan Thiemo Krink, meneruskan upaya Nick Gotts dan Alun ap Rhisiart, telah berkonsentrasi pada tugas terbalik pemrograman 'laba-laba komputer' yang menangkap 'alat komputer'. Program mereka bernama NetSpinner.

Gambar 2.10 adalah gambar Move Watch untuk pergerakan seekor laba-laba *Araneus diadematus* saat membangun jaringnya. Perhatikan bahwa, walau terkesan mirip, semuanya bukan gambar jaring, melainkan sebuah rangkaian dari deret maju gerakan seekor laba-laba, yang dibuat dengan merekam video laba-laba yang sedang membangun jaringnya. Posisinya pada saat-saat berurutan diumpulkan ke komputer dalam format sepasang koordinat kisi. Kemudian, komputer menggambar garis di antara posisi-posisi berurutan itu. Garis-garis 'lingkar lengket' (Gambar 2.10e), misalnya, merepresentasikan lintasan laba-laba saat membangun lingkar lengketnya. Garis-garis itu tidak merepresentasikan letak persis benang sutra. Jika ya, persebarannya akan lebih merata. Seperti tampak pada Gambar 2.10d, garis-garis tersebut terkonsentrasi dalam 'leuk-leuk', sesuai fakta bahwa laba-laba menggunakan lingkar pembantu sementaranya sebagai perancah untuk membangun lingkar lengketnya.

Diagram-diagram ini bukan representasi model-model perilaku laba-laba komputer, melainkan gambaran-gambaran

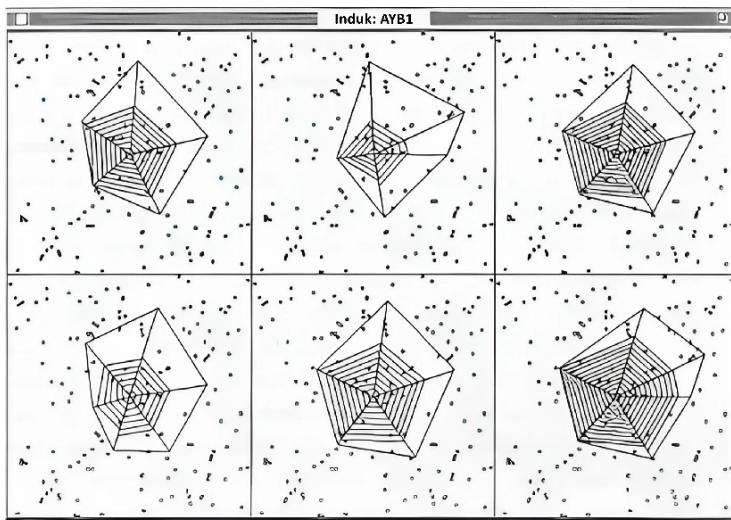
komputer atas perilaku laba-laba sungguhan. Sekarang kita lihat NetSpinner, program pelengkap yang berperilaku layaknya laba-laba khayali yang ideal. Program ini dapat dibuat berperilaku layaknya beragam macam laba-laba khayali mana pun. NetSpinner menyimulasikan perilaku laba-laba buatan, sama seperti cara program biomorf menyimulasikan



Gambar 2.10 Pelacakan komputer posisi laba-laba (*Araneus diadematus*) saat memintal jaring. Program Move Watch ditulis oleh Sam Zschokke: (a), (b) awalan; (c) radius; (d) lingkar pembantu; (e) lingkar lengket; (f) gabungan semua pergerakan.

anatomii makhluk-makhluk bak-serangga. NetSpinner membangun ‘jaring’ di layar komputer, menggunakan aturan-aturan perilaku yang perinciannya bervariasi karena pengaruh ‘gen-gen’. Seperti pada biomorf, gen-gen ini hanyalah angka-angka di memori komputer, dan diteruskan dari generasi ke generasi. Dalam tiap generasi, gen-gen mempengaruhi ‘perilaku’ laba-laba buatan dan, maka dari itu, bentuk ‘jaring’nya. Contohnya, satu gen mengendalikan sudut di antara jari-jari radial: Mutasi pada gen ini akan mengubah jumlah jari-jari, dengan menyesuaikan secara numerik aturan keperilakuan laba-laba komputer. Seperti pada program biomorf, gen-gen diizinkan untuk mengubah sedikit nilai-nilainya, secara acak, dari generasi ke generasi. Mutasi-mutasi ini mewujud sebagai perubahan bentuk jaring dan, karenanya, dapat diseleksi.

Keenam jaring pada Gambar 2.11 dapat dibayangkan seolah-olah biomorf (abaikan sejenak bintik-bintiknya). Jaring di kiri atas adalah induknya. Kelima jaring lainnya adalah keturunan mutannya. Tentu saja, di kehidupan nyata, jaring tidak melahirkan jaring; laba-labalah (yang membangun jaring) yang melahirkan laba-laba (yang membangun jaring). Tapi sebenarnya ada hal penting pada perkataan saya tentang jaring laba-laba tadi yang juga berlaku pada tubuh makhluk hidup. Gen-gen (yang membangun induk manusia) memunculkan gen-gen (yang membangun anak manusia). Pada model komputer, gen-gen yang membangun jaring induk di kiri atas (melalui pengaruhnya terhadap perilaku laba-laba buatan yang tidak kita lihat di layar) adalah gen-gen yang dimutasi untuk memunculkan gen-gen yang membangun jaring anak di lima slot lainnya.



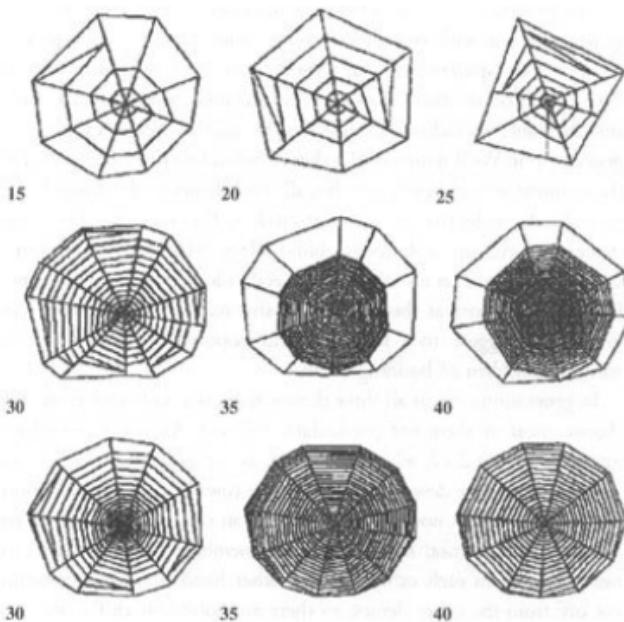
Gambar 2.11 Jaring yang dibangun dengan komputer, diruyaki lalat-lalat komputer. Program NetSpinner ditulis oleh Peter Fuchs dan Thiemo Krink.

Tentu saja, kita bisa memilih salah satu dari enam jaring ini untuk dibiakkan, seperti kita memilih satu biomorf untuk dibiakkan. Artinya, gen-gen jaring yang dipilih itulah yang akan lanjut (dan dapat bermutasi) ke generasi berikutnya. Tapi itu namanya seleksi buatan. Dan kita justru beralih dari biomorf ke jaring laba-laba karena adanya peluang menyimulasikan seleksi alam: seleksi berdasarkan efisiensi terukur dalam menangkap 'lalat', bukan seleksi berdasarkan selera estetis manusia.

Sekarang, lihat bintik-bintik pada gambarnya. Bintik-bintik itu adalah 'lalat-lalat' yang ditebarkan oleh komputer secara acak ke jaring. Jika diperhatikan teliti, Anda akan melihat bahwa pola acak penempatan 'lalat-lalat' pada keenam jaring itu sama. Inilah perbedaan simulasi komputer dengan dunia

nyata: Kesamaan pola ini akan selalu muncul kecuali kita mau bersusah-payah melarang komputer melakukannya. Namun, hal itu tidak penting untuk kasus kita dan kesamaan pola malah memudahkan komparasi di antara jaring-jaringnya. Komparasi berarti bahwa komputer menghitung jumlah lalat yang 'ditangkap' oleh tiap-tiap dari keenam jaring tersebut. Jika itu saja kriterianya, jaring di kanan bawahlah yang menang karena pada lingkar lengketnya lalat paling banyak terjala. Tetapi jumlah yang besar bukan satu-satunya variabel penting. Ada lagi biaya sutra. Jaring di tengah atas menggunakan paling sedikit sutra. Jika kriterianya hanya itu saja, jaring tersebutlah pemenangnya. Namun, juara sejatinya adalah jaring yang menangkap paling banyak lalat minus fungsi biaya yang dihitung dari panjangnya sutra. Dengan kalkulasi yang lebih berlapis ini, pemenangnya adalah jaring di tengah bawah. Jaring inilah yang dipilih untuk dibiakkan dan meneruskan gen-gen pembangunnya ke generasi berikutnya. Seperti pada program biomorf, proses pembiakan dari pemenang selama bergenerasi-generasi ini membawa tren evolusi yang gradual. Akan tetapi, lain dari kasus biomorf yang arah trennya murni dipandu oleh selera manusia, pada kasus NetSpinner, arah evolusinya dipandu secara otomatis menuju efisiensi yang lebih baik. Itulah yang kita harapkan: model komputer seleksi alam, bukan model komputer seleksi buatan. Dan apa hasil evolusi dari semua kondisi ini? Sungguh memuaskan melihat betapa mirip dengan aslinya jaring-jaring yang muncul setelah evolusi empat puluh generasi yang terjadi dalam semalam ini (Gambar 2.12).

Gambar-gambar yang saya tunjukkan sejauh ini dihasilkan oleh NetSpinner II, karya Peter Fuch (NetSpinner I adalah versi



Gambar 2.12 Evolusi jaring dalam semalam oleh NetSpinner, digambarkan tiap lima generasi.

awal yang tidak akan saya bahas). Versi-versi program NetSpinner kemudian, yang ditulis ulang oleh Thiemo Krink, menyalip biomorf pada satu kriteria penting lainnya. NetSpinner III menyertakan reproduksi seksual. Biomorf, dan NetSpinner II, bereproduksi secara aseksual saja. Apa artinya bila laba-laba komputer bereproduksi secara seksual? Tidak berarti kita melihat laba-laba bersanggama di layar, walau tentu itu bisa saja dilakukan, lengkap dengan klimaks kanibalistik yang sesekali terjadi. Yang dilakukan program tersebut adalah menghadirkan para penghubung genetik dari reproduksi seksual, rekombinasi dari gen-gen induk yang satu

dengan separuh gen-gen induk yang lain.

Seperti ini cara kerjanya. Pada satu generasi mana pun, terdapat populasi, atau 'dem', berisi enam ekor laba-laba, yang masing-masing membangun sebuah jaring. Bentuk jaringnya diatur oleh sebuah kromosom atau seutas gen. Tiap gen bekerja dengan mempengaruhi sebuah 'aturan' spesifik pembangunan jaring, seperti tampak di atas tadi. Jaring-jaring tersebut kemudian dihujani dengan 'lalat'. 'Kebaikan' jaring dihitung dengan cara yang sama seperti sebelumnya, dengan rumus fungsi jumlah 'lalat' tertangkap dikurang fungsi jumlah 'sutra' terpakai. Sejumlah tetap dari populasi laba-laba ini mati di tiap generasi, dan yang mati adalah yang paling tidak efisien. Laba-laba yang tersisa akan kawin dengan sesamanya, secara acak, untuk menghasilkan generasi laba-laba yang baru. 'Kawin' berarti bahwa kromosom-kromosom dari kedua laba-laba 'dibariskan' dan bertukar sebagian dari panjangnya. Ini terdengar ganjil dan dibuat-buat, tetapi ingat bahwa seperti itulah persisnya perilaku kromosom sungguhan – kromosom kita maupun kromosom laba-laba – pada reproduksi seksual.

Prosesnya berlanjut dan populasi itu berevolusi, generasi demi generasi, tetapi kali ini dengan satu skenario tambahan. Tidak hanya satu dem berisi enam laba-laba, tetapi (katakanlah) tiga dem yang semi-terpisah (Gambar 2.13). Tiap-tiap dari tiga dem ini berevolusi secara terpisah, dengan pengecualian: Kadang kala, satu individu 'bermigrasi' ke dem lain, dengan membawa serta gen-gennya. Kita akan membahas teori di baliknya pada Bab 4. Untuk saat ini, boleh dikata bahwa ketiga dem itu berevolusi menuju jaring yang lebih baik: jaring yang lebih pandai menangkap lalat dengan sumber daya hemat.

Beberapa dem mungkin akan mengalami kemandekan. Gen-gen laba-laba yang bermigrasi dapat dibayangkan sebagai suntikan ‘gagasan’ baru dari populasi lain. Seolah-olah, sebuah subpopulasi yang berhasil mengutus gen-gen yang ‘menyarankan’ kepada populasi yang kurang berhasil cara lebih baik untuk menyelesaikan masalah konstruksi jaring.

Di generasi kesatu, pada ketiga dem, bentuk jaringnya beraneka ragam dan kebanyakan di antaranya tidak efisien. Seperti pada contoh aseksual di Gambar 2.12, yang kita amati, seiring generasi berganti generasi, adalah penggerutan variasi secara gradual menuju bentuk yang lebih baik dan efisien. Namun sekarang, reproduksi seksual memastikan bahwa ‘gagasan’ dibagikan di dalam dem-dem tersebut sehingga para anggota tiap dem agak mirip satu sama lain. Di lain pihak, secara genetis mereka terpisah dari dem-dem lainnya sehingga tidak terdapat perbedaan yang kentara di antaranya. Di satu titik, pada generasi kesebelus, gen-gen dua buah jaring bermigrasi dari Dem 3 ke Dem 2 dan, karenanya, ‘menginfeksi’ Dem 2 dengan ‘gagasan’ dari Dem 3. Pada generasi kelima puluh – dan pada sebagian kasus, jauh sebelumnya – jaring-jaring tersebut telah berevolusi menjadi perangkat penangkap lalat yang baik, stabil, dan efisien.

Maka, hal seperti seleksi alam dapat berlangsung di sebuah komputer untuk menghasilkan jaring-jaring buatan yang mampu menangkap lalat lebih efisien dari jaring-jaring asalnya. Walau masih belum menyamai seleksi alam, ini sudah lebih mendekati seleksi alam ketimbang seleksi biomorf yang murni bersifat buatan. Tapi NetSpinner pun masih bukan seleksi alam sejati. NetSpinner harus melakukan kalkulasi untuk memutuskan jaring-jaring mana yang cukup baik untuk

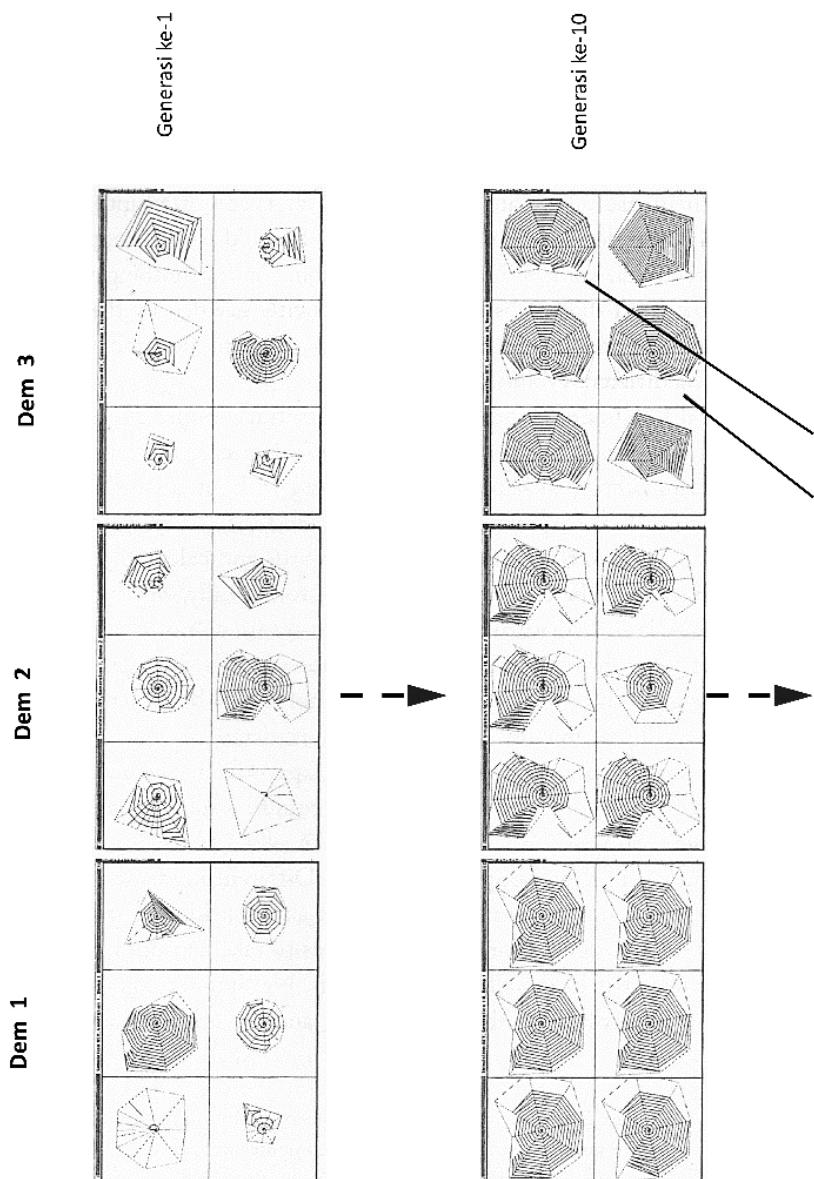
dibiakkan dan mana yang tidak. Programer harus memutuskan semahal apa harga panjangnya 'sutra', dalam mata uang yang sama dengan nilai seekor 'lalat'. Programer, sesuai kehendaknya, dapat mengganti nilai tukar mata uangnya. Dia bisa, misalnya, melipatgandakan 'harga' sutra. Hal itu berarti menurunnya kans pemberian jaring yang lebih besar atau tebal yang, demi menangkap beberapa lalat lagi, boros dengan bahan bakunya. Programer harus memutuskan konversi mata uangnya sendiri dan dia bisa memilih faktor konversinya, sesuai kehendaknya. Itu baru satu dari sekian banyak konversi mata uang serupa yang terjadi di balik layar. Nilai 'daging' lalat yang dikonversi menjadi laba-laba anakan juga diputuskan oleh programer. Nilainya boleh jadi berbeda-beda. Batas-batas matinya laba-laba karena berbagai alasan lainnya, yang tidak berkaitan dengan kualitas jaringnya, juga secara implisit diputuskan oleh programer. Keputusannya manasuka dan lain keputusan mungkin lain pula hasil evolusi yang dimunculkannya.

Di kehidupan nyata, tak satu pun dari keputusan-keputusan ini manasuka. Selain itu, tak satu pun yang benar-benar keputusan dan tak ada komputer yang digunakan untuk membuatnya. Semuanya terjadi begitu saja, secara alami dan tanpa repot. Daging lalat dikonversi menjadi daging keturunan laba-laba, dan faktor konversi mata uangnya, ya, sebagaimana adanya. Kalau kita lantas mengalkulasinya, itu urusan kita. Konversinya terjadi secara otomatis, entah diungkapkan melalui istilah-istilah ekonomi entah tidak. Demikian pula dengan konversi daging serangga menjadi sutra. NetSpinner, pada kenyataannya, mengasumsikan bahwa semua lalat sama. Di kehidupan nyata, bisa saja ada kerumitan detail yang

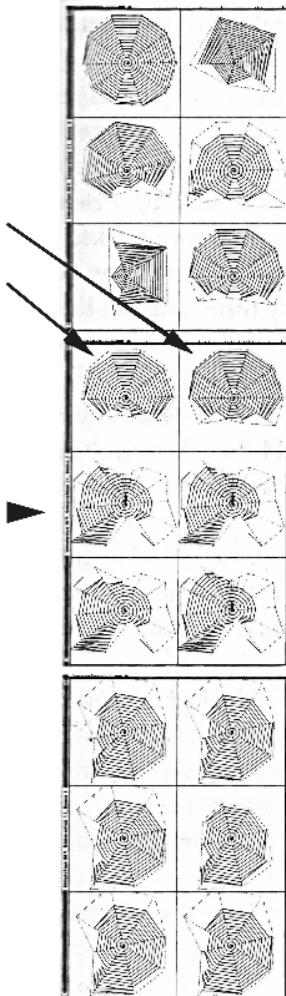
payah, tetapi semua itu pun terjadi dengan sederhana dan sewajarnya. Selain bahwa beberapa serangga lebih besar dari serangga lainnya, boleh jadi ada perbedaan-perbedaan kualitatif yang halus. Misalkan, untuk membuat sutra, dibutuhkan asam amino tertentu yang terbatas ketersediaannya. Beda jenis serangga beda pula derajat kekayaannya akan asam amino ini. Maka dari itu, jika ingin menghitung dengan benar nilai dari seekor serangga, jenis dan ukuran tubuhnya haruslah dipertimbangkan. NetSpinner dapat mengalkulasi efek semacam ini, tetapi sifat kalkulasinya tetaplah manusuka. Di kehidupan nyata, hal tersebut terjadi dengan wajar, otomatis, dan tanpa keruwetan. Berikut ini komplikasi lainnya. Logikanya, nilai seekor lalat tambahan bagi laba-laba yang hampir kenyang lebih kecil dari laba-laba yang perutnya hampir kosong. NetSpinner mengabaikan hal ini; dunia nyata tidak. NetSpinner bisa saja membuat kalkulasi manusuka agar faktor kenyang-lapar dapat diperhitungkan. Di kehidupan nyata, hal itu terjadi sewajarnya, tanpa ribet. Tak ada hitung-hitungan yang perlu diterakan.

Maksud saya di sini sudah begitu jelas sehingga tak perlu dinyatakan, tetapi begitu penting sehingga tetap harus diutarakan. Setiap kali perincian baru dan rumit disertakan ke dalam NetSpinner, berlembar-lembar kode komputer sulit harus ditambahkan oleh sang programer pintar. Akan tetapi, bedanya, penghitungan eksplisit seperti itu tak ada di dunia nyata. Faktor konversi mata uang antara protein lalat dan pro-

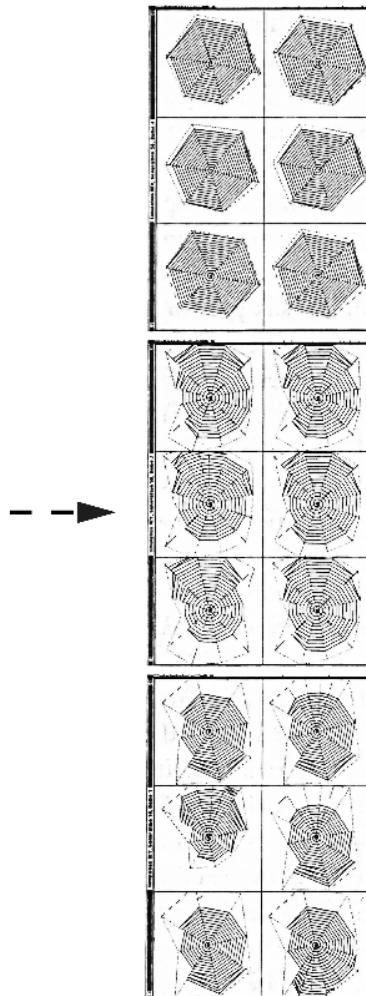
Gambar 2.13 (halaman sebelah) Lima puluh generasi evolusi dari tiga dem jaring komputer yang bereproduksi secara seksual dan dibiakkan dengan metode seleksi ‘alam’ di NetSpinner. Pada generasi kesebelas, dua genotipe jaring dari Dem 3 bermigrasi ke Dem 2 dan dapat melakukan kawin silang (pada ilustrasi ini, ditandai dengan anak panah bergaris lurus).



Generasi ke-11



Generasi ke-50



Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

tein sutra sudah otomatis ada. Fakta bahwa seekor lalat lebih berharga bagi laba-laba lapar daripada laba-laba kenyang tidak membutuhkan komputasi tambahan. Justru akan mengherankan bila makanan tidak lebih berharga bagi seekor laba-laba lapar. Kita terbiasa melihat model komputer sebagai simplifikasi dunia nyata. Tetapi di sini terasa bahwa model-model komputer seleksi alam bukanlah penyederhanaan, melainkan perumitan dunia nyata.

Seleksi alam adalah proses yang amat sangat simpel, dalam arti bahwa hanya dibutuhkan sedikit saja mekanisme untuk membuatnya berfungsi. Barang tentu, efek dan konsekuensi seleksi alam amat sangat kompleks. Namun, agar seleksi alam dapat berlangsung di jagat nyata, yang dibutuhkan hanyalah adanya informasi yang diwariskan. Untuk melangsungkan model simulasi seleksi alam di komputer, tentu kita butuh informasi warisan yang sepadan, tetapi ada banyak hal lain yang juga diperlukan. Perlu mekanisme rumit untuk menghitung banyak biaya dan banyak manfaat dan ‘mata uang’ untuk mengonversi yang satu menjadi yang lain.

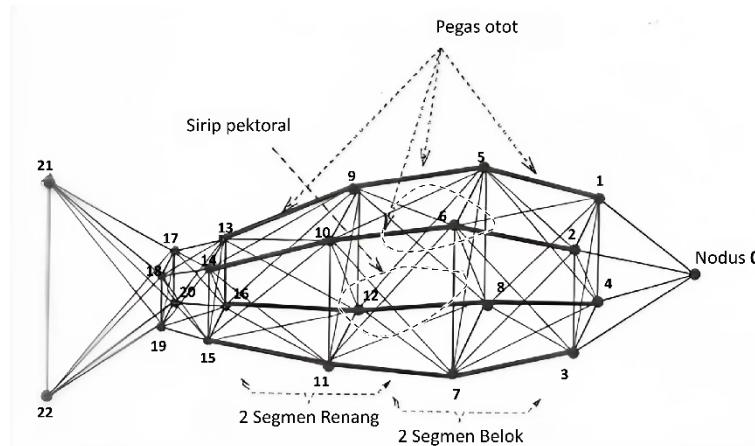
Selain itu, perlu dibuat pula mekanisme fisika artifisialnya. Laba-laba kita pilih sebagai contoh karena, dari semua perangkat yang ada di dunia alami, laba-laba ada di antara yang paling sederhana untuk diterjemahkan ke istilah-istilah komputer. Sayap, tulang belakang, gigi, cakar, sirip, dan bulu: Pada prinsipnya kita dapat membuat model-model komputernya dan komputer dapat diprogram untuk menentukan efisiensi bentuk-bentuk variannya. Namun, tugas pemrogramannya akan rumit setengah mati. Sayap, sirip, atau bulu tidak dapat menunjukkan sifatnya kecuali ditaruh di media fisik – udara atau air – dengan detail-detail seperti

resistansi, elastisitas, dan pola-pola turbulensi. Semua itu sulit disimulasikan. Tulang belakang atau tulang tungkai tidak dapat menunjukkan sifatnya kecuali ditaruh di sistem fisik tekanan, gaya unkit, dan gesekan. Kekerasan, kerapuhan, kelenturan tekuk, dan kompresi – semuanya harus direpresentasikan di komputer. Simulasi interaksi dinamis di antara tulang-tulang, yang disangga membentuk sudut-sudut tertentu dan diikat dengan ligamen dan urat otot, adalah tugas komputasi besar yang sarat akan keputusan manasuka di setiap titik prosesnya. Simulasi aliran udara dan turbulensi di sekitar sayap adalah masalah yang, saking sulitnya, para insinyur dirgantara kerap lebih memilih model-model di terowongan angin ketimbang berupaya menyimulasikannya di komputer.

Akan tetapi, saya tak boleh meremehkan kerja para pembuat model komputer. Pada 1987, bidang ilmu 'Kehidupan Buatan' dibentuk dan saya merasa terhormat karena diundang ke acara peresmiannya di Los Alamos, yang dahulu merupakan gudang bom atom, tetapi kini dialihfungsikan untuk tujuan-tujuan yang lebih konstruktif. Christopher Langton, inspirator sekaligus penyelenggara konferensi perdannya pada 1987 dan seterusnya, kini telah menerbitkan jurnal kehidupan buatan, yang edisi pertamanya baru saja dirilis. Di dalamnya dimuat artikel-artikel yang telah menurunkan kadar pesimisme paragraf sebelumnya. Misalnya, tiga orang ilmuwan Amerika Utara – Demetri Terzopoulos, Xiaoyuan Tu, dan Radek Grzeszczuk – telah menulis program simulasi ikan komputer yang berperilaku layaknya ikan sungguhan dan saling berinteraksi di simulasi perairan komputer. Dunia komputer tempat ikan-ikan ini berenang memiliki fisika

simulasinya sendiri, yang didasarkan pada fisika air di dunia nyata. Sebagian besar kerja pemrogramannya dicurahkan untuk menyimulasikan satu ekor ikan hingga perilakunya benar. Kemudian, ikan tersebut direproduksi dan diragamkan berkali-kali dan dilepasliarkan ke ‘air’ tempat mereka saling ‘memperhatikan’ dan saling berinteraksi. Contohnya, mereka berenang tanpa saling ‘bertabrakan’ dan mereka berkumpul dalam ‘kerumunan’.

Tiap ikan komputer memiliki struktur anatomi dua puluh tiga titik (nodus), yang disusun di ruang tiga dimensi simulasi dan disalingkaitkan dengan sembilan puluh satu buah ‘pegas’ (Gambar 2.14). Dua belas dari pegas-pegas tersebut dapat berkontraksi, menjadi ‘otot-otot’ ikan buatan itu. Gerak renang kelak-kelok ala ikan sungguhan, termasuk gerak putar baliknya, disimulasikan dengan gelombang-gelombang kontraksi terkendali di sekitar ‘otot-otot’ tersebut. Ikannya bi-

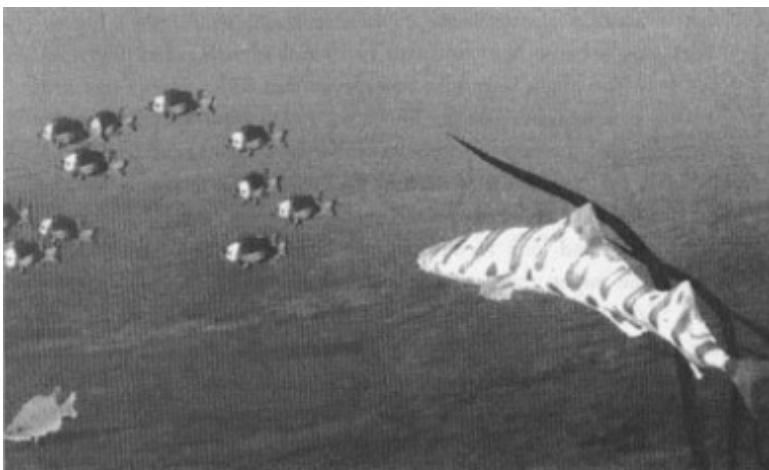


Gambar 2.14 Ikan buatan. Struktur kerangka pegas.

sa belajar sendiri untuk menyempurnakan teknik pengurutan kontraksi otot untuk berenang, berbelok, dan membuntuti buruan. Ikan-ikan buatan ini memiliki tiga ‘variabel tataran mental’, yaitu ‘lapar’, ‘berahi’, dan ‘takut’. Ketiganya dikombinasikan untuk memunculkan ‘niat’. Niat-niatnya meliputi ‘makan’, ‘kawin’, ‘berenang bebas’, ‘pergi’, dan ‘menghindari tubrukan’. Ikannya punya dua organ pengindra, yang satu untuk mengukur suhu air dan yang lain berlaku sebagai ‘mata’ kasar, untuk mendeteksi posisi, warna, dan ukuran benda-benda di dunia sekitarnya. Untuk mempercantik, struktur kerangka nodus dan pegas ini dikemas dengan bungkus yang tampak padat dan berwarna ikan. Berbagai jenis ikan, misalnya pemangsa dan mangsa, dibedakan tidak hanya dalam hal bungkus-bungkus luarnya, tetapi juga dalam hal perilaku-perilakunya (Gambar 2.15).

Pemangsa berbeda dari mangsa, tidak hanya dari segi ukuran tetapi juga dari segi tendensi keperilakuannya, bobot tiga variabel tataran mentalnya, dan ‘niat-niat’nya. Omong-omong, dengan kecepatan komputer zaman sekarang pun, simulasi seperti ini begitu berat sehingga laju waktu di dunia buatan dengan banyak ikan yang saling berinteraksi lebih lambat dari waktu di dunia nyata. Ikan-ikan berenang dan saling berkejaran, berkelit dari satu sama lain, dan kawin dengan skala waktu lebih lambat dari dunia nyata, dan kita terpaksa mengandalkan metode penyajian visual semacam fotografi selang waktu (*time-lapse photography*) jika ingin menontonnya dalam kecepatan normal. Akan tetapi, ini detail yang tidak penting: masalah yang akan hilang di generasi-generasi komputer masa depan.

Dunia ikan buatan Terzopoulos, Tu, Grzeszczuk di komputer



Gambar 2.15 Hiu buatan menguntit kerumunan ikan mangsa.

cukup kaya untuk dijadikan kandidat kuat simulasi evolusi. Saat ini, meski ikan-ikannya ‘kawin’, perilakunya masih terbatas pada perilaku berahi saja (tanpa benar-benar bereproduksi). Jelas – dan sudah disadari oleh ketiga pencipta programnya – langkah selanjutnya adalah membuat ‘gen-gen’ untuk pembobotan kuantitatif dari berbagai variabel keperilakuan yang mengatur pegas-pegas ototnya dan, lebih lanjut lagi, variabel tataran mental serta niat-niatnya. Ikan jantan dan ikan betina yang kawin dapat merekombinasi gen-gen mereka, dengan mutasi yang terjadi sesekali, untuk menghasilkan generasi-generasi baru dengan ciri-ciri genetik yang berbeda. Dengan begitu, evolusi melalui seleksi alam, meski dalam lingkungan buatan di komputer, dapat terjadi. Mungkin tidak perlu ditentukan dua jenis ikan yang disebut pemangsa dan mangsa. Mungkin, di awal, ada dua spesies yang berbeda hanya dari segi ukuran dan kompatibilitas reproduksinya, tetapi tidak dalam hal kebiasaannya, dan

seleksi alam boleh jadi secara alami membuat spesies yang lebih besar berevolusi, selama bergenerasi-generasi, untuk memangsa spesies yang lebih kecil. Siapa yang tahu apa ciri kelakuan menarik sejarah alam buatan yang muncul di depan mata kita?

Saya memperkirakan, dan menantikan, tumbuh mekarnya bidang penelitian yang barangkali akan diberi nama oksimoron: Seleksi Alam Buatan. Namun demikian, terasa bahwa dunia nyata adalah ‘simulasi’ termudah dari seleksi alam sungguhan. Tulang memang berbeda-beda dalam hal ambang tekan patah, elastisitas kompresi, kekerasan, arah sebar tekanan, dan kebutuhan konsumsi kalsiumnya. Kalau mau, kita bisa menghitung perinciannya. Namun, dihitung atau tidak dihitung, faktanya ada tulang yang patah dan ada yang tidak; ada tulang yang mengonsumsi banyak kalsium berharga dan ada yang menyisakan kalsium untuk air susu. Dalam hal ini, kehidupan nyata sungguh sederhana. Sebagian hewan lebih mudah mati dari yang lain. Komputer tercepat di Amerika boleh saja menghabiskan waktu setahun untuk *render* dan mengalkulasi detail-detailnya. Tetapi di alam raya, fakta kejamnya adalah bahwa sebagian makhluk mati dan sebagian lain tidak. Itu saja.

Kalau mau, kita bisa membayangkan gen-gen di seluruh populasi dunia sebagai komputer raksasa, yang mengalkulasi semua biaya, manfaat, dan konversi mata uang, dengan pola-pola kekerapan gen yang berubah-ubah sebagai padanan pola ulang-alik 1 dan 0 di prosesor data elektronik. Ini wawasan yang cukup mencerahkan, dan akan kita jenguk kembali di halaman-halaman penutup buku ini. Tapi kini, tiba waktunya

untuk menerangkan judul buku ini. Apa itu Gunung Kemuskilan dan apa pelajaran yang akan kita petik darinya?

---

\* Saya akan menggunakan nama-nama Latin, dan harap pembaca maklum bila saya merasa perlu menyisipkan catatan akhir tentang kaidah penamaan ini karena, siapa nyana, ternyata banyak orang terdidik (barangkali orang-orang yang sama dengan mereka yang membuat kita meringis karena merujuk karya utama Darwin dengan judul *Origin of the Species*) yang keliru memahaminya. Nama-nama Latin terdiri atas dua bagian: nama generik (mis. *Homo* adalah nama genus) diikuti nama spesifik (mis. *sapiens* adalah satu-satunya spesies dari genus *Homo* yang masih bertahan hidup), keduanya ditulis cetak miring atau digaris bawah. Nama satuan-satuan yang lebih besar tidak dicetak miring. Genus *Homo* tergolong ke dalam famili Hominidae. Nama-nama generik itu unik: Hanya ada satu genus *Homo*, hanya ada satu genus *Vespa*. Spesies kerap berbagi nama dengan spesies di genus-genus yang lain, tetapi tidak timbul kerancuan karena keunikan nama generiknya: *Vespa vulgaris* adalah seekor tawon, yang tidak akan dirancukan dengan *Octopus vulgaris*. Nama generik selalu diawali dengan huruf kapital dan nama spesifik tidak (walau dahulu, kaidahnya mengatur bahwa nama spesifik dapat diawali huruf kapital bila merupakan nama diri. Sekarang *Darwinii* pun akan ditulis *darwinii*). Jika Anda pernah (atau nanti) menjumpai penulisan *Homo Sapiens* atau *homo sapiens*, itu jelas salah.

(Catatan penerjemah: Dalam bahasa Indonesia, ‘spesies’ disebut juga ‘jenis’ dan ‘genus’ disebut juga ‘marga’. Dalam bahasa Inggris, *species* adalah nomina yang bentuk tunggal dan bentuk jamaknya ditulis dengan ejaan yang sama. Sementara itu, *genus* adalah nomina tunggal. Bentuk jamak *genus* adalah *genera*. Bahasa Indonesia tidak menyerap istilah *genera*.)

## BAB 3

### PESAN DARI GUNUNG

GUNUNG KEMUSKILAN MENYEMBUL DARI DATARAN, menyundul puncak-puncaknya tinggi menjulang ke angkasa luas. Tebing-tebingnya yang membubung terjal tampak mustahil dipanjat. Kerdil bagai serangga, para pendaki yang malang merangkak tak tentu arah di sepanjang kakinya, menatap pasrah ketinggian yang tak mungkin digapai. Mereka menggeleng-gelengkan kepala dan dengan murung menyimpulkan: Puncak tersebut selamanya takkan pernah bisa dinaiki.

Para pendaki ini terlalu ambisius. Cita mereka begitu terpaku pada tebing-tebing terjal sehingga lupa melihat sisi di balik gunung itu. Di sana, yang akan mereka dapati bukan tebing terjal dan ngarai curam, melainkan padang rumput yang menanjak landai dan mudah ditapaki, menuju dataran tinggi yang jauh. Sesekali, tanjakan itu ditingkahi karang kecil berbatu, tetapi biasanya ada jalan memutar yang tak terlalu terjal untuk dipanjat seorang pendaki berbadan bugar, bersepatu awet, dan tidak tergesa-gesa. Tak peduli puncaknya tinggi menjulang, asalkan kita tidak mencoba menggapainya dengan sekali loncat. Carilah jalan setapak yang landai dan, jika waktumu abadi, pendakian ini hanya sesulit langkah berikutnya. Kisah Gunung Kemuskilan tentu saja sebuah perumpamaan. Kita akan menjajaki maknanya di bab ini dan bab-bab berikutnya.

Berikut ini nukilan dari sepuak surat yang diterbitkan harian *The Times* London beberapa tahun yang lalu. Penulisnya, yang saya biarkan anonim agar tidak terkesan mempermalukan, adalah seorang fisikawan, yang cukup dihormati oleh para koleganya sehingga terpilih menjadi *Fellow* di Masyarakat Kerajaan, institusi terpelajar yang paling dihormati di Inggris.

Tuan yang saya hormati, saya adalah salah seorang ilmuwan fisika...yang meragukan teori evolusi Darwin. Keragu-raguan saya timbul bukan karena motif keagamaan atau niat untuk memancing di air keruh, melainkan semata-mata karena saya merasa Darwinisme tidak dapat dibela secara ilmiah.

...Kita tidak dapat tidak menerima evolusi – semua bukti fosil mengarah padanya. Perbantahannya terletak hanya pada penyebabnya. Darwin mengetengahkan bahwa penyebabnya adalah kebetulan: Saat generasi berganti generasi, akan ada variasi-variasi kecil yang terjadi secara acak; yang diuntungkan akan bertahan dan yang tidak akan sirna. Oleh karena itu, makhluk hidup perlahan-lahan akan, misalnya, lebih pandai mencari makan atau mengalahkan musuh-musuhnya. Darwin menyebut proses ini seleksi alam.

Sebagai seorang fisikawan, saya tidak dapat menerimanya. Bagi saya, agaknya mustahil bila variasi yang terjadi secara tak disengaja telah menghasilkan jentera istimewa seperti tubuh manusia. Contohnya saja – mata. Darwin sendiri mengakui, bahwa dirinya tidak dapat membayangkan mata sebagai hasil evolusi dari sebuah organ peka cahaya yang sederhana... Saya pribadi tidak dapat melihat adanya alternatif untuk hipotesis bahwa benda-benda hidup merupakan hasil rancangan. Asal-muasal kehidupan tidak dapat dijelaskan dalam kerangka ilmu pengetahuan standar, begitu pula dengan sukses menakjubkan

makhluk hidup yang terbentuk selama ribuan juta tahun sejak planet ini ada.

Tapi siapa Perancangnya?

Hormat saya,

Penulisnya susah-payah memberi tahu kita, dua kali, bahwa dirinya fisikawan dan, maka dari itu, pandangannya punya bobot istimewa. Ilmuwan fisika lainnya, seorang profesor ilmu kimia di San Jose State University, California, merangsek masuk ke bidang biologi dengan menerbitkan makalah yang berjudul '*The Smyrna Fig requires God for its Production*' ('Perlu Tuhan untuk Menghasilkan Buah Ara Smyrna'). Ia menguraikan peliknya kompleksitas relasi antara pohon ara dan tawon penyerbuknya (lihat Bab 10) dan menyimpulkan hal berikut ini: 'Tawon anakan berdiam di pohon ara liar sepanjang musim dingin dan menetas untuk bertelur di pohon-pohon ara liar tepat pada musim panas, untuk menyerbuki buahnya. Waktunya harus tepat persis, yang berarti ada campur tangan Tuhan di sana'! (Tanda seru saya tambahkan sendiri.) 'Konyol kalau mengira semua pola yang pasti ini merupakan hasil evolusi karena kebetulan. Tanpa Tuhan, mustahil ada hal seperti buah ara Smyrna... Para pendukung teori evolusi menipu diri sendiri dengan berpikir bahwa segala sesuatu timbul secara kebetulan, tanpa tujuan pasti atau rencana yang matang.'

Salah seorang ilmuwan fisika paling ternama di Inggris, Sir Fred Hoyle (yang kebetulan merupakan penulis buku *The Black Cloud*, salah satu novel fiksi ilmiah terbaik yang pernah ditulis), kerap mengungkapkan pandangan serupa untuk konteks molekul-molekul besar seperti enzim, yang 'kemuskilan'

inherennya – yakni, probabilitasnya untuk mengada secara spontan karena kebetulan – lebih mudah dihitung ketimbang mata atau buah ara. Enzim bekerja di dalam sel layaknya alat-alat mesin yang makin lama makin banyak untuk produksi massal molekuler. Efektivitasnya tergantung pada bentuk tiga dimensinya, bentuknya tergantung pada perilaku mengumparnya, dan perilaku mengumparnya tergantung pada urutan asam amino yang berpautan di sepanjang rantai untuk membuatnya. Urutan yang pasti ini dikontrol langsung oleh gen-gen dan memang harus begitu. Apa mungkin itu terjadi karena kebetulan?

Tidak, kata Hoyle, dan dia benar. Asam amino tersedia dalam jumlah yang baku, dua puluh. Enzim biasanya berupa rangkaian beberapa ratus mata rantai yang ditarik dari dua puluh asam amino tersebut. Kalkulasi sederhana akan menunjukkan bahwa probabilitas terbentuknya secara spontan rangkaian berisi, misalnya, 100 asam amino adalah satu banding  $20 \times 20 \times 20 \dots$  hingga 100 kali, atau 1 banding  $20^{100}$ . Angka yang tak terbayangkan besarnya, jauh lebih besar dari jumlah partikel fundamental di seluruh alam semesta. Sir Fred, demi bersikap adil kepada orang-orang yang dia anggap sebagai lawannya dari kubu Darwin, rela (meski tak perlu, seperti akan kita lihat nanti) memperkecil peluangnya menjadi 1 banding  $10^{20}$ . Angka yang lebih rendah tentunya, tetapi tetap merupakan probabilitas yang amat sangat rendah. Rekan penulis dan seprofesi Sir Fred, astrofisikawan Profesor Chandra Wickramasinghe, pernah mengutip pernyataannya bahwa terbentuknya enzim secara spontan dan ‘kebetulan’ itu ibarat kejadian angin ribut meniup tempat barang rongsokan dan, ujug-ujug, sebuah pesawat Boeing 747 pun terangkailah.

Yang luput dari pemahaman Hoyle dan Wickramasinghe adalah bahwa Darwinisme bukanlah teori kebetulan acak. Darwinisme adalah teori mutasi acak plus seleksi alam kumulatif *nonacak*. Entah mengapa sulit sekali, bagi para ilmuwan berkelas sekalipun, untuk memahami poin sederhana ini?

Darwin sendiri terpaksa berbantah dengan para ilmuwan fisika generasi lebih awal yang mengotot menduga bahwa ‘kebetulan’ adalah kesalahan fatal dalam teorinya. William Thomson (atau lebih dikenal dengan sebutan Lord Kelvin), barangkali merupakan fisikawan terhebat di zamannya dan lawan ilmiah Darwin yang paling tersohor. Di antara banyak pencapaiananya, dia menghitung usia Bumi berdasarkan tingkat-tingkat pendinginan, dengan asumsi bahwa Bumi pernah menjadi bagian dari ‘api’ Matahari. Dia menyimpulkan bahwa Bumi berusia puluhan juta tahun. Estimasi modern menyatakan usia bumi dalam kisaran hingga ribuan juta tahun. Wajar bila perkiraan Lord Kelvin hanya seperseratus dari jawaban yang benar. Metode-metode penanggalan dengan pelapukan radioaktif belum ada di zamannya dan fusi nuklir – ‘api’ Matahari yang sesungguhnya – belum lagi diketahui. Wajar bila kalkulasi pendinginannya sudah sial dari awal. Yang sulit dimaafkan adalah sikap angkuhnya, ‘sebagai fisikawan’, yang tidak mengacuhkan bukti biologis Darwin: Bumi tak cukup tua; tak ada cukup waktu bagi proses evolusi Darwinian untuk mencapai hasil-hasil yang kita lihat di sekitar kita; bukti biologi pastilah keliru, luruh dipecundangi bukti unggul ilmu fisika. Darwin bisa saja membalas (meski tidak) bahwa bukti biologi jelas-jelas mengindikasikan evolusi; maka,

pastilah ada cukup waktu untuk berlangsungnya evolusi; maka, bukti si fisikawan itu pastilah salah!

Kembali ke pokok tentang ‘kebetulan’, Lord Kelvin menggunakan mimbar bergengsi Pidato Ketua Umum di hadapan Asosiasi Inggris untuk mengutip, atas persetujuan yang bersangkutan, kata-kata seorang ilmuwan fisika terhormat lainnya, Sir John Herschel, yang omong-omong juga mencibir Darwinisme sebagai ‘Hukum Keruntang-Pukang’:

Prinsip variasi dan seleksi alam yang manasuka dan asal-asalan tidak dapat kita terima sebagai riwayat yang semata-mata memadai tentang dunia makhluk hidup di masa lalu dan masa kini, seperti kita tidak dapat menerima cara mengarang ala Laputa (dipaksakan) sebagai cara memadai untuk menulis salah satu karya Shakespeare dan *Principia*.

Alusi Herschel merujuk pada cerita *Gulliver's Travels* saat pengarangnya, Jonathan Swift, meledek cara warga Laputa menulis buku: acak-acakan mencampur kata. Herschel dan Kelvin, Hoyle dan Wickramasinghe, para ilmuwan fisika anonim yang saya kutip kata-katanya, dan traktat Saksi Yehova mana pun – semuanya keliru karena menyamakan seleksi alam Darwinian dengan teknik menulis ala Laputa. Hingga sekarang, dan di kalangan terpelajar sekalipun, Darwinisme luas dipandang sebagai teori ‘kebetulan’.

Dengan tegas, lugas, dan keras, jelaslah bahwa, andai Darwinisme teori kebetulan, mustahil ia efektif. Tak perlu jadi matematikawan atau fisikawan untuk menyimpulkan bahwa mata atau molekul hemoglobin selamanya mustahil bisa terbentuk sendiri karena kebetulan yang keruntang-pukang. Bukan kesulitan khas Darwinisme sama sekali – kemusikilan

mata dan lutut, enzim dan sendi siku, serta semua benda hidup menakjubkan lainnya adalah masalah yang harus dipecahkan oleh teori kehidupan *mana pun*, dan yang dipecahkan *hanya oleh* Darwinisme. Darwinisme memecahkan masalah ini dengan mencacah yang muskil kecil-kecil, mengikis bersih semua kebetulan, berputar ke sisi belakang Gunung Kemuskilan, mendaki lereng-lerengnya yang landai, sejengkal demi sejengkal, tak peduli jika sejengkal berarti sejuta tahun. Hanya Tuhan yang bakal menjajal perbuatan gila meloncat ke puncak tebing terjalnya dalam satu lompatan. Dan bila kita mengetengahkan Tuhan sebagai sang perancang kosmis, kita kembali ke titik nol. Perancang yang mampu membangun keanekaragaman makhluk hidup yang menakjubkan, pastilah kecerdasan dan kerumitannya melampaui semua khayalan. Dan rumit hanyalah kata lain dari muskil – dan karenanya perlu penjelasan. Ahli teologi yang berpendirian bahwa tuhannya sungguh sederhana, berkelit dari duduk perkara – karena tuhan yang cukup sederhana, apa pun kebijakan lain yang dimilikinya, akan terlalu sederhana untuk mampu merancang alam semesta (belum lagi mengampuni dosa, menjawab doa, memberkati persekutuan, mengubah air menjadi anggur, dan banyak pencapaian lain yang disematkan padanya). Harus pilih salah satu, tidak bisa dua-duanya. Entah itu tuhanmu mampu merancang dunia dan melakukan semua hal ilahi lainnya, yang berarti ia sendiri *perlu* dijelaskan. Atau tidak, yang berarti ia tidak dapat *menjadi* penjelasan. Mestinya, Fred Hoyle sadar bahwa tuhan adalah Boeing 747 yang utama.

Puncak Gunung Kemuskilan adalah paduan kesempurnaan dan kemuskilan yang terlambangkan pada mata dan molekul

enzim (serta tuhan-tuhan yang mampu merancangnya). Kemungkinan benda seperti mata atau molekul protein punya makna yang agak persis. Benda tersebut terbuat dari sejumlah besar bagian yang ditata sedemikian rupa. Jumlah cara yang mungkin dipakai untuk menata bagian-bagian itu amat sangat besar. Untuk kasus molekul protein, jumlahnya malah sudah diketahui. Isaac Asimov mengerjakan hitungannya untuk hemoglobin protein, dan menamainya Bilangan Hemoglobin. Angka nolnya ada 190. Itulah jumlah cara menata ulang keping-keping hemoglobin sedemikian rupa sehingga hasil akhirnya bukan hemoglobin. Untuk kasus mata, kita tidak dapat mengerjakan kalkulasi yang sepadan tanpa mengarang banyak perandaian, tetapi secara nalar kita bisa menduga bahwa jumlahnya pasti bukan main besarnya. Cara teramat yang sebenarnya untuk menata bagian-bagian tersebut musikil dalam arti ia merupakan satu saja di antara triliunan cara lain yang mungkin ada.

Ada satu aspek kurang menarik yang dapat kita petik di sini: Bila ditilik kembali, semua hasil penataan itu sama-sama musikil. Bila ditilik lagi, tumpukan barang rongsokan pun sama musikilnya dengan Boeing 747 karena bagian-bagiannya dapat ditata dengan begitu banyak cara. Masalahnya, sebagian besar cara-cara tersebut akan menghasilkan tumpukan barang rongsokan juga. Di titik inilah kita beralih dari kuantitas ke kualitas. Mayoritas besar hasil penataan keping-keping Boeing rongsokan takkan bisa terbang. Hanya segelintir saja yang bisa. Dari triliunan cara menata bagian-bagian mata, cuma segelintir yang menghasilkan mata yang dapat melihat. Mata manusia membentuk citra tajam pada retina, mengoreksi aberasi sferis dan kromatik; secara otomatis mengatur tingkat

redup-cerah dengan diafragma iris agar intensitas cahaya dalam relatif konstan terhadap fluktuasi besar intensitas cahaya luar; secara otomatis mengubah jarak fokus lensa tergantung jauh dekatnya objek yang sedang dilihat; menyortir warna dengan membandingkan kecepatan impuls dari ketiga jenis sel peka cahaya. Hampir semua hasil padupadan acak-acakan dari bagian-bagian sebiji mata akan gagal mencapai yang mana pun dari tugas-tugas rumit nan sulit ini. Ada yang istimewa dengan satu susunan yang ada. Semua susunan yang spesifik itu sama-sama muskil. Tetapi dari semua susunan yang spesifik ini, jauh lebih banyak yang tidak berguna daripada yang berguna. Semua perangkat yang berguna itu muskil dan butuh penjelasan khusus.

R. A. Fisher, sang genetikawan matematis hebat dan pendiri ilmu statistika modern, telah mengemukakan pokok pikiran ini pada 1930, dengan gaya cermatnya yang khas (saya tidak pernah bertemu dengannya, tetapi bisa membayangkan lagaknya mendiktekan kata-kata dengan titi-teliti kepada istrinya yang tabah hati):

Organisme dianggap telah beradaptasi dengan situasi tertentu, atau dengan kesatuan situasi-situasi yang membentuk lingkungannya, hanya sejauh kita dapat membayangkan himpunan situasi atau lingkungan lain yang sedikit berbeda, yang terhadapnya hewan tersebut secara umum menjadi kurang mampu beradaptasi; dan, setara dengan itu, hanya sejauh kita dapat membayangkan himpunan makhluk hidup lain yang sedikit berbeda dan kurang mampu beradaptasi dengan lingkungan yang disebutkan pertama tadi.

Mata, telinga, dan jantung, sayap burung nazar, jaring labalaba – semua ini mengesankan kita dengan kesempurnaan

rekayasa nyata di mana pun kita melihatnya: Tidak perlu disuguhi contoh praktisnya di habitat alami untuk menyadari bahwa perangkat-perangkat itu piawai dalam mencapai tujuan tertentu dan bahwa, jika ditata ulang atau diubah hampir-hampir dengan cara apa pun, kualitasnya menurun. 'Kesempurnaan yang muskil' ada di sekujur tubuh benda-benda itu. Seorang insinyur bisa melihat bahwa, jika diminta untuk menyelesaikan masalah tertentu, desain seperti itulah yang akan dirancangnya.

Dengan kata lain, benda-benda semacam ini tidak dapat dijelaskan keberadaannya sebagai akibat dari kebetulan. Seperti yang telah kita lihat, mengetengahkan kebetulan sebagai satu-satunya penjelasan tak ubahnya melontarkan diri dari kaki ke puncak tebing terterjal Gunung Kemuskilan, dengan sekali loncat. Dan apa yang sepadan dengan meniti jalan sejengkal demi sejengkal melalui lereng-lereng berumput yang landai di sisi lain gunung tersebut? Proses bertahan hidup yang lamban, kumulatif, selangkah demi selangkah, dan nonacak dari varian-varian acak, yang oleh Darwin diberi nama seleksi alam. Metafora Gunung Kemuskilan mendramatisir kesalahan kalangan skeptis yang dinukil pada bagian awal bab ini. Mereka keliru karena terpaku pada tebing terjal nan curam dan ketinggiannya yang dramatis. Mereka mengira tebing yang tinggi menjulang itu satu-satunya jalan menuju puncak, tempat bertenggernya mata dan molekul protein dan susunan-susunan muskil lainnya. Ditemukannya lereng-lereng landai yang berkelok-kelok di sisi balik gunung tersebut adalah pencapaian besar Darwin.

Tetapi apakah ini salah satu dari kasus yang jarang-jarang terjadi: bahwa benar tak ada asap kalau tak ada api? Darwinisme luas disalahpahami sebagai teori kebetulan murni. Tidakkah itu berarti ada sesuatu dari pihaknya sendiri yang memancing desas-desus ini? Benar, ada sesuatu di balik rumor yang salah kaprah ini, alasan lemah atas pemahaman yang menyimpang. Memang, salah satu tahap di dalam proses Darwinian adalah proses kebetulan – mutasi. Mutasi adalah proses diajukannya variasi genetik baru untuk diseleksi dan biasa digambarkan sebagai proses yang bersifat acak. Akan tetapi, kalangan Darwinian menekankan iihwal ‘keacakan’ mutasi ini semata-mata untuk *membedakannya* dari ketakacakan seleksi, sisi lain dari prosesnya. Mutasi *tidak perlu* acak sehingga seleksi alam dapat berfungsi. Seleksi tetap dapat berlangsung, terlepas dari terarah atau tidaknya mutasi. Penekanan bahwa mutasi *bisa* bersifat acak adalah cara kami untuk mengarahkan perhatian orang ke fakta krusial bahwa, di lain pihak, seleksi sejatinya dan pada hakikatnya bersifat *nonacak*. Ironis bahwa penekanan pada kontras di antara mutasi dan ketakacakan seleksi telah menggiring orang untuk mengira bahwa teori ini teori kebetulan.

Padahal, mutasi pun bersifat nonacak dalam berbagai segi, walau segi-segi tersebut tidak relevan dengan diskusi kita karena tidak secara konstruktif berkontribusi pada kesempurnaan muskil organisme. Misalnya, mutasi memiliki sebab-sebab fisik yang dipahami dengan baik; pada tataran tersebut, mutasi bersifat nonacak. Alasan operator mesin sinar X mundur dahulu, atau mengenakan celemek berbahan timbal, sebelum menekan picu adalah karena sinar X menyebabkan mutasi. Mutasi juga lebih mungkin terjadi pada

beberapa gen ketimbang gen-gen lainnya. Ada ‘titik-titik panas’ pada kromosom tempat tingkat terjadinya mutasi secara signifikan lebih tinggi dari rata-rata. Ini satu lagi contoh ketakacakannya. Mutasi dapat dibalik (‘mutasi balik’). Pada sebagian besar gen, mutasi ke dua arah sama-sama mungkin terjadi. Pada sebagian yang lain, mutasi ke satu arah lebih kerap terjadi ketimbang mutasi balik ke arah berlawanan. Ini lantas memunculkan istilah ‘dorongan mutasi’ – kecenderungan untuk berevolusi ke arah tertentu, terlepas dari seleksinya. Ini satu segi lagi yang menggambarkan mutasi sebagai peristiwa nonacak. Perhatikan bahwa dorongan mutasi tidak secara sistematis menyorong ke arah perbaikan. Demikian pula halnya dengan sinar X. Malah sebaliknya, mayoritas besar mutasi, apa pun sebabnya, bersifat acak dalam kaitannya dengan kualitas, dan itu berarti biasanya hasilnya buruk karena ada lebih banyak cara untuk memburuk ketimbang membaik.

Anggaplah ada dunia khayali yang mutasi-mutasi condong ke arah perbaikan. Mutasi-mutasi di dunia khayali ini bersifat nonacak tidak hanya dalam arti nonacaknya mutasi yang dipicu sinar X: Mutasi-mutasi khayali ini akan secara sistematis cenderung mendahului seleksi dan mengantisipasi kebutuhan-kebutuhan organismenya. Namun, ketakacak semacam inilah yang, bertentangan dengan sekian banyak pengandaian, hampir pasti tidak berdasar pada kenyataan: Mutasi tidak secara sistematis cenderung mengantisipasi kebutuhan organisme, dan tidak jelas pula seperti apa kiranya cara kerja antisipasi tersebut. Apa sekiranya maksud dari ‘antisipasi’? Misalkan zaman es yang ganas melanda kawasan yang sebelumnya bersuhu hangat dan rusa-rusa setempat

mati karena berbulu tipis. Sebagian besar rusa memang akan mati, tetapi spesies ini akan selamat kalau saja, di saat-saat penghabisan, ada rusa yang bermutasi hingga tubuhnya diselimuti bulu setebal bulu muskox. Pada prinsipnya, kita dapat membayangkan mekanisme yang disetel untuk mengaktifkan mutasi-mutasi yang dikehendaki kalau dan saat dibutuhkan. Kita tahu bahwa sinar X menambah laju mutasi secara umum, tanpa pandang bulu membuat bulu tubuh yang lebih tipis atau lebih tebal. Bagaimana kalau suhu dingin yang ekstrem, entah bagaimana, bisa memacu laju mutasi ke satu arah saja: menuju bulu yang lebih tebal? Dan sebaliknya, bagaimana kalau suhu panas yang ekstrem bisa memicu mutasi ke arah berlawanan, menuju bulu tubuh yang lebih tipis?

Kalangan Darwinian tidak akan *keberatan* dengan adanya mutasi mujur seperti itu. Hal itu tidak akan membatalkan Darwinisme, kendati memang perlu ditempatkan pada kategori tersendiri: Angin buritan pada penerbangan transatlantik dapat mempercepat waktu kedatangan, tetapi tidak membatalkan keyakinan bahwa daya utama yang menerbangkan Anda ke tanah air adalah mesin jetnya. Namun, kalangan Darwinian memang akan lumayan kaget (dan tercuri perhatiannya) kalau mekanisme mutasional mujur semacam itu ditemukan. Ada tiga alasannya.

Pertama, meski giat dicari, mekanisme semacam itu belum lagi ditemukan – setidaknya di dunia hewan dan tumbuhan. (Pernah dikemukakan satu kasus pada bakteri, tetapi kasus ini sangat khusus dan relevansinya pun terbatas; selain itu faktanya juga masih kontroversial.) Kedua, tidak ada teori yang dapat menjelaskan bagaimana tubuh dapat ‘mengetahui’

jenis mutasi yang perlu dipicu. Saya rasa memang bisa dibayangkan bahwa, kalau pernah terjadi puluhan siklus zaman es selama jutaan tahun sebelumnya, yang memunculkan semacam pengetahuan kolektif berdasarkan ‘jam terbang’, sejenis seleksi alam dari kasta yang lebih tinggi – dan yang belum ditemukan – dapat membentuk kecenderungan untuk bermutasi ke arah yang tepat, ketika muncul firasat akan datangnya zaman es berikutnya. Akan tetapi, saya ulangi, tidak ada bukti yang mendukung efek semacam itu dan, terlebih, dari teori-teori yang sejauh ini digagas, tidak ada yang dapat menanganinya. Ketiga – dan kembali ke pokok saya sebelumnya – sebagian kalangan Darwinian, termasuk saya, menganggap mekanisme mutasi terarah yang diajukan ini kasar dan mubazir. Begitu pun, anggapan ini boleh dikata timbul sebagai reaksi estetis dan karenanya tidak perlu terlalu dipikirkan. Namun, kalau pun kami bereaksi tidak simpatik terhadap usulan mutasi terarah, alasannya adalah karena usulan-usulan semacam itu kerap diajukan oleh orang-orang yang dengan keliru berpikir bahwa teori tersebut *dibutuhkan*: mereka yang tidak memahami bahwa seleksi semata-mata cukup untuk memungkinkan terjadinya evolusi, sekalipun mutasinya acak. Salah satu cara mendramatisir kecukupan seleksi nonacak adalah dengan menekankan bahwa mutasi, oleh teori ini, *diizinkan* untuk terjadi secara acak. Namun, seperti saya katakan tadi, bagi teori ini mutasi *tidak harus* acak dan, tentu saja, bukan dalih untuk menyatakan bahwa nila keacakan setitik merusak susu teori sebelanga. Mutasi boleh jadi acak, tetapi seleksi sudah pasti tidak.



Sebelum kita tinggalkan si rusa yang menggil bekunya di luar sana, ada satu varian dari teori mutasi mujur yang mungkin melintas di benak Anda saat membaca tiga paragraf terakhir. Barangkali memang sulit membayangkan cara tubuh ‘mengetahui’ bahwa cuaca dingin membutuhkan mutasi ke arah bulu yang lebih tebal, sementara cuaca panas membutuhkan mutasi ke arah sebaliknya. Namun, agak lebih mudah untuk membayangkan bahwa laju mutasi mungkin dapat diprogram terlebih dahulu untuk sembarang mengembang ke segala arah, di masa-masa penuh cobaan. Dasar pikir intuitifnya boleh diuraikan sebagai berikut. Sebuah krisis baru, seperti zaman es atau zaman suhu panas ekstrem, dirasakan oleh tubuh sebagai tekanan. Tekanan tinggi yang saya rasakan – entah karena suhu dingin, suhu panas, kekeringan, entah karena sebab lain apa pun – menandakan *adanya ketidakcocokan* antara peranti tubuh saya dengan kondisi-kondisi terkini. Mungkin bagi saya sudah terlambat, tetapi mungkin sebagian keturunan saya akan menjalani hidup yang lebih baik jika saya memutasikan gen-gen di organ-organ seks saya tanpa pilih-pilih arah. Apa pun krisis lingkungannya (badai dingin, badai panas, kekeringan, banjir), anak-anak mutan saya yang ternyata mutasinya salah arah (barangkali, mayoritas dari mereka) akan mati. Namun, toh mereka akan mati juga jika musibahnya cukup parah. Mungkin dengan menghasilkan keturunan makhluk-makhluk mutan, seekor binatang lebih berpeluang menghasilkan seekor anak yang lebih pandai bertahan hidup di hadapan krisis baru dari dirinya sendiri.

Memang ada gen-gen yang efeknya adalah mengontrol laju mutasi pada gen-gen yang lain. Teorinya, dapat diketengahkan

argumen bahwa ‘gen-gen mutator’ ini bisa dipicu oleh tekanan, dan kecenderungan semacam itu boleh jadi dipilih oleh semacam seleksi alam tingkat tinggi. Apa lacur, teori ini ternyata sama tak berdasarnya dengan teori mutasi mujur terarah yang kita sebutkan sebelumnya. Pertama, tidak ada bukti yang mendukung kebenarannya. Selain itu, ada kerumitan-kerumitan teoretis yang mendalam pada pandangan bahwa naiknya laju mutasi membuatnya lebih dipilih oleh seleksi alam. Argumennya bersifat umum dan menggiring kita ke kesimpulan bahwa gen-gen mutator akan selalu cenderung sirna dari populasi, dan hal ini akan berlaku pula pada hewan-hewan tertekan yang kita misalkan tadi.

Ringkasnya, argumen umum tersebut dinyatakan sebagai berikut. Setiap hewan yang berhasil hidup cukup lama untuk memiliki keturunan pastilah sudah lumayan baik. Jika yang sudah lumayan baik diubah secara acak, kemungkinan besar hasilnya akan lebih buruk. Dan, kenyataannya, mayoritas besar mutasi memang memperburuk situasi. Benar bahwa segerintir mutasi dapat memperbaiki situasi – pada akhirnya, itulah alasan evolusi melalui seleksi alam dapat terjadi. Juga benar bahwa sebuah gen mutator, dengan memacu laju mutasi totalnya, dapat membantu pemiliknya untuk memunculkan hal yang langka dan berharga, yaitu mutasi ke arah lebih baik. Bila hal itu terjadi, salinan dari gen mutator itu sendiri akan berkembang untuk sementara, karena ia akan berbagi tubuh dengan mutasi lebih baik yang telah ia bantu pembentukannya. Anda mungkin mengira hal ini merupakan seleksi alam positif yang menguntungkan gen mutator dan, maka dari itu, dengan demikian, laju mutasi dapat bertambah. Sayangnya, tidak berhenti di situ.



Pada generasi-generasi berikutnya, reproduksi seksual akan menjalankan kerja pencampuran, penyusunan ulang dan pemaduan ulang gen-gen yang berbagi tubuh. Seiring generasi berganti generasi, gen mutator terlepas sendiri dari gen baik yang dibentuknya: Sebagian individu akan lahir dengan gen baik saja, sementara sebagian lain dengan mutator itu saja. Gen baik itu sendiri akan terus dipilih oleh seleksi alam untuk lanjut dan dapat makin dominan di populasi-populasi berikutnya. Namun, gen mutator malang yang menciptakannya tersingkir oleh pencampuran seksual. Seperti semua gen lainnya, nasib jangka panjang gen mutator itu bergantung pada efek-efek *reratanya*: efek-efeknya yang dirata-ratakan pada semua tubuh yang memuatnya, dalam jangka panjang. Efek-efek rerata gen baik yang diciptakan oleh mutator itu baik, dan gen baik akan bertahan hidup di tubuh yang kian banyak jumlahnya pada populasi tersebut. Tapi efek-efek rerata si mutator itu buruk dan, terlepas dari kilas manfaatnya yang terjadi sesekali, secara rerata si mutator akhirnya akan disingkirkan oleh seleksi alam. Sebagian besar tubuh yang memuatnya akan menjadi tubuh yang aneh-tapi-nyata atau mati.

Argumen yang kontra pada kemungkinan dipilihnya gen-gen mutator secara positif bertumpu pada asumsi bahwa reproduksinya bersifat seksual. Jika reproduksinya aseksual, fase ‘pencampuran’ pada argumen tersebut tidak ada. Gen-gen mutator dapat diloloskan oleh seleksi alam untuk jangka waktu yang panjang karena, tanpa seks, mereka tidak terlepas dari gen-gen baik yang sesekali mereka ciptakan, dan mereka bisa ‘membonceng’ di belakang gen-gen baik dari generasi ke generasi. Bila reproduksinya aseksual, mutasi baik yang baru



dapat mengawali klon baru yang berisi individu-individu yang tumbuh subur. Mutasi buruk yang baru akan lekas

hilang, sirna bersama subklona berisi makhluk-makhluk garibnya. Jika mutasi yang baik cukup baik, klonanya akan terus berkembang, dan semua gen di dalamnya, yang buruk sekalipun, akan meraup keuntungan. Yang buruk dapat berkembang karena, meski berefek buruk, kualitas rerata dari gen-gen di klon tersebut positif. Dan di antara para pembonceng yang makmur ini akan ada gen mutator yang telah menciptakan mutasi baik tersebut. Terkait dengan si mutasi baik itu sendiri, ia akan ‘ingin’ mencampakkan beban gen-gen buruk, tidak terkecuali si mutator yang menciptakannya. Mutasi yang baik itu, andai ia dapat berpikir, akan mendambakan reproduksi seksual sebagai sarana bersih-bersihnya. Andaikan jasad-jasadku bisa bersanggama, ujarnya, akan kucampakkan gerombolan pembonceng pembawa sial ini. Biarlah aku dinilai atas dasar budiku sendiri. Sebagian jasad yang mengandungku akan buruk, sebagian lain baik, tapi *secara rerata* aku akan bebas memetik manfaat dari efek-efek baikku sendiri. Di pihak lain, gen-gen buruk tidak ‘berhasrat’ untuk reproduksi seksual: Hidup mereka sudah enak. Kalau harus terjun sendiri ke huru-hara genetik yaitu seks, mereka akan lekas ringsek.

Argumen ini bukan merupakan penjelasan tentang mengapa ada reproduksi seksual, walau mungkin dapat dijadikan dasar untuk penjelasan semacam itu. Ketika tadi saya katakan bahwa gen-gen baik diuntungkan dengan adanya seks, sementara gen-gen buruk diuntungkan dengan tiadanya seks, saya sama sekali tidak sedang menjelaskan mengapa seks itu ada. Ada banyak teori tentang mengapa seks ada dan tak satu

pun di antaranya yang betul-betul meyakinkan. Salah satu teori yang paling awal dikemukakan, ‘Roda Gigi Searah Muller’ (*‘Muller’s Ratchet’*), merupakan versi lebih ketat dari teori yang tadi saya ungkapkan secara informal dengan kata ‘keinginan’ gen-gen baik dan gen-gen buruk. Pembahasan saya tentang gen-gen mutator dapat dianggap sebagai bumbu untuk teori Muller. Reproduksi aseksual tidak hanya mengizinkan gen-gen buruk berakumulasi di populasinya, tetapi juga giat mendorong gen-gen mutator. Inilah yang kemungkinan menyegerakan kepunahan klon-klona aseksual atau, dengan kata lain, memacu gerakan Roda Gigi Searah Muller. Tapi persoalan seks dan alasan eksistensinya, Roda Gigi Searah Muller dan lain sebagainya, adalah cerita yang lain dan yang sulit dituturkan. Mungkin suatu saat nanti akan terkumpul nyali saya untuk membahasnya secara menyeluruh dan menulis sebuah buku tentang evolusi seks.

Tapi kita sudah melantur. Intinya adalah, bila ada reproduksi seksual, fenomena mutasi dihukum oleh seleksi alam, sekalipun beberapa mutasi tersendiri (yang segelintir jumlahnya) dapat sesekali diloloskan oleh seleksi alam. Hal ini berlaku bahkan di masa penuh tekanan, yang tadi katanya dapat memacu laju mutasi. Kecenderungan untuk bermutasi pastilah buruk, sekalipun kadang kala ternyata ada mutasi yang baik. Idealnya, walau terdengar agak paradoksal, seleksi alam memilih laju mutasi nol. Untunglah bagi kita, dan bagi keberlangsungan evolusi, pintu surga genetik ini tak kunjung terbuka. Seleksi alam, tahap kedua dalam proses Darwinian, adalah dorongan nonacak ke arah perbaikan. Mutasi, tahap pertama di proses ini, bersifat acak dalam arti tidak mendorong ke arah perbaikan. Oleh karena itu, pada

dasarnya, semua perbaikan itu keberuntungan – dan itulah alasan orang mengira Darwinisme teori kebetulan. Tapi mereka salah besar.

Keyakinan bahwa seleksi alam lebih memilih laju mutasi nol, dan bahwa mutasi tidak diarahkan, tidak menghalangi kemungkinan menarik, yang saya namai ‘evolusi evolvabilitas’ dan saya wacanakan dalam sebuah esai dengan judul yang sama. Saya akan menjelaskan versi barunya – embriologi kaleidoskopis – di Bab 7. Sementara itu, kita kembali dahulu ke seleksi alam, pihak kedua dalam kemitraan Darwinian. Meski mutasi diizinkan untuk bersifat acak dan, dalam satu pengertian pentingnya, hampir pasti acak, hakikat inti seleksi alam adalah sifatnya yang nonacak. Dari semua serigala yang mungkin bertahan, sebuah sampel nonacak – yang berkaki paling lincah, yang berotak paling cerdik, yang berindra dan bertaring paling tajam – adalah yang benar-benar bertahan dan mewariskan gen-gennya. Alhasil, gen-gen yang kita lihat di masa kini adalah salinan-salinan dari sebuah sampel nonacak gen-gen yang pernah ada di masa lalu. Setiap generasi adalah ayakan gen. Gen-gen yang masih ada setelah sejuta generasi pengayakan, telah mampu lolos dari ayakan tersebut. Gen-gen itu telah berperan serta dalam konstruksi embrionik satu juta tubuh tanpa gagal sekali pun. Tiap-tiap dari sejuta tubuh tersebut telah hidup hingga dewasa. Tak satu pun di antara mereka yang terlalu tidak menarik sehingga gagal bercinta – ‘tidak menarik’ berarti apa pun yang tidak menarik bagi calon pasangan dari spesies yang bersangkutan. Tiap-tiap tubuh tersebut terbukti mampu melahirkan atau menurunkan sekurang-kurangnya satu anak. Ayakannya ayakan yang amat pilih-pilih. Gen-gen yang lolos ke masa

depan bukanlah sebuah sampel acak, melainkan elite. Mereka telah berhasil menjadi sintasan zaman-zaman es dan kekeringan, wabah dan pemangsa, merosot dan melonjaknya populasi. Mereka telah berhasil melalui berbagai perubahan iklim, yang tidak sekadar berarti hujan, es, dan kekeringan. Mereka telah melalui berbagai perubahan iklim gen penyerta, karena sebagian porsi dari sebuah gen, bila ada reproduksi seksual, akan berganti partner dalam setiap generasi; gen-gen yang sintas adalah yang berkembang ketika bersinggungan dengan sampel-sampel beruntun dari gen-gen keseluruhan spesiesnya, yang berarti gen-gen lain yang pandai bekerja sama dengan gen-gen yang lain pada spesies tersebut. Sebagian besar dari iklim yang harus dilalui sebuah gen adalah gen-gen yang lain pada spesies tersebut: handai tolannya di ‘Sungai dari Eden’ yang mengalir melalui rentetan tubuh dari generasi ke generasi. Beragam spesies, yang mengalir pisah melalui cabang-cabang sungai itu, dapat dianggap sebagai iklim-iklim mikro tempat beragam kelompok gen harus bertahan hidup.

Supaya sederhana, mutasi kita sebut sebagai tahap pertama dalam proses Darwinian dan seleksi alam tahap keduanya. Tetapi sebutan ini menyesatkan bila dipahami dalam arti bahwa seleksi alam ongkang-ongkang kaki menunggu mutasi, yang lantas entah ditolak entah diloloskan, dan penantiannya diulang kembali. Memang bisa begitu: Seleksi alam semacam itu bisa saja terjadi, dan mungkin memang terjadi, di suatu tempat di alam raya ini. Tapi kenyataannya, di planet ini biasanya bukan begitu. Terdapat kolam besar variasi, yang awalnya diisi dengan cucuran mutasi, tetapi diaduk dan dikobok menjadi variasi yang lebih besar lagi oleh reproduksi

seksual. Variasi awalnya muncul karena mutasi, tetapi mutasi bisa jadi sudah cukup tua pada saat seleksi alam datang menghampiri untuk memprosesnya.

Contohnya, kolega saya di Oxford, mendiang Bernard Kettlewell, terkenal karena kajiannya atas evolusi ngengat berwarna gelap (hampir hitam) pada spesies yang tadinya hanya berwarna cerah. Pada spesies yang secara khusus dipelajarinya, *Biston betularia*, individu-individu berwarna gelap cenderung sedikit lebih tangguh dari yang berwarna cerah. Namun, di daerah pedesaan yang tidak tercemar, keberadaan mereka langka karena mudah terlihat dan dimakan burung. Di daerah-daerah industri, yang pohon-pohnnya menghitam karena polusi, mereka lebih tersamarkan ketimbang yang berwarna cerah dan, alhasil, kemungkinan dimangsanya lebih kecil. Hal ini juga memungkinkan mereka untuk menikmati keuntungan tambahan dari ketangguhan alamnya. Peningkatan jumlah ngengat berwarna gelap, hingga secara angka mendominasi daerah-daerah industri sejak pertengahan abad ke-19, sungguh pesat dan merupakan salah satu contoh terbaik bukti seleksi alam pada praktiknya. Dan sekarang, berikut alasan diketengahkannya kasus ini di sini. Orang kerap menyangka bahwa, setelah Revolusi Industri, seleksi alam hanya memproses satu mutasi yang baru. Justru sebaliknya, kita dapat yakin bahwa ngengat-ngengat berwarna gelap sudah ada dari dahulu – usianya saja yang pendek. Seperti kebanyakan mutasi lainnya, mutasi yang ini pun telah terjadi berulang kali; hanya saja, ngengat-ngengat berwarna gelap selalu cepat mati dicatuk burung. Ketika keadaan berubah setelah Revolusi Industri, barulah seleksi alam mendapat

segelintir gen warna gelap yang siap pakai di kolam gen itu untuk diseleksi.

Mutasi dan seleksi alam telah kita identifikasi sebagai bahan-bahan yang harus ada agar evolusi terjadi. Keduanya akan muncul dengan sendirinya, di planet mana pun, apabila tersedia bahan yang lebih mendasar, yang sulit – meski tentu tidak mustahil – didapatkan. Bahan dasar yang sulit ini adalah hereditas. Agar seleksi alam dapat terjadi, di mana pun di alam semesta ini, harus ada silsilah-silsilah makhluk yang kemiripannya dengan leluhur langsungnya lebih dari kemiripannya dengan anggota-anggota lain populasi tersebut pada umumnya. Hereditas tidak sama dengan reproduksi. Reproduksi dapat terjadi tanpa hereditas. Api yang membakar semak belukar dapat bereproduksi tanpa hereditas.

Bayangkan padang rumput yang kering kerontang dan luasnya berkilo-kilometer ke segala penjuru. Di suatu tempat di sana, seorang perokok dengan ceroboh membuang korek api yang masih menyala dan tak lama semua rumput di situ marak dilalap si jago merah. Biarkan si perokok tadi lari menjauh, terbirit-birit dan terengah-engah, tetapi arahkan perhatian pada cara apinya menyebar. Api itu tidak hanya terus meluas dari titik awalnya, tetapi percikan-percikannya juga beterbangun di udara. Percikan-percikan, atau untaian-untaiannya rumput kering yang terbakar, ini jauh dibawa angin dari titik asal api. Ketika akhirnya mendarat, percikan tersebut menyulut api baru di tempat lain di padang rumput yang gersang dan kersang itu. Kemudian, api baru itu mengirim bunga-bunga api yang mengobarkan api-api baru di tempat yang lain lagi. Boleh dibilang, api-api ini tengah menikmati semacam kegiatan reproduksi. Tiap api baru memiliki satu

induk api, yaitu api yang menghamburkan percikan yang menyulutnya. Dan ia pun punya satu nenek api, satu buyut api, dan seterusnya hingga api leluhur yang menyala gara-gara korek api bandel tadi. Satu api baru hanya bisa berinduk satu tetapi bisa beranak lebih dari satu karena ia bisa melambungkan lebih dari satu percikan ke berbagai arah. Kalau Anda menonton seluruh kejadian ini dari ketinggian dan dapat merekam riwayat dari tiap sulutan, Anda bisa menggambar pohon silsilah keluarga api di padang rumput tersebut.

Nah, pokok penting dari cerita ini adalah, kendati ada reproduksi di antara api-api tersebut, tidak ada *hereditas* sejati. Supaya ada hereditas sejati, tiap api juga harus mirip dengan induknya, lebih dari kemiripannya dengan api-api yang lain pada umumnya. Tak perlu bingung *membayangkan* api yang mirip dengan induknya. Hal itu bisa terjadi. Api memang beragam, memang punya ciri-ciri sendiri, sama seperti manusia. Api bisa punya warna nyala khasnya sendiri, warna asapnya sendiri, ukuran kobarnya sendiri, kadar bisingnya sendiri, dan seterusnya. Ia bisa mirip dengan induknya, dalam hal ciri-ciri yang disebutkan ini. Apabila, secara umum, ciri-ciri api *memang* mirip dengan induknya, boleh dikata ada hereditas sejati. Tapi nyatanya, kemiripan api dengan induknya tidak lebih dari kemiripannya dengan api-api lain yang menyala di beberapa tempat di padang rumput itu. Tiap kobaran mendapatkan sifat-sifat khasnya, ukuran maraknya, warna asapnya, volume deraknya, dan seterusnya, dari lingkungan sekitar; dari jenis rumput yang kebetulan tumbuh di tempat pijarnya jatuh; dari kadar kekeringan rumput di sana, dari kecepatan dan arah angin yang meniupnya. Ini

semua sifat-sifat area lokal tempat percikan api mendarat. Bukan sifat-sifat induk api yang menjadi asal-muasal percikan tersebut.

Agar ada hereditas sejati, tiap pijar harus membawa serta sifat-sifat, khazanah khas, dari induk apinya. Contohnya, misalkan ada api yang nyalanya kuning, ada yang merah, ada yang biru. Jika api kuning melontarkan percikan yang menyulut api kuning, sementara api merah melontarkan percikan yang menyulut api merah, dan seterusnya, barulah ada hereditas sejati. Namun, bukan itu yang terjadi. Kalau ada api bernyala biru, kita menduga, ‘Pasti ada tembaga sulfat di area ini.’ Bukan, ‘Api ini pasti disulut pijar dari api biru di tempat lain.’

Dan, tentu, di titik inilah terletak perbedaan kelinci dan manusia dan rumput dandelion dengan api. Jangan terkecoh fakta bahwa kelinci punya dua induk dan empat kakek-nenek sementara api hanya punya satu induk dan satu nenek. Perbedaan ini penting, tetapi bukan perbedaan yang saat ini kita bicarakan. Mungkin akan lebih mudah kalau contohnya bukan kelinci, tetapi serangga tongkat atau kumbang kecil yang betinanya bisa memiliki anak perempuan, cucu perempuan, dan cicit perempuan tanpa campur tangan pejantan. Bentuk, warna, ukuran, dan perangai seekor serangga tongkat tentu saja dipengaruhi oleh tempat dan iklim asuhannya. Tetapi hewan ini juga dipengaruhi oleh percikan yang terbang hanya dari induk ke anak.

Lalu apa gerangan percikan misterius yang terbang dari induk ke keturunannya, tetapi tidak dari api ke api? Di planet ini, percikan itu adalah DNA. Molekul paling menakjubkan di

dunia. Bayangkan DNA sebagai informasi yang digunakan tubuh untuk membuat tubuh seperti dirinya. Akan lebih tepat lagi jika kita melihat tubuh sebagai wahana yang digunakan DNA untuk membuat lebih banyak DNA seperti dirinya. Semua DNA di dunia, pada tiap titik waktu, seperti saat ini misalnya, telah turun melalui sederet utuh para leluhur yang berhasil. Kecuali pada kasus kembar identik, tiap individu memiliki DNA yang unik. Beda-beda di antara DNA pada tiap individu sungguh mempengaruhi ketahanan hidup dan kansnya mereproduksi DNA yang sama. Karena ini begitu penting, saya ulangi: DNA yang berhasil menyusuri sungai waktu adalah DNA yang, selama ratusan juta tahun, telah menghuni tubuh-tubuh para leluhur yang berhasil. Jumlah bakal leluhur yang mati di usia muda, atau gagal menemukan kawan-kawinnya, berlimpah-ruah. Tetapi semua DNA mereka sudah sirna dari muka bumi.

Di titik ini, orang sering salah mengira bahwa sesuatu – ibaratnya, semacam ramuan kesuksesan, sejenis minyak suci – dari tubuh-tubuh leluhur baik dan berjaya ini ‘ikut melumuri’ DNA yang melewatinya. Hal itu sama sekali tidak terjadi. Sungai DNA yang mengalir melalui kita menuju masa depan adalah sungai murni yang (mengesampingkan mutasi) meninggalkan kita dengan keadaan yang sama persis seperti saat mendatangi kita. Memang, DNA terus-menerus dicampur dalam rekombinasi seksual. Separuh DNA dalam diri Anda berasal dari ayah dan separuh lagi dari ibu. Tiap-tiap sel sperma atau sel telur Anda akan mengandung campuran unik yang teracik dari anak sungai genetik dari ayah dan anak sungai genetik dari ibu Anda. Tapi argumen inti yang saya ketengahkan tetap benar. Para leluhur yang berhasil ini sama



sekali tidak ‘melumuri’ gen-gennya dengan setetes apa pun saat mereka lewat menuju masa yang jauh di depan sana.

Penjelasan Darwinian atas alasan pandainya makhluk hidup menjalankan perannya sangatlah sederhana. Pandai karena kearifan yang terkumpul dari para leluhurnya. Tapi kearifan ini bukan kearifan yang dipelajari atau diperoleh lewat usaha sendiri, melainkan yang tak sengaja diwarisi karena mutasi-mutasi acak yang, untungnya, baik – kearifan yang kemudian secara selektif dan nonacak direkam dalam basis data genetik spesiesnya. Pada tiap generasi, kadar keberuntungannya tidak besar: cukup kecil untuk bisa dipercaya, bahkan oleh para fisikawan skeptis yang saya sebutkan tadi. Tapi, karena keberuntungan tersebut telah terakumulasi selama bergenerasi-generasi, kita pun terkesima dengan kemuskilan semu hasil akhirnya. Segenap arena Darwinian bergantung pada – dan timbul karena – adanya hereditas. Saat tadi saya katakan bahwa hereditas adalah bahan dasarnya, maksud saya: Darwinisme – maka dari itu, kehidupan – mau tidak mau akan muncul di planet mana pun di alam semesta apabila hal yang sepadan dengan hereditas ada di sana.

Kita kembali ke Gunung Kemuskilan, kembali ke ‘mengikis’ kerak keberuntungan: menjelaskan hal yang tampak seperti keberuntungan besar – keberuntungan yang dibutuhkan untuk, misalnya, membuat mata dari kondisi tanpa mata – dengan mencacahnya jadi keping-keping renik keberuntungan, yang masing-masing secara kumulatif mengimbangi hal yang sudah ada sebelumnya. Kita telah melihat cara kerjanya, dengan akumulasi sejumlah besar keping-keping keberuntungan para leluhur dalam DNA yang bertahan. Di kanan-kiri segelintir individu yang hidup karena

dikaruniai berkat genetik yang baik, sejumlah besar individu yang kurang mujur bergelimpangan mati. Setiap generasi punya kalangan Darwinian gagalnya sendiri, tetapi setiap individu diturunkan hanya dari segelintir individu sukses pada generasi sebelumnya.

Pesan dari gunung ada tiga jumlahnya. Pertama adalah pesan yang tadi sudah kita kemukakan: Pantang ada loncatan tiba-tiba ke atas – tak ada lonjakan terjal dalam kompleksitas tertata. Kedua, tak boleh terperosok turun – spesies tak boleh mundur ke kondisi lebih buruk sebagai ancang-ancang menuju kondisi lebih baik. Ketiga, ada kalanya terdapat lebih dari satu puncak – lebih dari satu cara memecahkan masalah yang sama, dan cara-cara itu sama-sama mekar di dunia.

Terhadap bagian tubuh mana pun dari hewan atau tumbuhan apa pun, wajar bila kita bertanya seperti apa terbentuknya bagian itu melalui transformasi gradual suatu bagian tubuh lain dari leluhur pendahulunya. Kadang-kadang, kita dapat menelusuri prosesnya melalui fosil-fosil yang beruntun dari masa ke masa. Contoh terkenalnya adalah penurunan gradual tulang-tulang telinga mamalia kita – tiga buah tulang yang meneruskan bunyi (dengan pencocokan impedans yang amat elegan, barangkali Anda tahu jargon teknisnya) dari gendang telinga ke telinga bagian dalam. Bukti fosil dengan jelas menunjukkan bahwa ketiga tulang ini, yang disebut tulang martil, tulang landasan, dan tulang sanggurdi, diturunkan langsung dari tiga tulang berkaitan yang, pada leluhur reptilia kita, membentuk sendi rahang.

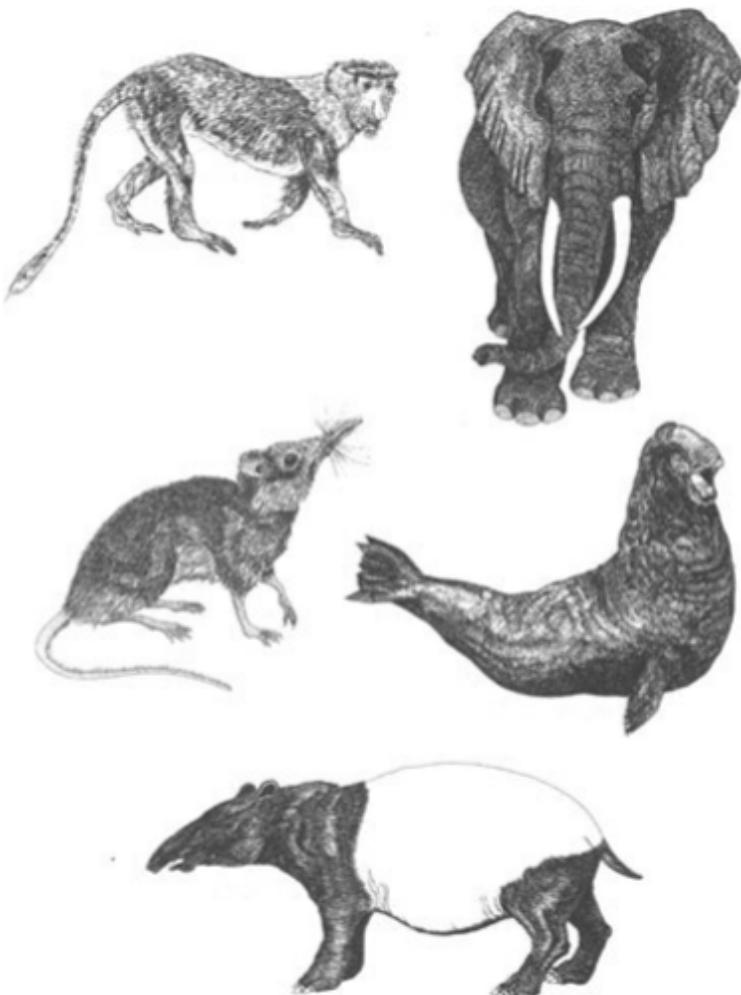
Kerap kali, catatan fosil tidak selengkap dan seutuh itu. Kita terpaksa menebak titik-titik antaranya, kadang dengan

sepercik ilham dari hewan-hewan modern lain yang mungkin atau mungkin bukan kerabatnya. Belalai gajah tidak bertulang dan tidak memfosil, tetapi tak perlu fosil untuk menyadari bahwa belalai gajah awal mulanya adalah hidung. Belalai yang sekarang... baiknya saya kutip saja langsung dari sebuah buku yang selalu membuat hati saya pilu setiap kali membacanya: *Battle for the Elephants*, yang ditulis oleh sepasang pahlawan, lain dan Oria Douglas-Hamilton. Keduanya menulis tiap-tiap bab secara bergantian dan berikut ini uraian mencekam Oria, di halaman 220, tentang sepotong ‘sepah’ gajah yang dia saksikan di Zimbabwe:

Kulihat salah satu dari belalai-belalai terbuang itu dan takjub membayangkan entah berapa juta tahun telah berlalu hingga tercipta keajaiban evolusi seperti itu. Dilengkapi lima puluh ribu otot dan dikendalikan oleh otak yang sanggup menangani organ yang demikian rumitnya, belalai mampu merenggut dan mendorong dengan daya berton-ton. Namun, di saat yang sama, ia juga mampu melakukan kerja-kerja halus seperti memetik kacang polong kecil untuk dicetuskan di mulut. Organ serbaguna ini adalah selang yang mampu menampung empat liter air untuk diminum atau disemburkan ke tubuh, menjadi jari yang mengacung dan menjadi trompet atau pelantang suara.

Belalai juga memiliki fungsi-fungsi sosial: belaian, rayuan, penghiburan, sapaan, dan pelukan yang jalin-jenalin. Dan, pada gajah-gajah jantan, belalai bisa menjadi senjata untuk memukul dan bergumul layaknya pegulat saat gading-gading berbentrokan dan tiap pejantan, pura-pura ataupun sungguh-sungguh, mencoba menunjukkan dominasinya. Tapi di situ ia terkulai, buntung seperti begitu banyak belalai gajah yang pernah kulihat di seluruh Afrika.

Ada lara membuncah di hati karena nadam ini...



Gambar 3.1 Gajah Afrika, *Loxodonta Africana*, dan mamalia-mamalia hidung panjang yang tidak saling berkerabat dan berhidung panjang karena alasannya sendiri-sendiri: (berlawanan arah jarum jam, dari kiri atas) bekantan, *Nasalis larvatus*; tikus gajah, *Rhynchocyon petersi*; tapir Asia, *Tapirus indicus*, dan gajah laut selatan, *Mirounga leonina*.

Di sini, pesan dari gunungnya adalah bahwa di antara para leluhur gajah pasti ada serangkaian hewan perantara dengan hidung yang sekiranya panjang seperti tapir, atau tikus gajah, atau bekantan, atau gajah laut. Makhluk-makhluk ini tidak berkerabat dekat dengan gajah (atau satu sama lain). Hidung-hidung panjang mereka adalah hasil evolusi yang terjadi secara terpisah dan kemungkinan besar karena alasan yang berbeda-beda pula (Gambar 3.1).

Dalam evolusi gajah dari para leluhur berhidung pendeknya, pastilah terdapat rentetan halus dan gradual hidung-hidung yang mantap memanjang, lereng landai otot-otot yang menebal dan saraf-saraf yang diburai dengan lebih rumit lagi. Pastilah, setiap kali panjang belalai rata-rata bertambah satu inci belalai tersebut jadi lebih piawai. Pikiran seperti yang berikut ini mustahil ada: Belalai berukuran sedang tak berguna karena ia hanya semenjana – titik gamang yang medioker – tetapi tak apa, tunggu beberapa juta tahun lagi, nanti akan panjang juga. Tak ada hewan yang bertahan hidup murni dengan menapaki jalan evolusi menuju sesuatu yang lebih baik lagi. Hewan bertahan hidup dengan makan, tidak dimakan, dan bereproduksi. Jika belalai semenjana nyatanya kalah efisien untuk tujuan-tujuan ini dari hidung kecil atau belalai besar, belalai besar itu takkan pernah berevolusi.

Hanya karena belalainya harus berguna pada semua tahap perantaranya, tidak berarti ia harus berguna untuk tujuan yang sama di sepanjang tahap-tahap perantara itu. Di awal-awal, pemanjangan bisa saja memberi manfaat yang tidak ada kait-pautnya dengan memungut benda-benda. Boleh jadi, awalnya, hidung memanjang untuk mendongkrak indra penciuman, seperti pada tikus gajah; atau menjadi penalun

panggilan, seperti pada gajah laut; atau hiasan untuk memikat pasangan, seperti pada – terlepas dari selera estetis kita manusia – bekantan. Di lain pihak, barangkali juga kegunaannya sebagai ‘tangan’ timbul cukup dini dalam evolusi gajah, ketika ukurannya masih agak pendek. Dugaan ini masuk akal bila kita bandingkan dengan tapir yang menggunakan hidungnya untuk merenggut dan menuapkan dedaunan ke mulut. Evolusi perangkat-perangkat serupa yang terjadi secara terpisah pada berbagai jenis hewan dapat menebalkan pemahaman kita atas satu sama lain.

Pada kasus spesifik belalai gajah, ada bukti tak langsung dari bagian-bagian keras dari tengkorak yang memfosil, khususnya gading dan tulang-tulang yang terkait dengannya. Dua spesies gajah modern adalah penyintas satu-satunya dari hewan-hewan bergading yang dahulu tersebar luas dan tumbuh subur di setiap benua. Gading gajah modern adalah gigi-gigi seri atas yang diperbesar berkali-kali lipat, tetapi banyak rupa fosil, seperti sebagian dari fosil-fosil mastodon, lebih menonjol gigi-gigi seri bawahnya yang juga mengacu ke depan. Terkadang gigi-gigi tersebut besar dan runcing seperti gading yang kini kita lihat terdapat hanya pada rahang atas. Pada jenis-jenis yang lain, bentuknya papak sehingga kedua

gigi raksasa tersebut membentuk sekop atau sungkur gading lebar yang memperpanjang garis rahang bawahnya – dan kemungkinan dipakai untuk mencabut tumbuhan akar dan umbi. Sekop itu terhunus hingga jauh di depan rahang bawah sampai-sampai bibir atasnya tak dapat menjangkau makanan yang digali. Ada kemungkinan belalai tahap awal itu mulanya diulur untuk mengimbangi sekop dan merenggut makanan yang digali dengannya. Lantas, kita dapat menduga belalai dini

ini tambah pandai mengerjakan tugasnya sehingga mulai dipakai tanpa sekop. Belakangan, setidaknya pada silsilah-silsilah yang telah bertahan hidup, sekop itu sendiri mengerut sementara belalainya seolah terluput dari tarikan ombak yang surut. Rahang bawahnya kembali ke ukuran yang serupa dengan proporsi asalnya, dan yang tinggal adalah belalai yang kini sepenuhnya mandiri. Baca buku bagus *The Theory of Evolution* karya John Maynard Smith, halaman 291-4, untuk uraian yang lebih lengkap tentang evolusi belalai gajah.

Kata 'pra-adaptasi' dipakai pada kasus organ yang awalnya digunakan untuk tujuan tertentu dan kemudian, dalam evolusi, diambil alih untuk tujuan lain. Gagasan yang mencerahkan, karena kerap menyelamatkan kita dari kebingungan asal-mula evolusi. Duri-duri landak kini menjadi senjata ampuh. Duri-duri tersebut tidak mencuat begitu saja, tetapi awalnya bulu yang dimodifikasi, di'pra-adaptasi'kan untuk tujuan yang sama sekali berbeda: menghangatkan tubuh. Banyak mamalia memiliki kelenjar-kelenjar bau yang amat sempurna untuk tujuan ahli. Titik awal kemunculannya mungkin tampak seperti misteri hingga Anda menelitiinya dengan mikroskop dan menyadari bahwa kelenjar-kelenjar itu dimodifikasi dari sebuah kelenjar lebih kecil yang fungsinya sangat berbeda: mengeluarkan keringat untuk mendinginkan tubuh. Kelenjar-kelenjar keringat yang belum direkonstruksi masih banyak terdapat pada bagian-bagian tubuh lain hewan yang sama. Oleh karena itu, mudah untuk membandingkannya. Kelenjar-kelenjar bau yang lain agaknya berkembang dari kelenjar minyak, yang tugas awalnya adalah melindungi bulu dengan cairan lilin. Kerap kali, bentuk pra-adaptasi dan pendahulu modernnya tidak berkaitan. Keringat



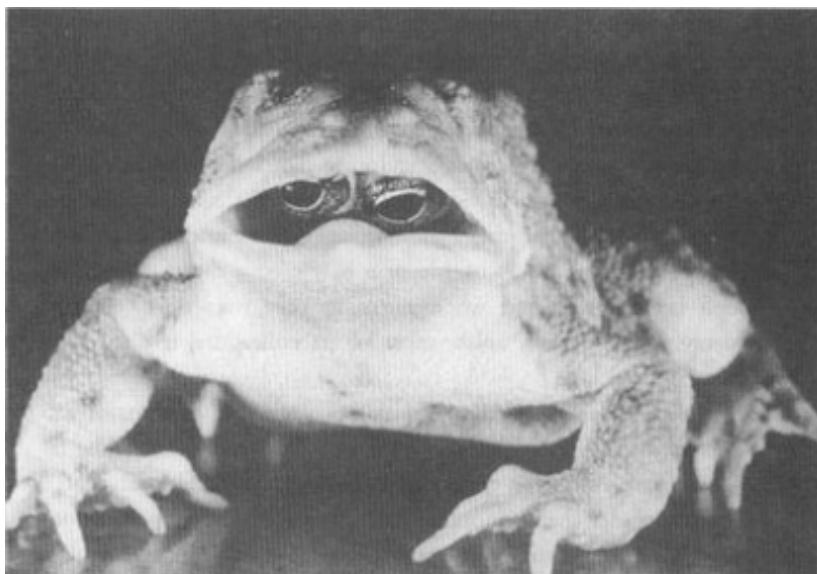
kebetulan berbau, dan kebetulan dikeluarkan ketika hewan terusik emosinya (lumrah orang berkeringat ketika merasa takut; saya pun begitu ketika ceramah penting saya tidak berjalan sesuai rencana). Oleh karena itu, wajar bila rupa pra-adaptasi terdahulu beralih menjadi rupa mitra spesialisnya.

Kadang-kadang, tidak jelas mana yang lebih dahulu – mana rupa pra-adaptasi dan mana rupa spesialisasi. Darwin, yang bertanya-tanya tentang asal-mula evolusi organ paru, mencari jawaban di kantong renang ikan. Kantong renang ini berisi gas; ikan bertulang menggunakanannya untuk mengontrol daya apung sesuai prinsip Penyelam *Cartesian* (orang-orangan di botol yang bisa ditimbul-tenggelamkan dengan menekan lembut gabus penyumbat botolnya). Menggunakan otot-otot untuk mengatur volume kantong renangnya, seekor ikan dapat naik-turun di kedalaman air sehingga bisa mengambang diam. Mekanisme ini berlaku hanya pada ikan bertulang biasa. Hiu (walau bentuknya ikan, sebenarnya lebih jauh jarak kekerabatannya dengan ikan bertulang daripada dengan kita) tidak memiliki kantong renang. Alhasil, hiu harus lebih rajin berenang agar tetap berada di kedalaman air yang diinginkan. Kantong udara tampak seperti paru, dan Darwin menduganya sebagai rupa pra-adaptasi yang menjadi titik awal evolusi paru. Para ahli zoologi modern umumnya membalik urutan ini, dan menduga kantong renanglah yang merupakan hasil modifikasi dari paru (ikan berparu masih lazim ada hingga kini). Mana pun yang lebih purba, kita perlu mencari tahu apa yang mendahulunya sebelum itu. Barangkali, paru/kantong renang muncul dari kantong di dalam perut dan awalnya memiliki fungsi pencernaan. Di setiap tahap dari evolusinya, pada setiap langkah di lereng-lereng Gunung Kemusikilan,

kantong/rongga/paru haruslah berguna bagi hewan yang menyandangnya.

Tak bisakah belalai gajah mencuat dalam satu langkah raksasa? Mengapa seekor keturunan tak dapat berbelalai seperti gajah sementara induknya berbelalai seperti tapir? Ada tiga pertanyaan di sini. Pertama, tentang bisa tidaknya terjadi mutasi dalam skala besar – makromutasi. Kedua, apabila mutasi terjadi, tentang dipilih tidaknya mutasi besar oleh seleksi alam. Ketiga, pertanyaan yang lebih rumit, tentang pengertian besar dalam konteks perubahan mutasional besar. Saya akan bahas perbedaan yang pernah saya susun di buku sebelumnya, antara ‘makromutasi Boeing 747’ dan ‘makromutasi DC8 yang Direnggangkan’.

Jawaban untuk pertanyaan pertama tadi adalah ya. Makromutasi memang terjadi. Ada kalanya, anak lahir dengan perbedaan yang radikal dan mengherankan dari kedua induknya dan dari para anggota lain spesiesnya. Kodok di Gambar 3.2, menurut fotografernya, Scott Gardner dari *Hamilton Spectator*, ditemukan oleh dua orang gadis cilik di kebun mereka di Hamilton, Ontario. Katanya, mereka menaruh hewan itu di atas meja dapur untuk difoto. Tidak ada mata di seluruh area luar kepalanya. Waktu membuka mulut, kata Tuan Gardner, hewan ini tampak lebih awas akan sekitarnya. Menurutnya, kodok ini dibawa ke Jurusan Kedokteran Hewan Universitas Guelph untuk diperiksa, tetapi sejauh ini saya belum menemukan laporan lengkap tentangnya. Hewan-hewan ganjil seperti ini menarik karena kerap kali memberi kita petunjuk tentang proses perkembangan embrionik yang normal. Walau tidak semua, misalnya pada kasus yang disebabkan talidomid, banyak jenis kelainan bawaan lahir ber-



Gambar 3.2 Makromutasi memang terjadi. Kodok aneh dengan sepasang mata pada langit-langit mulutnya ini konon ditemukan hidup liar di sebuah kebun di Kanada. Foto ini aslinya diterbitkan di sebuah harian lokal, *The Hamilton Spectator*.

sifat genetik. Akondroplasia, pemendekan tulang-tulang lengan dan kaki yang mengakibatkan tubuh kerdil dan tidak proporsional, disebabkan oleh satu gen dominan saja. Mutasi dengan efek besar seperti ini – makromutasi – kadang diistilahkan saltasi. Gen akondroplasia biasanya diwarisi dari satu orang tua. Namun, pada kasus yang jarang terjadi, gen ini muncul spontan akibat mutasi, dan seperti itulah pasti pertama kalinya ia terjadi. Mutasi dramatis yang serupa – mestinya, walau kemungkinan besar tidak pada kenyataannya – boleh jadi telah menyebabkan pemanjangan hidung yang



mendadak dan tiba-tiba dari ukuran tapir ke ukuran gajah dalam satu generasi.

Beranjak ke pertanyaan kedua, tentang, setelah makromutasi ‘sinting’ terjadi, dipilih atau tidaknya ia oleh seleksi alam, mungkin Anda merasa ini bukan pertanyaan dengan satu jawaban. Tidakkah jawabannya berbeda-beda tergantung kasusnya? Misalnya, ya untuk akondroplasia, tetapi tidak untuk anak sapi berkepala dua? Pada kasus anjing, gen yang sepadan dengan gen akondroplasia, nyatanya dipilih oleh para pembiak melalui seleksi buatan, tidak sekadar demi memenuhi selera tetapi untuk menghasilkan anjing yang berguna untuk tugas tertentu. Dachshund dibiakkan untuk mengejar musang hingga ke lubangnya, dan penyertaan gen akondroplasia berperan signifikan dalam proses pemahatan genetik yang menghasilkan ras tersebut. Barangkali, di alam liar, kadang terjadi bahwa mutasi besar seperti akondroplasia tiba-tiba menghadirkan cara hidup yang baru atau pola makan yang baru: hewan kerdil, walau kurang mampu memburu mangsa di lapangan terbuka, tiba-tiba mendapatkan bahwa, lain dari kebanyakan kawan-kawannya, ia bisa membuntuti mangsa hingga ke dalam lubang.

Para teoretikus evolusi terkadang memang menyarankan bahwa ada saltasi besar dalam perubahan evolusioner di alam liar. Genetikawan Jerman-Amerika terkenal, Richard Goldschmidt, mewacanakan teori ini dengan nama memikat yang mudah diingat: teori ‘monster harapan’. Akan saya sebutkan satu kemungkinan contohnya di Bab 7. Namun, teori Goldschmidt tidak mendapatkan dukungan luas, dan ada beberapa alasan umum untuk meragukan penting tidaknya makromutasi atau hewan-hewan ganjil dalam evolusi.

Organisme adalah rangkaian mesin yang sungguh rumit dan dirakit dengan teliti. Jika sebuah komponen mesin yang rumit, bahkan yang kurang baik fungsinya sekalipun, diubah bagian dalamnya secara besar-besaran dan acak, kemungkinan bahwa hasil akhirnya jadi lebih baik pasti amat kecil. Sebaliknya, jika bagian dalamnya diubah sedikit secara acak, hasilnya boleh jadi lebih baik. Apabila arah antena televisi Anda kurang tepat, coba putar sedikit dengan acak dan rasio kemungkinan masalahnya terpecahkan adalah 1:2. Hal ini dikarenakan, yang mana pun arah yang semestinya, ada kemungkinan 50% bahwa Anda mengarahkan antena ke sana jika memutarnya sedikit. Namun, jika antena diputar kuat dan acak, dipuntir kasar dengan sudut yang besar, masalahnya justru tambah parah. Hal ini, salah satunya, dikarenakan ada kemungkinan, sekalipun Anda memutar antena ke arah yang benar, sudut yang tepat akan terlewati. Dalam konteks yang lebih umum lagi, hal ini dikarenakan ada begitu banyak cara menyetel yang salah ketimbang yang benar. Sebuah mekanisme rumit yang sudah lumayan berfungsi tak mungkin terlalu jauh dari setelan yang tepat. Perubahan kecil dan acak mungkin menjadikannya lebih baik; atau, kalaupun jadi lebih buruk, ia tetap tak terlalu jauh dari susunan yang tepat. Akan tetapi, perubahan yang besar dan acak dapat berujung pada belantara luas susunan yang mungkin ada. Dan mayoritas sangat besar dari isi belantara itu adalah susunan yang keliru.

Lazim terjadi, mesin yang macet bisa jalan lagi setelah digetok. Tapi kenyataan ini pun tidak bertentangan dengan argumen saya. Meski ditempeleng kuat, televisi adalah perangkat keras yang kokoh dan pukulan itu tak lantas berdampak besar pada susunan komponen-komponennya. Namun pukulan itu bisa

mengubah sedikit posisi komponen mana pun yang agak longgar; dan komponen yang longgar inilah agaknya biang kerok dari kemacetan tadi.\*

Beralih ke makhluk hidup, di buku *Pembuat Arloji yang Buta*, saya menulis bahwa *sebanyak-banyaknya cara untuk hidup, tentu jauh lebih banyak cara untuk mati.* (Keterlaluan kalau saya tidak mengakui rasa girang karena kalimat ini masuk dalam *Oxford Dictionary of Quotations!*) Dari semua cara yang ada untuk menata keping-keping tubuh seekor hewan, hampir semuanya akan menghasilkan hewan yang mati; atau lebih tepatnya, hewan yang tak pernah dilahirkan. Tiap-tiap spesies hewan dan tumbuhan adalah pulau laik-guna di tengah laut luas berisi susunan laik-khayal yang sebagian besar di antaranya, jikalau mewujud, akan mati. Samudra berisi semua satwa yang boleh jadi ada ini meliputi hewan-hewan yang matanya ada di tapak kaki, hewan-hewan yang lensanya ada di telinga dan bukan di mata, hewan-hewan dengan satu sayap kiri dan satu sirip kanan; hewan-hewan dengan tengkorak perut, bukan tengkorak otak. Tak perlulah saya adakan lagi. Sudah cukuplah saya berkata-kata untuk menunjukkan bahwa pulau-pulau laik-sintas, sebesar dan sejamak apa pun, tetap kerdil dan gelintir jika dibandingkan dengan samudra ketakpraktisan yang mati.

Ketika induk memiliki anak mutan, si induk – yang hidup – pastilah berlindung aman di salah satu dari pulau-pulaunya. Satu mutasi kecil – sedikit pemanjangan tulang kaki di sini, sedikit penyesuaian sudut rahang di sana – hanya memindahkan si anak ke bagian lain dari pulau yang sama. Atau mereklamasi sebuah pulau pasir kecil lepas pantai dan mengabungkannya ke daratan kering. Akan tetapi, satu

mutasi besar – sebuah perubahan yang drastis, ganjil, dan radikal, setara dengan satu loncatan gila ke laut lepas nan biru di sana. Makhluk makromutasi itu dilontarkan ke sembarang arah, nun jauh dari pulau asalnya. Ada kemungkinan ia akan mendarat di pulau yang lain. Tapi karena pulaunya sedikit dan kecil-kecil, sementara lautnya begitu luas, kemungkinannya amat sangat kerdil. Bisa terjadi memang, tetapi sangat jarang, sekali tiap beberapa juta tahun. Dan bila terjadi, dampaknya mungkin dramatis pada lintasan evolusi.

Jangan kita terlalu mengandalkan metafora pulau ini. Pasalnya, bisa menyesatkan. Semua spesies saling berkerabat, yang berarti pastilah ada cara-cara melawat, melalui samudra kemungkinan, dari satu cara hidup ke setiap cara hidup yang lain. Metafora pulau tak berguna pada konteks itu dan metafora Gunung Kemuskilan lebih baik. Kiasan pulau ditujukan untuk mendramatisir maksud bahwa makin drastis dan radikal mutasinya makin kecil kemungkinannya lolos dari seleksi alam.

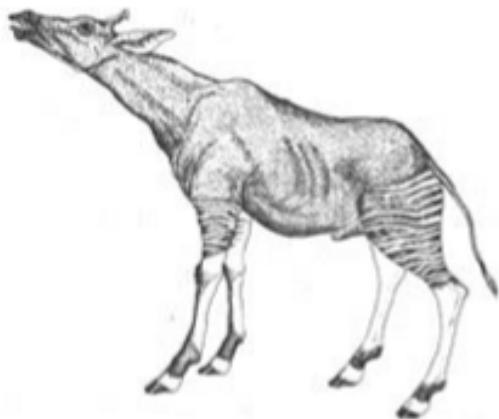
Kita juga perlu menyadari beda dari berbagai jenis makromutasi. Dengan menghadirkan satwa-satwa khayali yang bermata di tapak kaki dan berlensa di telinga, saya memusatkan perhatian pada perubahan-perubahan susunan bagian-bagian tubuh. Perubahan besar semacam ini tentu kecil sekali kemungkinannya untuk mujur dan bertahan hidup. Tetapi ada juga perubahan besar dalam hal ukuran satu bagian tubuh, tanpa harus menyusun ulang kepingan-kepingannya. Hidung bak-tapir yang mendadak mencuat jadi belalai bak-gajah adalah contohnya, jika yang terjadi hanyalah pemanjangan. Kurang jelas apakah perubahan drastis seperti



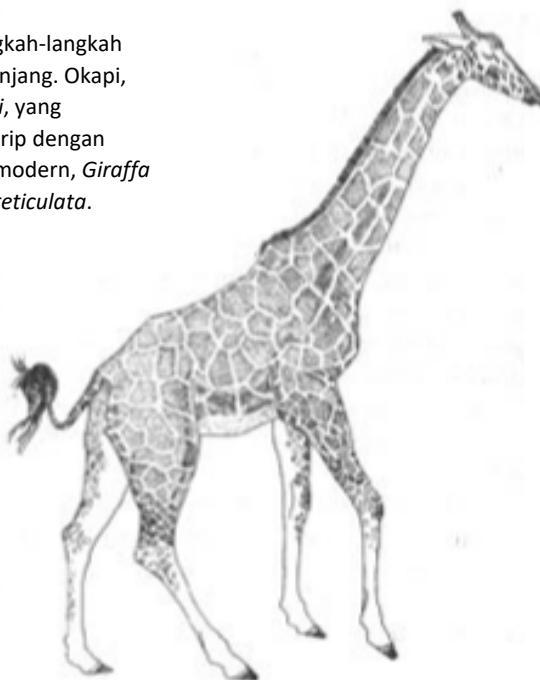
ini memang merupakan lompatan ke samudra ketakpraktisan atau kematian.

Tadi saya berjanji akan membahas makromutasi ‘Boeing 747’ dan ‘DC8 yang Direnggangkan’. Masih ingat argumen Sir Fred Hoyle tentang rongsokan barang bekas dan pesawat 747? Ada yang bilang, ia berkata bahwa evolusi, melalui seleksi alam, dari sebuah pranata yang rumit seperti molekul protein (atau, berarti juga, mata atau jantung) sama mustahilnya dengan angin topan yang tiba-tiba merangkai pesawat Boeing 747 setelah mengaduk-aduk isi tempat barang rongsokan. Ia benar kalau saja kata yang digunakannya ‘kebetulan’, bukan ‘seleksi alam’. Sayang sekali, saya terpaksa menudingnya sebagai salah satu dari sekian banyak orang yang terjerat salah kaprah bahwa seleksi alam itu kebetulan. Teori apa pun yang menuntut evolusi untuk merakit sebuah mesin baru yang kompleks seperti mata atau molekul hemoglobin, sekali gebrak dari tiada menjadi ada, terlalu berlebihan dalam menuntut kebetulan. Pada teori ini, seleksi alam hampir tak punya peran lagi. Semua pekerjaan ‘desain’ dilakukan oleh mutasi, satu mutasi besar saja. Makromutasi semacam inilah yang layak dikiaskan dengan metafora 747 dan tempat barang rongsokan, dan saya menyebutnya makromutasi Boeing 747. Makromutasi Boeing 747 tidak ada dan tidak berkaitan dengan Darwinisme.

Beralih ke analogi pesawat udara saya yang lain, pesawat DC8 yang Direnggangkan mirip dengan DC8 yang biasa, hanya saja agak lebih panjang. Desain utama DC8-nya tetap ada, tetapi sepotong struktur tabung tambahan disisipkan ke tengah-tengah badan utama pesawat. Jumlah tempat duduk, kompartemen bagasi kabin, dan semua hal lain yang secara



Gambar 3.3 Langkah-langkah menuju leher panjang. Okapi, *Okapia johnstoni*, yang kemungkinan mirip dengan leluhur jerapah modern, *Giraffa camelopardalis reticulata*.



repetitif ada di sepanjang pesawat itu pun bertambah. Sama jelasnya, kabel, tabung baja, dan karpet di sepanjang badan utama pesawat itu juga tambah panjang. Meski tak begitu kentara, pastilah ada sejumlah besar modifikasi pada bagian-bagian lain pesawat itu, sebagai konsekuensi wajib dari beban kerja baru mengangkat badan utama yang lebih panjang ke udara. Namun, secara fundamental, perbedaan antara DC8 dan DC8 yang Direnggangkan terjadi karena satu makromutasi: Badan utamanya secara mendadak dan tiba-tiba jauh lebih panjang dari pendahulunya. Tidak terdapat serangkaian titik antara yang gradual.

Jerapah telah berevolusi dari leluhur yang agak mirip dengan okapi modern (Gambar 3.3). Perubahan paling kentaranya adalah pemanjangan leher. Bisakah ini terjadi dalam satu kali mutasi besar? Soal terjadi atau tidaknya, saya yakin tidak. Tapi kalau soal bisa atau tidaknya, itu perkara lain. Mutasi Boeing 747 seperti mata kompleks yang baru – lengkap dengan diafragma iris dan lensa yang dapat difokuskan, mengada dari ketiadaan bak Pallas Athena dari kening Zeus – takkan bisa terjadi, dalam bermiliar-miliar tahun sekalipun. Namun, layaknya peregangan DC8, leher jerapah bisa saja terulur dalam satu kali mutasi (walau saya yakin faktanya tidak begitu). Apa perbedaannya? Bukan bahwa leher tampak kalah rumit dari mata. Setahu saya, leher bahkan lebih rumit mungkin. Bukan, yang penting di sini adalah kerumitan *perbedaan* antara leher terdahulu dan leher yang baru. Perbedaannya tipis, paling tidak bila dibandingkan dengan perbedaan antara tanpa mata dan mata modern. Leher jerapah memiliki susunan bagian-bagian yang sama rumitnya dengan okapi (dan agaknya dengan leluhur berleher pendek si

jerapah itu sendiri). Keduanya sama-sama memiliki rangkaian tujuh ruas tulang belakang, masing-masing dengan pembuluh darah, saraf, ikatan sendi, dan blok otot yang terkait dengannya. Perbedaannya adalah bahwa tiap ruas tulang leher jerapah jauh lebih panjang, dan semua bagian terkaitnya direnggangkan atau dijarangkan hingga jauh.

Yang perlu diperhatikan di sini adalah bahwa hanya perlu mengubah satu hal pada embrio yang sedang berkembang untuk melipatempatkan panjang lehernya. Misalkan, tinggal mengubah laju pertumbuhan primordia ruas tulang belakang dan semua hal lainnya akan mengikuti. Tapi untuk membuat mata tumbuh dari kulit gundul, yang harus diubah bukan hanya satu laju, melainkan ratusan (lihat Bab 5). Jika seekor okapi bermutasi dan menghasilkan leher jerapah, itu namanya makromutasi DC8, bukan makromutasi Boeing 747. Oleh karena itu, makromutasi Boeing 747 adalah kemungkinan yang sama sekali tak perlu dipertimbangkan. Tak ada hal baru dalam komplikasinya. Badan pesawatnya dipanjangkan, dengan segala konsekuensinya, tetapi yang terjadi adalah peregangan kompleksitas yang sudah ada, bukan penghadiran kompleksitas baru. Demikian pula adanya sekalipun jerapah memiliki lebih dari tujuh segmen di lehernya. Jumlah ruas tulang belakang di berbagai spesies ular berbeda-beda, dengan kisaran 200 hingga 350. Karena semua ular saling bersepupu, dan karena ruas tulang belakang tidak bisa muncul setengah atau seperempat, niscaya ini berarti, ada kalanya, seekor ular lahir dengan sekurang-kurangnya satu ruas tulang lebih banyak, atau lebih sedikit, dari induknya. Mutasi-mutasi ini layak disebut makromutasi dan terbukti telah dilebur ke dalam evolusi karena semua ular ini ada. Mereka adalah hasil



mutasi DC8 karena menduplikasi kompleksitas yang sudah ada, bukan 747 yang mencipta kompleksitas baru.

Ada satu hal yang dapat membantu hewan makromutasi dalam evolusi, yaitu fakta bahwa efek dari sebuah gen bergantung pada gen-gen lain yang terdapat di tubuh yang sama. Efek dari sebuah gen terhadap sebuah tubuh, yang diistilahkan efek fenotipe, tidak tertulis dengan jelas. Kode DNA dari gen akondroplasia sama sekali tidak memuat informasi yang dapat diterjemahkan oleh seorang ahli biologi molekuler sebagai ‘katai’ atau ‘kerdil’. Efek tangan dan kaki pendeknya muncul hanya bila dikelilingi oleh berbagai gen lainnya, belum lagi fitur-fitur lain dari lingkungannya. Makna sebuah gen tergantung pada konteksnya. Embrio berkembang di sebuah iklim yang dihasilkan oleh semua gen. Efek yang dimiliki sebuah gen pada embrio tersebut bergantung pada sisa iklimnya. R. A. Fisher, tokoh yang tadi saya kutip, telah mengungkapkan hal ini dahulu sekali, dengan berkata bahwa ada gen yang bertindak sebagai ‘pemodifikasi’ dari efek-efek gen yang lain. Perhatikan bahwa ini tidak berarti gen memodifikasi kode DNA gen yang lain. Tentu tidak. Gen-gen pemodifikasi hanya mengubah iklimnya sedemikian rupa sehingga memodifikasi efek-efek gen-gen yang lain pada tubuh, bukan rangkaian DNA dari gen-gen yang lain.

Seperti sudah kita lihat, (agaknya) masih bisa dibayangkan seekor indukan dengan belalai enam inci bak-tapir bisa menghasilkan anakan mutan dengan belalai lima kaki bak-gajah dalam satu generasi, akibat berubahnya satu gen – makromutasi. Agaknya mustahil kalau hidung yang baru itu langsung berperilaku layaknya belalai yang berfungsi dengan baik. Di titik inilah gen-gen ‘pemodifikasi’, dan konsep ‘iklim’

gen-gen yang lain, secara teoretis menopang bayangan tersebut. Selama makromutasi itu sekurang-kurangnya lumayan berguna, sehingga individu penyandangnya tidak mati, sejumlah gen-gen pembedakannya selanjutnya dapat membersihkan detail-detailnya dan memuluskan sudut-sudut kasarnya. Bayangkan masuknya mutasi besar ke dalam populasi tersebut sepadan dengan cobaan dahsyat, seperti zaman es. Persis seperti zaman es yang baru menyebabkan segenap kumpulan gen diseleksi, demikian pula dampak perubahan mutasional drastis terhadap tubuh yang biasa, seperti pemanjangan hidung yang tiba-tiba.

Gen-gen yang ‘membersihkan’ gara-gara terjadinya mutasi besar yang baru tidak bekerja hanya pada efek-efek paling kentara dari gen besarnya. Gen-gen ini boleh jadi menggarap suatu bagian tubuh yang tak disangka jauhnya untuk mengompensasi, memitigasi efek merugikan, atau menambah manfaat, sebuah mutasi besar. Akibat hidung yang jauh membesar, karena belalai itu menambah bobot kepala, tulang-tulang leher juga perlu diperkuat. Keseimbangan tubuh dapat berubah, dengan efek-efek beruntun, mungkin pada tulang punggung dan panggul. Semua seleksi penting ini berimbang pada puluhan gen yang memengaruhi berbagai bagian pada tubuh itu.

Kendati saya tadi mengetengahkan gagasan ‘bersih-bersih setelahnya’ dalam konteks makromutasi besar, seleksi semacam ini tentu penting dalam evolusi terlepas dari ada tidaknya makromutasi. Bahkan mikromutasi pun menimbulkan konsekuensi sehingga aksi ‘bersih-bersih setelahnya’ amat diperlukan. Setiap gen dapat bertindak sebagai pembedakan atas efek-efek semua gen lainnya.

Banyak gen saling memodifikasi efek-efeknya. Bahkan beberapa ahli sampai menyimpulkan bahwa, dari gen-gen yang memang berefek (banyak yang tidak), mayoritas di antaranya memodifikasi efek-efek mayoritas gen lainnya. Inilah aspek lain dari maksud saya ketika berkata bahwa ‘iklim’ tempat sebuah gen harus dapat sintas utamanya terdiri atas gen-gen lain dari spesies tersebut.

Walau mungkin pembahasan tentang makromutasi ini jadi terasa bertele-tele, masih ada satu sumber kerancuan lain yang harus saya antisipasi. Ada sebuah teori yang dipublikasikan dengan terampil, dan bukan tak menarik, yang dikenal dengan nama ‘kesetimbangan bersela’. Pembahasan tentang detailnya berada di luar lingkup buku ini. Namun, karena teori ini gencar dipromosikan dan luas disalahpahami, saya harus menekankan bahwa teori kesetimbangan bersela tidak memiliki – atau semestinya tidak dinyatakan memiliki – kaitan yang sah dengan makromutasi. Teori ini mengetengahkan wacana bahwa silsilah-silsilah makhluk hidup mengalami kondisi setimbang (tanpa perubahan evolusioner) dalam kurun-kurun waktu yang panjang, yang disela dengan ledakan-ledakan cepat perubahan evolusioner yang bertepatan dengan lahirnya sebuah spesies baru. Namun, secepat apa pun rentetan kejadiannya, ledakan-ledakan ini tetap tersebar di sejumlah besar generasi, dan sifatnya tetap *gradual*. Hanya saja, para perantaranya biasanya terlalu cepat berlalu untuk bisa tercatat sebagai fosil. ‘Keberselaan sebagai gradualisme cepat’ ini jauh berbeda dari makromutasi, yang merupakan perubahan mendadak dalam satu generasi. Salah satu penyebab timbulnya kerancuan adalah karena salah satu dari dua pengjur teori ini, Stephen

Gould (yang satu lagi adalah Niles Eldredge), juga kebetulan penyuka jenis-jenis makromutasi tertentu, dan kadang-kadang meremehkan distingsi antara gradualisme cepat dan makromutasi sejati – harus saya perjelas, bukan makromutasi Boeing 747. Wajar bila Eldredge dan Gould jengkel dengan penyalahgunaan gagasan mereka oleh kalangan kreasionis yang berpikir bahwa kesetimbangan bersela merupakan, dalam istilah saya, makromutasi besar tipe 747 yang – harap maklum jika mereka yakini – membutuhkan mukjizat. Gould berkata:

Sejak kami mengajukan kesetimbangan bersela untuk menjelaskan tren, masygul rasanya bila teori ini berkali-kali – entah karena sengaja entah karena bodoh – dianggap sebagai pengakuan bahwa tak ada rupa-rupa peralihan dalam catatan fosil. Rupa-rupa peralihan umumnya tidak ada di level spesies, tetapi melimpah ruah di antara kelompok-kelompok yang lebih besar.

Dr. Gould mestinya bisa mengurangi risiko kesalahpahaman seperti itu kalau saja ia dengan lebih jelas menegaskan perbedaan besar antara gradualisme cepat dan saltasi (makromutasi). Tergantung pengertian yang Anda anut, teori kesetimbangan bersela bisa konservatif dan kemungkinan benar atau radikal dan kemungkinan salah. Jika garis pembeda di antara gradualisme cepat dan saltasi disamarkan, teori keberselaan ini akan tampak lebih radikal. Namun, di saat bersamaan, terbuka pulalah ruang kesalahpahaman, ruang yang digeruduk warga kreasionis tanpa tunggu lama.

Ada alasan yang amat dangkal mengapa rupa-rupa peralihan umumnya tidak terdapat di tataran spesies. Alasan ini paling baik dijelaskan dengan analogi. Anak-anak tumbuh secara

perlahan dan berkelanjutan menjadi orang dewasa. Akan tetapi, usia dewasa menurut hukum dicapai pada umur tertentu, biasanya delapan belas tahun. Oleh karena itu, bisa saja orang berkata, ‘Jumlah penduduk Inggris 55 juta tetapi tak seorang pun berada di antara kelompok nonpemilih dan pemilih.’ Persis seperti, menurut hukum, seorang remaja berubah status menjadi pemilih tepat saat ia berusia delapan belas tahun, para ahli zoologi pun selalu mengklasifikasikan sebuah spesimen sebagai spesies yang satu atau yang lain. Jika sebuah spesimen adalah rupa perantara (dan ini jamat terjadi), ketentuan-ketentuan ‘hukum’ ahli zoologi tetap memaksanya untuk lompat ke arah yang satu atau yang lain ketika menamai spesimen itu. Maka dari itu, klaim kalangan kreasionis bahwa tidak ada perantara *sudah pasti* benar di tataran spesies, tetapi tak menyiratkan apa pun tentang dunia nyata – hanya implikasi tentang kaidah penamaan ahli zoologi.

Tak usah jauh-jauh, pada garis keturunan kita sendiri, peralihan dari *Australopithecus* ke *Homo habilis* ke *Homo erectus* ke ‘*Homo sapiens* purba’ ke ‘*Homo sapiens* modern’ begitu mulus dan gradual sampai-sampai para ahli fosil tak kunjung henti bercekcok tentang cara mengklasifikasikan fosil-fosil tertentu. Sekarang, coba baca kutipan dari sebuah buku propaganda antievolusi ini: ‘temuan-temuan tersebut telah digolongkan sebagai *Australopithecus* (berarti kera) atau *Homo* (berarti manusia). Meski sudah giat menggali dan panas berdebat selama lebih dari seabad, kotak kaca yang konon disediakan untuk menaruh sisa-sisa leluhur manusia itu tetap kosong. Mata rantai yang hilang masih belum ditemukan.’ Apa kiranya yang harus dilakukan fosil agar memenuhi syarat menjadi perantara? Kutipan itu sebenarnya tidak bermakna

apa pun pada konteks dunia nyata. Makna (hambarinya) cuma menyoal kaidah penamaan saja. Semua ‘mata rantai yang hilang’, sepersis *apa pun* ia sebagai perantara, takkan luput dari keadaan kahar peristilahan yang menyeretnya ke kubu yang satu atau yang lain. Cara yang benar untuk mencari perantara adalah dengan melupakan tata nama fosil dan melihat bentuk serta ukuran aktual fosilnya. Dengan demikian, Anda akan mendapati bahwa catatan fosil kaya akan transisi gradual nan indah, terlepas dari beberapa celah yang juga ada – celah yang menganga dan diterima, oleh semua orang, sebagai akibat dari gagal memfosilnya hewan-hewan. Boleh dikata, tata cara penamaan kita dibuat untuk zaman pra-evolusi ketika pembagi-bagian tegas adalah segalanya dan kita tidak menyangka perantara-perantaranya bisa ditemukan.

Sekilas awal telah kita pandang Gunung Kemuskilan. Kita pun telah melihat perbedaan antara tebing-tebing terjalnya di sisi yang satu dan lereng-lereng landainya di sisi yang lain. Dua bab berikutnya akan menyigi dua dari puncak-puncak yang digandrungi kalangan kreasionis karena tebing-tebingnya yang curam istimewa: pertama, sayap (‘apa guna sayap sebelah saja?’) kemudian mata (‘mata sama sekali tak berfungsi hingga semua bagian-bagiannya utuh; maka mustahil mata berevolusi secara gradual’).

---

\* Terkait hal ini, Judith Flanders bercerita kepada saya tentang kisah lucu berikut ini, yang dimuat dalam buku Robert X. Cringely, *Accidental Empires*. Ceritanya tentang Apple III – komputer desktop dari generasi antara Apple II yang terkenal dan Macintosh yang termasyhur itu – yang diluncurkan pada 1980: ‘...mesin otomatis yang menyisipkan puluhan cip komputer ke papan sirkuit utamanya tidak menekan cip-cip itu ke soket-soketnya



dengan cukup kuat. Apple menanggapi isu ini dengan meminta 90.000 pelanggannya untuk mengangkat komputer Apple III mereka dengan hati-hati hingga ketinggian 12-18 inci di atas permukaan rata, lalu menjatuhkannya, dengan harapan tumbukan itu akan mengencangkan posisi semua cip tersebut.'



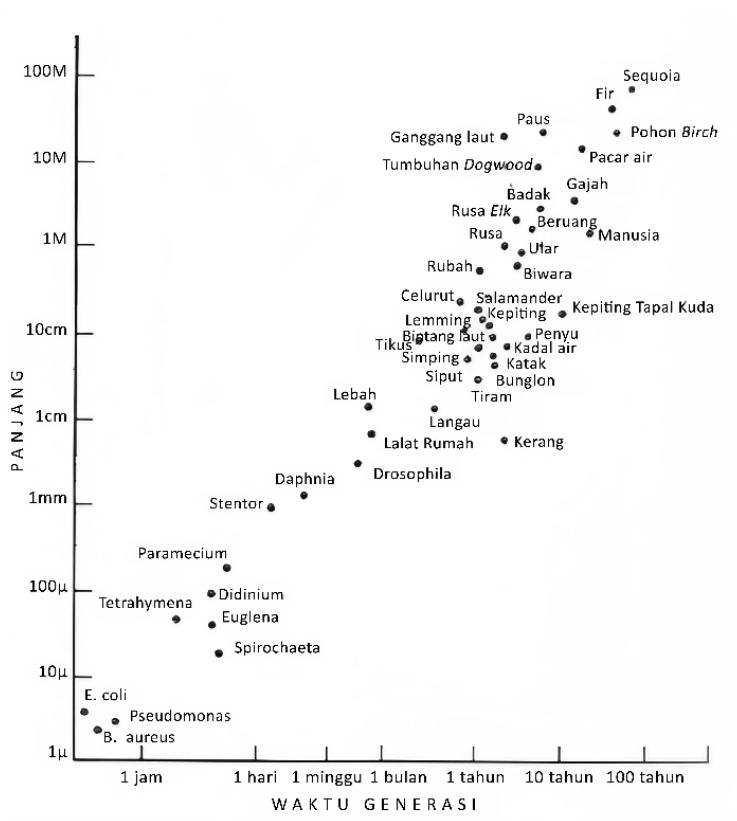
## BAB 4

### LEPAS LANDAS

TERBANG TELAH MENJADI ANGAN-ANGAN MANUSIA SEJAK dulu kala dan kita mencapainya dengan kesulitan tiada tara sehingga wajar jika kita cenderung membesar-besarkan kesukarannya. Bagi mayoritas spesies hewan, terbang itu biasa saja. Mengubah sedikit aforisme kolega saya Robert May, untuk perkiraan awalnya semua spesies hewan terbang. Hal ini utamanya karena, kali ini mengutip kata-kata May, untuk perkiraan awalnya semua spesies adalah serangga. Tapi sekalipun yang kita hitung hanyalah vertebrata berdarah panas, pernyataan lebih dari separuh spesies-spesies di kelompok tersebut bisa terbang tetaplah benar: jumlah spesies burung dua kali jumlah mamalia, dan seperempat dari spesies mamalia adalah kelelawar. Terbang tampak begitu berat bagi kita terutama karena kita hewan besar. Kita tahu bahwa ada hewan lain yang lebih besar dari kita, seperti gajah dan badak, tetapi untuk perkiraan awalnya semua hewan lebih kecil dari kita (Gambar 4.1).

Bagi hewan yang kerdil, menaklukkan angkasa bukan perkara sulit. Untuk hewan berukuran tubuh mungil, mungkin tantangan lebih beratnya adalah tetap di tanah. Perbedaan antara hewan besar dan kecil ini turun dari prinsip-prinsip fisika yang mutlak.

Untuk benda-benda dengan bentuk tertentu, ukuran berat bertambah secara tidak proporsional (lebih tepatnya, pangkat



Gambar 4.1 Ukuran makhluk hidup berbeda-beda, merentang hingga bilangan sepuluh pangkat delapan. Untuk membantu penyortiran variasinya, garis waktu generasi dikoordinatkan dengan garis ukuran (keduanya berkorelasi kuat, untuk alasan yang tidak dibahas di sini). Kedua sumbu digambar dengan sebuah skala logaritmik; kalau tidak, perlu kertas sepanjang 1.000 mil untuk menampung pohon *redwood* dan bakteri di skala yang sama.

tiga) mengikuti panjang. Jika telur burung unta tiga kali lebih panjang dari telur ayam yang sama bentuk, beratnya bukan tiga kali, melainkan  $3 \times 3 \times 3$ , atau dua puluh tujuh kali berat

telur ayam. Kening akan tetap berkerut hingga kita terbiasa dengan prinsip ini. Jika sebutir telur ayam cukup untuk sarapan satu orang, sebutir telur burung unta cukup untuk sarapan dua puluh tujuh orang. Volume – maka dari itu, berat – naik pangkat tiga (kubik) dari ukuran garis. Di lain pihak, bidang permukaan naik pangkat dua (kuadrat) dari ukuran garis. Demonstrasinya paling mudah dengan bangun ruang kubus, tetapi aturan ini berlaku untuk semua bentuk lainnya.

Bayangkan sebuah kotak kubus besar. Berapa kotak lebih kecil berukuran persis setengah tepinya yang dapat dimuatnya? Dengan menggambar kotak-kotaknya, kita langsung tahu jawabannya delapan buah. Kotak besar itu dapat menampung bukan dua kali, melainkan delapan kali lebih banyak apel dari kotak-kotak yang lebih kecil; bukan dua kali, melainkan delapan kali lebih banyak kaleng cat yang bisa dimuat ke dalamnya. Tetapi jika kita hendak mengecat permukaan kotak besar itu, berapa banyak lagi cat yang dibutuhkan dibanding jumlah untuk mengecat bagian luar satu kotak yang kecil? Lagi-lagi, dengan menggambarnya, kita langsung tahu jawabannya bukan dua ataupun delapan kali, melainkan empat kali lebih banyak.

Perbedaan antara bidang permukaan dan volume menjadi lebih dramatis pada benda-benda dengan ukuran yang jauh berbeda. Misalkan sebuah produsen korek api, untuk keperluan iklan, membuat kotak korek api seukuran manusia, dengan tinggi dua meter dalam posisi tergeletak. Kotak korek api biasa tingginya dua sentimeter. Maka, perlu tumpukan 100 kotak sekadar untuk mengimbangi tinggi peti korek api tersebut. Satu baris 100 kotak korek api hanya sepadan dengan satu garis panjang peti tersebut. Dan satu saf 100

kotak korek api setara dengan satu garis lebarnya. Jadi, jika peti itu diisi dengan kotak-kotak korek api, berapa yang dapat dimuatnya? Jawabannya  $100 \times 100 \times 100$  atau satu juta. Di satu sisi, peti itu hanya 100 kali lebih besar dari kotak korek api biasa, dan mata manusia yang naif dapat menakar bahwa ukurannya 100 kali lebih besar. Namun, di sisi lain, peti itu satu juta kali lebih besar, dan dapat menampung sedikitnya satu juta kali lebih banyak korek api (sebetulnya lebih, karena relatif lebih sedikit ruang yang diisi oleh kertas karton).

Jika kita asumsikan kotak korek api raksasa itu terbuat dari kertas karton yang sejenis dengan kotak korek api biasa, berapa biaya relatif dari kertas kartonnya? Tergantung bukan pada volume, bukan pula pada ukuran garisnya, melainkan pada bidang permukaannya. Kotak raksasa itu butuh, bukan satu juta kali, melainkan cuma 10.000 kali lebih banyak kertas karton. Bidang permukaan kotak korek api kecil amat jauh lebih besar *untuk ukuran beratnya* dibanding bidang permukaan kotak korek api raksasa. Jika kotak korek api kecil dipotong-potong, hanya satu kertas karton terlipat yang dapat dimuat ke dalam kotak korek api kecil lainnya. Tetapi jika kotak korek api raksasa dipotong-potong, kertas karton terlipatnya paling-paling hanya mengisi bidang alas dari kotak korek api raksasa lainnya. Rasio di antara bidang permukaan dan volume adalah besaran yang amat penting. Untuk setiap kubik volume, bidang permukaan hanya dikuadratkan. Hal ini dapat diungkapkan secara matematis dalam pernyataan bahwa, jika sebuah bangun diperbesar seragam, rasio bidang permukaan terhadap volume naik pangkat dua per tiga dari ukuran panjang. Rasio bidang permukaan terhadap volume lebih besar untuk benda-benda kecil daripada untuk benda-benda



besar. Benda-benda kecil lebih ‘meluas’ daripada benda-benda besar yang sama bentuk.

Dalam kehidupan, ada hal penting yang bergantung pada bidang permukaan, ada juga yang bergantung pada volume, ada pula yang bergantung pada ukuran garis, dan ada lagi yang bergantung pada kombinasi beragam dari ketiganya. Bayangkan seekor kuda nil yang dikerdilkan hingga seukuran kutu. Tinggi (atau panjang, atau lebar) dari kuda nil sungguhan mungkin seribu kali lebih dari kuda nil kutu. Maka, berat dari kuda nil itu satu miliar kali lebih dari kuda nil kutu. Bidang permukaan kuda nil itu cuma satu juta kali lebih dari kuda nil kutu. Jadi, kuda nil kutu memiliki bidang permukaan 1.000 kali lebih besar *untuk ukuran beratnya* ketimbang kuda nil besar. Terasa wajar bila dikata bahwa kuda nil yang dikerdilkan ini akan lebih enteng mengambang di udara daripada kuda nil sungguhan, tetapi ada kalanya kita perlu melihat hal yang berada di balik kewajaran.

Tentu saja, hewan-hewan besar bukanlah sekadar versi diperbesar dari hewan-hewan kecil, dan sekarang kita bisa melihat alasannya. Seleksi alam tidak mengizinkan mereka membesar seenaknya, mereka perlu mengompensasi hal-hal seperti perubahan pada rasio bidang permukaan terhadap volume. Kuda nil sungguhan memiliki jumlah sel sekitar satu miliar kali lebih banyak dari kuda nil kutu, tetapi sel kulit pada permukaan luarnya hanya satu juta kali lebih banyak. Tiap sel perlu oksigen dan makanan dan perlu membuang zat-zat limbah. Maka, pada kuda nil sungguhan, materi yang keluar masuk tubuhnya satu miliar kali lebih banyak. Pada kuda nil kutu, sebagian besar permukaan untuk lalu lintas oksigen dan zat-zat limbah ini dapat dicukupi dengan kulit luarnya.

Sementara itu, luas kulit luar kuda nil sungguhan relatif begitu kecil sehingga, karena populasi selnya yang satu miliar kali lebih besar, bidang permukaan tubuhnya perlu diluaskan dengan masif. Ini dilakukan dengan usus panjang berlipat-lipat, paru-paru kenyal, dan sepasang ginjal mikrotubular, yang kesemuanya diairi dengan jaringan besar pembuluh darah yang dibelah dan dibelah kembali. Alhasil, luas bagian dalam tubuh seekor hewan besar amat jauh lebih besar dari luas bagian luarnya. Makin kecil seekor hewan, makin ia tidak membutuhkan paru-paru atau insang atau pembuluh darah: Permukaan luar tubuhnya punya bidang yang cukup lebar untuk menangani sendiri lalu lintas keluar masuk dari sel-sel internalnya yang relatif minim itu. Dengan kata lain, walau tak tepat persis, proporsi sel-sel yang menyentuh dunia luar lebih tinggi pada hewan kecil. Pada hewan besar seperti kuda nil, hanya seproporsi kecil saja dari sel-selnya yang menyentuh dunia luar. Konsekuensinya, hewan besar harus meningkatkan proporsi itu dengan organ-organ padat-bidang seperti paru-paru, ginjal, dan pembuluh darah halus.

Laju keluar masuk zat-zat dari dan ke dalam tubuh bergantung pada luas bidang, tetapi bukan itu saja hal penting yang bergantung padanya. Kecenderungan untuk menangkap angin dan mengambang pun demikian. Kuda nil kutu akan terangkat hanya karena embusan angin sepoi. Ia bisa terangkat tinggi oleh aliran udara hangat, kemudian mengambang ringan turun ke bumi dan mendarat lembut tanpa cedera. Kuda nil sungguhan, jika jatuh dari ketinggian yang sama, akan terjerembap tiarap dan, jika jatuh dari ketinggian yang ditarik naik secara proporsional, ia akan binasa. Bagi kuda nil sungguhan, terbang adalah mimpi di siang bolong. Mustahil ia

bisa kalau pun mencoba. Agar bisa terbang, kuda nil sungguhan butuh sepasang sayap yang begitu besar sehingga... ya, misinya sudah gagal sedari awal karena massa otot yang dibutuhkan untuk menenagai sayap-sayap raksasa itu akan terlalu berat untuk dapat diangkat olehnya. Jika ingin membuat seekor hewan yang bisa terbang, bahan dasarnya jangan kuda nil.

Intinya, jika ingin lepas landas, hewan besar harus menumbuhkan sayap-sayap besar yang padat-bidang. Alasannya? Sama seperti alasan hewan besar butuh ginjal dan paru-paru yang kaya-permukaan. Akan tetapi, hewan kecil tidak perlu menumbuhkan apa pun untuk bisa melambung ke udara. Sekujur tubuhnya sudah kaya-permukaan. Ambil contoh, plankton udara, yang berisi jutaan serangga kecil dan makhluk-makhluk lain yang mengambang di angkasa dan menyebar ke seluruh dunia. Barang tentu, banyak di antaranya bersayap. Namun, banyak juga yang merupakan makhluk-makhluk renik tak bersayap yang mengambang walau tanpa permukaan lempeng sayap khusus. Mereka mengambang hanya karena ukurannya alit, dan hewan renik dapat mengambang di udara semudah mengapung di air. Melanjutkan perbandingan udara dan air, serangga mungil bersayap pun tak perlu sering-sering mengepakkan sayap untuk tetap mengambang dan ‘berenang’ di udara. Kata ‘berenang’ pas digunakan di sini karena ada hal-hal ganjil lain yang terjadi bila ukuran tubuh kita mini. Pada skala tersebut, tegangan permukaan menjadi gaya yang begitu pentingnya sampai-sampai, bagi seekor serangga mungil, udara akan terasa kental. Mengepakkan sayap, bagi seekor serangga kecil, akan terasa seperti berenang di kolam sirop bagi kita.

Mungkin Anda bertanya-tanya, apa gunanya mengambang jika tak bisa mengontrol ketinggian atau arah? Saya tidak akan menguraikannya dengan terperinci, tetapi di mata gen, penyebaran *per se* bisa dipandang sebagai keuntungan, khususnya untuk makhluk yang pada dasarnya bergeming. Hal ini berlaku, terlebih lagi, pada tumbuhan: Kadang-kadang, petak tanah tempatnya hidup tak bisa lagi ditinggali, misalnya jika terjadi kebakaran hutan atau banjir. Untuk tumbuhan yang butuh banyak sinar matahari, seluruh area lantai hutan tidak laik huni, kecuali saat sesekali ada pohon tumbang dan tudung cahaya pun terbuka. Pada umumnya, hewan atau tumbuhan apa pun akan turun dari leluhur yang hidup di suatu tempat lain dan mereka kemungkinan mengandung gen-gen untuk berupaya menyebarluaskan diri ke suatu tempat – di mana pun itu. Itulah mengapa biji-biji rumput dandelion mekar bak kapas. Itulah mengapa duri-duri punya kait agar bisa tercantol di bulu hewan. Itulah mengapa banyak serangga melayang ke angkasa, dalam kumpulan plankton udara dan menghujan turun di negeri manca.

Mudahnya hewan-hewan kecil mengambang mengesankan bahwa kita hanya perlu menganggap kemampuan terbang mulanya berevolusi pada hewan-hewan kecil – dan puncak terbang Gunung Kemuskilan pun mulai tampak tak terlalu mustahil. Serangga-serangga yang amat mungil mengambang tanpa sayap sama sekali. Serangga-serangga yang sedikit lebih besar dibantu dengan sayap-sayap secuil untuk menangkap angin; maka terbukalah lereng sempit nan rapi ke atas Gunung Kemuskilan menuju sayap-sayap sejati. Namun, mungkin tidak sesederhana itu, menurut penelitian cemerlang yang dikerjakan oleh Joel Kingsolver dan Mimi Koehl di University



of California at Barkley. Kingsolver dan Koehl menggarap teori bahwa sayap-sayap serangga purba dipra-adaptasikan untuk tujuan yang sama sekali berbeda: menjadi panel-panel surya untuk pemanas. Tentu, dahulu kala, sayap tidak mengepak. Hanya berupa tonjolan kecil yang mencuat dari rongga dada.

Teknik penelitian Kingsolver dan Koehl terbilang cerdik. Mereka membuat model-model kayu sederhana, sesuai serangga-serangga fosil yang diketahui berusia paling tua. Sebagian dari model-model tersebut tidak bersayap. Sebagian yang lain punya tonjolan sayap dengan panjang bervariasi (banyak di antaranya yang terlalu pendek untuk dikenali sebagai sayap atau organ untuk terbang). Serangga-serangga tiruannya sendiri beragam pula ukurannya dan diuji di terowongan angin untuk melihat derajat efisiensinya dari perspektif aerodinamika. Model-model tersebut juga dilengkapi termometer cilik di dalamnya, untuk mengamati kemampuannya menyerap sinar matahari buatan dari lampu *flood* yang benderang.

Sesuai pembahasan kita tadi, mereka menemukan bahwa serangga-serangga alit mengambang cukup baik walau tanpa sayap. Yang agak menggelisahkan dari hasil riset mereka, jika ditinjau dari sudut pandang lereng sempit menuju Gunung Kemuskilan saya tadi, adalah bahwa, pada ukuran-ukuran yang amat kecil ini, sayap-sayap kecil agaknya tidak efisien secara aerodinamis. Sayap tak mampu menghasilkan angkatan yang baik kecuali kalau sudah cukup panjang. Untuk serangga-serangga tiruan dengan panjang tubuh dua sentimeter, sayap baru dapat menghasilkan angkatan yang berarti jika rasinya sudah 1:1. Namun, sayap yang

panjangnya hanya dua puluh persen dari panjang tubuh tampak tak berfungsi sama sekali. Sekilas, hal ini tampak seperti tebing terjal di Gunung Kemuskilan, karena agaknya perlu satu mutasi besar untuk langsung memanjangkan sayap secara substansial. Akan tetapi, tebing terjal ini tidaklah terlalu mengerikan karena dua butir fakta lain berikut ini.

Pertama-tama, hanya pada serangga-serangga yang amat kecil tonjolan sayap yang relatif besar diperlukan agar manfaat aerodinamisnya terasa. Kalau serangganya agak besar, tonjolan sayap mungil *pun* bisa menghasilkan angkatan yang signifikan. Pada panjang tubuh 10 sentimeter, seiring tonjolan sayap ditambah perlahan-lahan dari posisi tanpa sayap, manfaat aerodinamisnya langsung naik drastis.

Untuk fakta tambahan yang kedua, kita kembali ke model-model serangga yang amat kecil. Di sini, tonjolan-tonjolan sayap kecil terbukti langsung menghasilkan manfaat *termal*. Saat sayap-sayap mungil ini membesar sedikit, kemampuannya untuk menghasilkan angkatan tubuh tidak bertambah, tetapi kepiawaiannya sebagai panel surya meningkat. Kiranya terdapat lereng peningkatan halus dalam hal kinerja panel surya bila tubuh serangganya sangat kecil. Tonjolan satu milimeter lebih mending dari tanpa tonjolan; tonjolan dua milimeter lebih baik dari satu, dan seterusnya. Tapi ‘dan seterusnya’ tidak berarti selamanya. Setelah panjang tertentu, peningkatan dalam hal kinerja panel surya akan surut. Oleh karena itu, dapat diketengahkan bahwa lereng peningkatan panel surya saja tidak cukup untuk membuat tonjolan-tonjolan sayap memanjang hingga aerodinamika mengambil alih fungsinya. Kendati demikian, Kingsolver dan Koehl punya solusi yang baik untuk masalah ini. Begitu

tonjolan-tonjolan telah berevolusi pada serangga-serangga kecil karena manfaat panel suryanya, sebagian serangga berevolusi ke tubuh yang lebih besar karena alasan yang agak berbeda. Alasannya bisa macam-macam. Pasalnya, seiring waktu, hewan lazim berevolusi ke ukuran tubuh lebih besar. Barangkali, serangga besar diuntungkan karena risiko dimakan pemangsanya lebih kecil. Jika mereka tumbuh, di sepanjang jangka waktu evolusi, untuk alasan apa pun, dapat diduga bahwa tonjolan-tonjolan panel surya mereka pun otomatis ikut tumbuh. Nah, konsekuensi dari bertambahnya ukuran secara umum ini adalah bahwa serangga, tonjolan sayap, dan semuanya, akan dengan sendirinya masuk ke kisaran ukuran di mana manfaat aerodinamika bisa mengambil alih dan melanjutkan langkah ajek ke atas Gunung Kemuskilan, walaupun lewat tanjakan lain dan menuju puncak yang lain pula.

Sulit untuk yakin bahwa model-model di terowongan angin benar-benar mewakili hal yang sungguh terjadi pada era Devon 400 juta tahun silam. Bahwa fungsi mula sayap-sayap serangga adalah sebagai panel surya, bukan alat terbang, hingga seluruh tubuhnya membesar karena alasan yang berbeda – ini mungkin benar, mungkin tidak. Selain itu, bisa saja mekanisme fisika aktualnya lain dari model-model tersebut, dan sejak awal tonjolan-tonjolan yang tumbuh itu makin lama makin efektif untuk tujuan terbang. Terlepas dari itu semua, penelitian Kingsolver dan Koehl menghadirkan pelajaran yang menarik untuk kita. Kita diajarkan sebuah cara cerdik baru, semacam pelipir jalan, untuk menemukan jalur-jalur pendakian Gunung Kemuskilan.

Untuk vertebrata, evolusi terbang mungkin lain lagi ceritanya karena rata-rata mereka pada dasarnya memang besar.

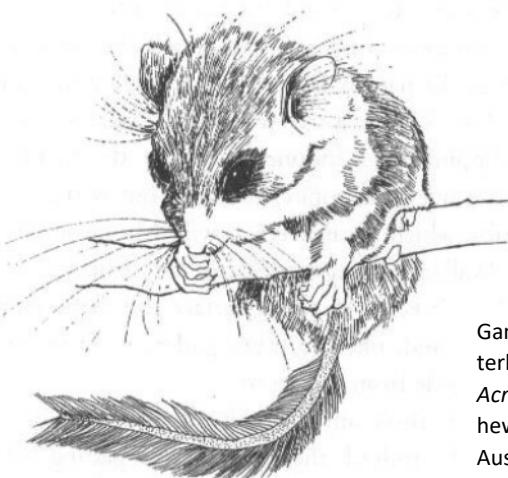
Kemampuan terbang mandiri telah berevolusi secara terpisah pada burung, kelelawar (mungkin terpisah setidaknya pada dua jenis kelelawar), dan pterosaurus. Salah satu kemungkinannya, terbang mandiri berawal dari kebiasaan meluncur di antara pepohonan. Banyak hewan melakukannya, sekalipun tidak benar-benar bisa terbang. Pucuk-pucuk pohon menyangga dunia hayatinya sendiri. Kita membayangkan hutan sebagai medan yang menyembul dari tanah. Kita melihatnya dari titik pandang hewan-hewan besar, berat, kikuk, penghuni tanah, saat kita berjalan melalui batang-batang pohnnya. Bagi kita, hutan rimba adalah bait serupa gua gelap dengan lengkung dan kubah menjulang dari tanah menuju langit-langit hijau di atas sana. Tapi sebagian besar penghuni hutan hidup di kanopinya dan melihat hutan dari sudut pandang sebaliknya. Di mata mereka, hutan adalah padang hijau nan luas, bergelombang landai, dan bermandikan sinar mentari yang, meski tak mereka sadari, kebetulan saja bersanggakan tiang-tiang kayu. Tak terhitung jumlah spesies binatang yang hidup sepanjang usia di padang tinggi ini. Di situ ada dedaunan, dan dedaunan ada di sana karena di situ ada sinar matahari, dan sinar matahari adalah sumber energi utama bagi semua makhluk hidup.

Bentang alamnya tidak benar-benar utuh. Padang di atas jangkungan ini ditutuli lubang-lubang yang dapat menjerumuskan ke tanah: celah-celah yang perlu dijembatani. Dengan caranya masing-masing, banyak jenis hewan yang mampu melompat menyeberangi celah yang cukup lebar. Berhasil gagalnya lompatan, boleh jadi nyawa taruhannya. Perubahan apa pun pada bentuk tubuh yang bisa mengulur kisaran lompatannya sedikit lebih jauh – sesedikit apa pun itu

– tetap bisa menguntungkan. Perbedaan di antara tupai dan tikus, utamanya, terdapat pada ekornya. Ekor bukan sayap, tak bisa dipakai untuk terbang. Tetapi ekor berbulu, dengan rambut-rambut yang menambah luas bidang tangkapan anginnya. Tikus dengan ekor tupai barang tentu mampu melompati celah yang lebih lebar dari tikus dengan ekor tikus. Dan, jikalau leluhur tupai berekor bak-tikus, mestilah ada tanjakan langsam menuju peningkatan, makin lama makin berbulu, terus hingga ekor tupai modern.

Saya tadi menggambarkan ekor tupai dengan kata berbulu, tetapi kata ini lebih pas lagi untuk seekor mamalia kecil yang sama sekali tidak berkerabat dengan tupai, ‘posum terbang ekor bulu’ atau *feathertail glider* (Gambar 4.2). Hewan ini hewan marsupial, yang berkerabat lebih dekat dengan posum dan kanguru daripada tikus dan tupai. Ia hidup tinggi di tajuk hutan-hutan eukaliptus Australia. Ekornya tentu saja bukan ekor bulu sejati, yang, dengan sistem rumit berisi kail dan kait alitnya, sepenuhnya merupakan penemuan burung. Tapi ekor *feathertail glider* tampak seperti ekor bulu burung dan fungsinya pun mirip.

*Feathertail glider* juga memiliki kelopak kulit, merentang dari siku ke lutut, yang mampu menambah jarak lompatannya hingga luncuran turun sejauh enam puluh kaki. Famili posum Australia lainnya, phalanger terbang, telah mempercanggih kelopak kulit mereka. Pada hewan peluncur yang lebih besar ini, selaputnya tetap sebatas siku. Begitu pun, ia bisa melayang hingga 300 kaki dan berbelok arah dengan sudut hingga 90 derajat. Posum terbang perut kuning (*yellow-bellied glider*) bahkan lebih jaya lagi di udara. Selaput luncurnya membentang dari pergelangan tangan hingga ke tumit, seperti



Gambar 4.2 Posum terbang ekor bulu, *Acrobates pygmaeus*, hewan marsupial dari Australia.

selaput luncur wupih sirsik, dan tupai terbang yang lebih besar.

Hampir identik perawakan luarnya, walau sama sekali tak berkerabat: tupai terbang merah raksasa dari hutan-hutan Timur Jauh, dan tupai terbang utara dari Amerika Utara. Kedua hewan ini tupai sejati – binatang penggerat – tetapi, seperti para peluncur marsupial yang lebih ekstrem, kelopak kulitnya membentang dari pergelangan tangan hingga ke tumit. Kemampuan meluncurnya pun tak kalah dari padanan marsupialnya. Ada hewan-hewan penggerat lain di Afrika yang telah mengembangkan trik meluncur yang sama. Walau diberi nama tupai terbang Beecroft dan tupai terbang Zenker, keduanya bukan tupai sejati dan sudah barang tentu ‘menciptakan’ jurus meluncurnya sendiri, secara terpisah dari tupai-tupai terbang Amerika. Selaput yang lebih komprehensif lagi, membentang dari leher ke ujung kaki depan dan kaki

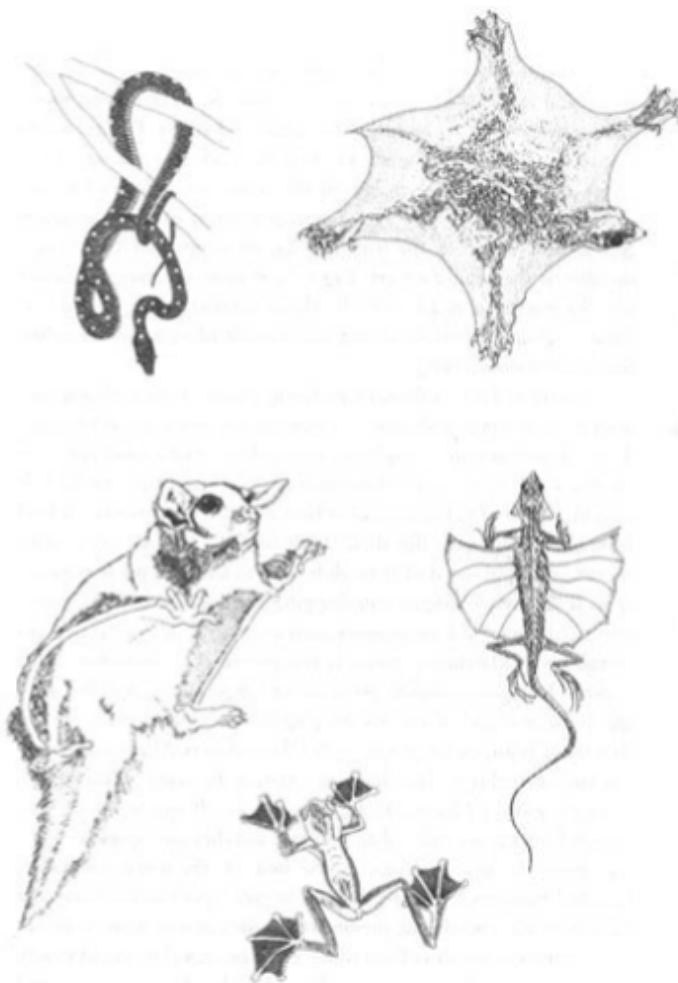
belakang hingga ke ujung ekor, dimiliki oleh kubung misterius dari hutan-hutan Filipina. Tak ada yang tahu pasti seluk-beluk hewan yang dijuluki lemur terbang ini, kecuali bahwa dia bukan lemur (lemur sejati hanya hidup di Madagaskar, dan tak satu pun lemur bisa terbang atau meluncur, kendati beberapa di antaranya punya lompatan mengesankan). Apa pun sejatinya dia, kubung tentu bukan binatang penggerat ataupun marsupial. Sekali lagi, ia telah ‘menciptakan’ selaput luncur dan perilaku yang terkait dengan selaput itu sepenuhnya terpisah dari semua yang lain.

Kubung, aneka ragam tupai terbang, dan hewan peluncur marsupial, semuanya melayang dengan efisiensi yang sebanding. Namun, karena selaput terbang kubung merentang di antara jari-jemarinya, sementara pada yang lain hanya sampai pergelangan tangan, hewan ini bisa memunculkan berbagai jenis sayap jika evolusinya berlanjut. Lebih jelas lagi, demikian pula halnya dengan kadal terbang atau ‘naga terbang’, yang dengan elok diberi nama *Draco volans* (Gambar 4.3). Hewan ini kadal yang hidup di pohon, juga dari hutan-hutan di Filipina dan Indonesia. Lain dari para peluncur mamalia, kelopak anginnya tidak sampai ke kaki, tetapi membentang di antara tulang-tulang rusuknya yang memanjang dan dapat dicacak sekehendak hati. Hewan peluncur favorit saya adalah katak terbang Wallace, seekor katak pohon dari hutan hujan di Asia Tenggara. Kulit lempeng terbangnya merentang di antara jari-jari kaki depan dan belakang, dan seperti para peluncur lain yang telah kita bahas, hewan ini menggunakan untuk meluncur dari pohon ke pohon.

Pada semua kasus ini, tak sulit untuk mencari jalur tanjakan landai ke atas Gunung Kemuskilan. Fakta bahwa perilaku meluncur telah berevolusi berkali-kali justru menunjukkan mudahnya jalur-jalur pendakian ini ditemukan. Bukti yang barangkali lebih aneh lagi muncul dari ular pohon surga atau ‘ular terbang’, lagi-lagi dari hutan-hutan Asia Tenggara. Ular ini jago meluncur dari pohon ke pohon setelah sengaja menjatuhkan diri, sejauh kurang lebih enam puluh kaki, sekalipun tak tampak memiliki layar, kelopak, atau lempeng terbang sama sekali. Bentuk pipihnya lah yang membuat ular ini punya bidang permukaan relatif lebar untuk ukuran beratnya, dan hewan ini meningkatkan efeknya dengan menarik perutnya hingga membentuk permukaan cekung di bawah. Cara ini dapat menjadi langkah pertama yang sempurna menuju evolusi ke makhluk seperti *Draco volans* dengan selaput luncur sejati. Tapi ular terbang tak mengambil langkah kedua, karena pemanjangan tulang rusuk mungkin justru merugikan untuk segi-segi lain cara hidupnya.

Berikut ini cara membayangkan evolusi gradual ke makhluk serupa tupai terbang. Pada mulanya, hewan leluhur serupa tupai biasa, yang tinggal di pohon tetapi tanpa selaput luncur khusus, melompati celah-celah pendek. Sejauh apa pun ia dapat melompat tanpa bantuan kelopak kulit khusus, lompatannya bisa beberapa inci lebih jauh – dan, karena itu, selamat saat melompati celah dengan jarak berbahaya – andai ia punya kelopak kulit yang amat tipis, atau ekor yang sedikit saja lebih berbulu. Maka, seleksi alam memilih individu-individu dengan kulit yang sedikit berkantung di sekitar sendi-sendi lengan atau kaki, dan hal ini menjadi normanya. Dengan begitu, jarak lompat normal dari anggota rata-rata populasi-





Gambar 4.3 Vertebrata yang meluncur di antara pepohonan tanpa benar-benar terbang: (searah jarum jam dari kanan atas) kubung, *Cynocephalus volans*, kadal terbang, *Draco volans*; katak terbang Wallace, *Rhacophorus nigropalmatus*, wupih sirsik, *Petaurus breviceps*, dan ular terbang, *Chrysopelea paradisi*.

nya telah bertambah beberapa inci. Lantas, individu mana pun yang memiliki jaring kulit lebih lebar bisa melompat beberapa inci lebih jauh lagi. Maka, pada generasi-generasi berikutnya, perluasan kulit ini menjadi norma, dan seterusnya.

Untuk selaput seukuran apa pun, terdapat celah genting di mana peningkatan tipis pada selaput tersebut dapat menentukan hidup mati individu hewan itu. Ukuran selaput anggota rata-rata populasinya, dengan pelan tapi pasti, melebar seiring melebarnya jarak yang dapat dilompati oleh anggota rata-rata populasi itu. Setelah banyak generasi, spesies serupa para peluncur marsupial dan tupai terbang telah berevolusi – mampu melayang hingga ratusan kaki dan mengemudikan tubuhnya untuk mendarat dengan terkendali.

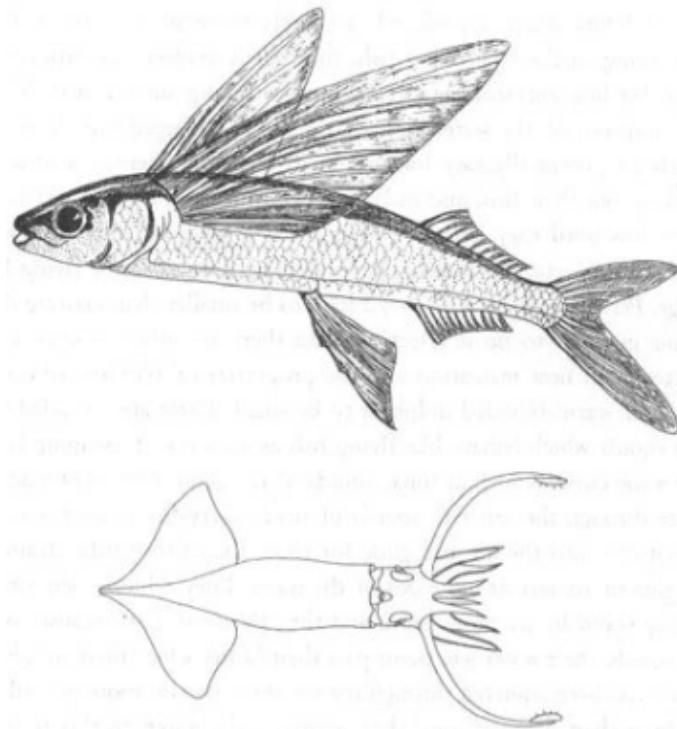
Tapi namanya tetap saja meluncur, bukan terbang. Tak satu pun dari hewan-hewan peluncur ini mengepakkan sayapnya dan bisa tetap mengambang di udara. Semuanya meluncur turun, meski bisa juga naik sedikit dengan mengubah sudut badan tepat sebelum mendarat di batang pohon yang lebih rendah. Adalah mungkin bahwa terbang sejati, sebagaimana diamati pada kelelawar, burung, dan pterosaurus, berevolusi dari leluhur peluncur semacam ini. Sebagian besar dari hewan-hewan ini dapat mengendalikan arah dan laju luncuran untuk mendarat di titik yang telah ditentukan. Mudah membayangkan kemampuan terbang dengan mengepakkan sayap berevolusi dari pengulangan gerakan-gerakan otot untuk mengontrol arah luncur sehingga perlahan-lahan durasi layang rerata kian panjang seiring waktu evolusi.

Akan tetapi, sebagian ahli biologi cenderung berpendapat luncuran turun jarak jauh adalah ujung buntu dari garis evolusi



lompat pohon. Mereka menduga, landasan pacu penerbangan sejati bermula di permukaan tanah, bukan di atas pohon. Pesawat layang buatan manusia lepas landas entah dengan meluncur dari tebing curam entah dengan ditarik cepat di sepanjang daratan. Ikan terbang (Gambar 4.4) lepas landas dengan cara yang kedua ini, meski dari laut, bukan tanah. Dan jarak luncur hewan ini boleh diadu dengan yang mampu ditempuh para peluncur marsupial terbaik dari pepohonan. Sebelum melontarkan diri ke udara, ikan terbang berenang kencang di air, mungkin karena terbirit-birit dikejar pemangsa yang, dari sudut pandangnya, akan mengira buruannya ‘hilang dibawa angin’. Ikan terbang baru tercebur lagi ke air setelah menempuh jarak hingga 300 kaki. Kadang-kadang, saat bergerak turun, hewan ini menyelancari air dengan ekornya, yang berkibas beberapa kali untuk memacu laju dan lepas landas lagi. Sayap-sayapnya adalah sirip-sirip dada yang diperbesar dan, pada ikan terbang Atlantik, sirip-sirip panggul juga.

Ikan-ikan terbang sejati ini (Exocoetidae) jangan dirancukan (seperti setidaknya terjadi pada dua buku di meja saya) dengan *gurnard* terbang (Dactylopteridae). Jauh dari kata terbang, ikan-ikan *gurnard* ini justru mengarungi dasar air. Ada beragam laporan tentang fungsi ‘sayap-sayapnya’: sebagai alat penstabil, alat menakut-nakuti pemangsa, dan alat pengaduk pasir untuk menyibak mangsa. Selain itu, bila merasa terusik, ikan ini akan naik beberapa kaki dari dasar, lalu merentangkan ‘sayap-sayapnya’ dan meluncur turun. Satu-satunya hal yang tidak menjadi fungsi sayap-sayap itu adalah untuk terbang di udara. Tidak jelas apa yang memicu legenda bahwa ikan ini terbang: mungkin hanya karena ukuran besar



Gambar 4.4 Hewan-hewan yang meluncur setelah melontarkan diri dari permukaan. Ikan terbang Atlantik, *Cypselurus heterurus* (atas), dan cumi-cumi terbang, *Onychoteuthis*.

sirip-sirip dadanya yang sepintas mirip dengan ikan-ikan terbang sejati. Kembali ke ikan terbang sejati, hewan ini tentu berevolusi bukan dari leluhur penghuni dasar laut, melainkan ikan-ikan permukaan yang berenang cepat. Banyak ikan melompat ke luar air tanpa bantuan sirip-sirip yang diperbesar. Barang tentu – dan barangkali – para pelompat cepat ini lekas ‘menyadari’ faedah sirip-sirip yang menonjol dan, pada generasi-generasi selanjutnya, menambah luasan

sirip-sirip mereka hingga menjadi ‘sayap’. Agak disayangkan kalau lumba-lumba, dengan lompatannya yang spektakuler, tidak maju ke tahap ikan terbang. Mungkin dikarenakan, agar bisa melakukannya dengan efektif, tubuhnya harus lebih kecil dari lumba-lumba sekarang dan ada alasan-alasan lain, terkait dengan insulasi panas tubuh serta sifat-sifat lapisan lemak, yang menyebabkan lumba-lumba berdarah panas sulit berbadan kecil. Ada pula cumi-cumi terbang, yang berperilaku layaknya ikan terbang sebagai cara untuk lari dari musuh yang sama, seperti ikan tuna. Cumi-cumi dari genus *Onychoteuthis* memacu lajunya di air hingga kecepatan empat puluh mil per jam, melontarkan diri ke udara dan meluncur sejauh lima puluh yard lebih, hingga ketinggian enam kaki atau lebih dari permukaan air. Mereka mencapai kecepatan mengagumkan ini dengan tenaga sembur, dan terbang dalam posisi kepala di buritan karena, layaknya cumi-cumi, semburan airnya mengarah ke luar melewati kepala. Setelah semua pasokan air habis disemburkan, daya dorongnya hilang hingga mereka kembali ke air. Dalam hal ini, ikan terbang lebih unggul karena kebiasaannya untuk, seperti tadi disebutkan, memacu laju dengan kibasan ekor saat sebagian besar tubuhnya masih berada di luar air, menyelancari permukaannya.

Menariknya, ada satu kelompok ikan – ikan kapak air tawar dari sungai-sungai Amerika Selatan – yang dikabarkan mampu menggetarkan sirip-sirip dadanya dengan cepat dan bising untuk terbang bertenaga, meski hanya dalam jarak pendek. Ikan-ikan ini tidak berkerabat dengan ikan terbang sejati (dan dengan ikan *gurnard* ‘terbang’). Ingin rasanya saya melihat ikan kapak terbang mendengung lewat di depan mata kepala sendiri. Bukan berarti saya tidak percaya – semua buku yang

membahasnya mengonfirmasi kabar itu. Tapi, yang suka memancing pasti tahu dan, seperti pelajaran dari cerita ikan *gurnard* ‘terbang’, terkadang kebenaran kabar soal ikan baiknya kita pastikan sendiri.

Begitu pun, ikan terbang (yang meluncur) saya ketengahkan sebagai pendahuluan untuk teori bahwa terbang sejati dengan sayap terkepak berevolusi bukan dari para peluncur di pepohonan, melainkan dari para pelari cepat di darat yang kaki-kaki depannya tak perlu lagi ikut berlari. Ikan terbang dan cumi-cumi terbang, meski hidup di air, mengilustrasikan prinsip bahwa, jika hewan peluncur dapat memelesat cukup cepat di sepanjang permukaan datar, ia dapat lepas landas tanpa bantuan pohon atau tebing curam. Prinsip tersebut boleh jadi benar pada kasus burung, karena burung berevolusi dari dinosaurus berkaki dua (malah, boleh dikata, secara teknis burung *itu* dinosaurus), yang sebagian di antaranya mungkin bisa berlari kencang sekali di atas tanah, seperti burung unta modern. Meneruskan analogi ikan terbang kita sedikit lagi, kedua kaki tersebut berperan layaknya ekor ikan, dengan kencangnya melontarkan si hewan ke depan. Sementara itu, lengan berperan layaknya sirip, yang boleh jadi awalnya dipakai sebagai penstabil atau kemudi, dan menumbuhkan lempeng-lempeng sayap kemudian. Ada mamalia, seperti kanguru, yang mendorong tubuhnya amat cepat dengan dua kaki, sehingga lengan-lengannya bebas berevolusi ke fungsi-fungsi lain. Spesies kita agaknya satu-satunya mamalia yang menggunakan dua kaki secara bergantian, seperti gaya melangkah burung. Tapi kecepatan kita biasa saja dan lengan kita dipakai bukan untuk terbang, melainkan untuk membawa dan membuat barang-barang.



Semua mamalia berkaki dua yang mampu berlari cepat menggunakan gaya berjalan kanguru: Kedua kaki mendorong bersamaan, bukan bergantian. Gaya berjalan ini berkembang secara alami dari peregangan horizontal tulang belakang pada tipikal hewan pelari berkaki empat, seperti anjing. (Jika dianalogikan, paus dan lumba-lumba berenang dengan membengkokkan tulang belakang ke atas dan ke bawah, gaya mamalia, sementara ikan dan buaya berenang dengan meliuk bergantian ke kiri dan ke kanan, mengikuti kebiasaan ikan purba. Sambil lalu, kita mestinya lebih memperhatikan makhluk-makhluk pahlawan tanpa tanda jasa di antara hewan-hewan melata bak-mamalia yang memelopori gaya berjalan naik-turun yang kini kita kagumi pada citah dan grehon yang tengah berlari kencang. Sisa-sisa liak-liuk ikan purba barangkali masih terlihat pada anjing yang mengibas-ngibaskan ekornya, terlebih ketika gerakan ini merembet ke seluruh tubuh saat seekor anjing penurut menggelang-geliut.)

Di antara mamalia yang hidup di darat, kanguru dan kerabat marsupialnya tidak memonopoli ‘gaya berjalan kanguru’. Kolega saya Dr. Stephen Cobb pernah memberi kuliah untuk para mahasiswa zoologi di Universitas Nairobi. Di tengah-tengah, ceramahnya, ia berkata *wallaby* adalah hewan endemis Australia dan Papua Nugini. ‘Tidak, Pak,’ sanggah seorang mahasiswanya. Saya pernah melihat seekor di Kenya.’ Yang dilihat mahasiswa itu sudah pasti salah satu dari hewan ini (Gambar 4.5).

Hewan ini, yang disebut *springhaas* atau terwelu loncat (*springhare*), bukan terwelu ataupun kanguru, melainkan hewan pengerat. Seperti kanguru, ia meloncat untuk memacu laju saat kabur dari pemangsa. Hewan pengerat lain, seperti

jerboa lompat, juga melakukan hal yang sama. Namun, mamalia berkaki dua tampaknya tidak meneruskan langkah dan mengembangkan kemampuan terbang dalam evolusinya. Satu-satunya mamalia terbang sejati adalah kelelawar, dan selaput sayap hewan ini merentang hingga ke kaki belakang dan kaki depannya. Sulit untuk menganggap sayap yang dijejali kaki seperti ini berevolusi melalui rute berlari cepat. Demikian pula halnya dengan pterosaurus. Dugaan saya, kelelawar dan pterosaurus sama-sama mengembangkan kemampuan terbangnya dengan meluncur turun dari pohon atau tebing. Leluhur mereka, di satu titik evolusinya, mungkin saja berperawakan seperti kubung.

Lain halnya dengan burung. Cerita mereka pada dasarnya berbeda, berkitar di seputar perangkat yang memesona: bulu. Bulu burung adalah sisik reptilia yang dimodifikasi. Ada kemungkinan, pada awalnya, sisik tersebut dievolusikan untuk

Gambar 4.5 Terwelu  
loncat (*springhare*),  
*Pedetes capensis*.



Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

tujuan lain yang tetap membutuhkan peran pentingnya: insulasi panas tubuh. Pada dasarnya, bulu terbuat dari bahan keras yang dapat membentuk permukaan terbang yang ringan, rata, lentur, tetapi kaku. Sayap burung sangat lain dari kelopak kulit kendur kelelawar dan pterosaurus. Oleh karena itu, leluhur burung mampu membuat sayap yang benar, yang tidak harus merentang di antara tulang-tulang. Sudah cukuplah lengan bertulang di depan. Kekakuan bulunya sendiri mampu menangani sisanya. Kaki-kaki belakang pun bisa bebas untuk berlari. Jauh dari kata canggung dan kikuk di atas tanah – seperti kelelawar dan, kiranya juga, pterosaurus – burung dapat menggunakan kaki-kakinya untuk berlari, meloncat, bertengger, memanjat, menangkap mangsa, dan berkelahi. Kakak tua bahkan menggunakan kaki-kakinya seperti tangan manusia. Sementara itu, tungkai-tungkai depannya tetap menangani urusan terbang.

Berikut ini satu dugaan tentang awal-mula burung bisa terbang. Leluhur khayali kelompok hewan ini, yang bisa kita bayangkan sebagai dinosaurus kecil yang lincah, berlari cepat mengejar serangga, melompat ke udara dengan kaki-kaki belakang dan menerkam mangsa dengan mulutnya. Jauh sebelumnya, serangga telah berevolusi untuk mampu mengudara. Serangga terbang sangat pandai berkelit dan, jika terampil bermanuver di udara, si pemangsa akan lebih diuntungkan. Perilaku yang mirip-mirip seperti ini juga dilakukan kucing modern. Tampak sulit karena, waktu di udara, tak ada tumpuan untuk mengoreksi arah. Triknya adalah dengan menggeser pusat gravitasi tubuh. Bisa dilakukan dengan memanipulasi sikap tubuh dengan menggerakkan bagian-bagian tertentunya. Bisa kepala bisa

ekor, tetapi lengan adalah bagian yang paling lumrah digerakkan. Begitu lengan difungsikan untuk tujuan ini, gerakannya menjadi lebih efektif bila permukaannya ditambah untuk menangkap angin. Telah pula dikemukakan pula bahwa bulu pada lengan awalnya ditumbuhkan sebagai semacam jaring untuk menangkap serangga. Tidak semulok-muluk kedengarannya karena sebagian kelelawar menggunakan sayap-sayapnya untuk tujuan itu. Namun, menurut teori ini, penggunaan terpenting lengan adalah untuk kemudi dan kendali. Ada perhitungan yang menunjukkan bahwa gerakan-gerakan lengan yang paling pas untuk mengendalikan sudut dan putaran saat melompat sesungguhnya menyerupai gerakan-gerakan mengepak yang masih kasar.

Teori berlari, melompat, dan bermanuver di udara, bila dibandingkan dengan teori meluncur dari pohon, membalikkan urutan tahap-tahapnya. Pada teori meluncur dari pohon, peran awal sayap-sayap purwa adalah menghasilkan daya angkat. Belakangan, barulah sayap-sayap purwa dipakai untuk kendali, dan akhirnya kepakan. Pada teori melompat menerkam serangga, kendalilah yang muncul dahulu, baru kemudian lengan-lengan, dengan permukaannya, diperintah untuk menghasilkan daya angkat. Yang indah dari teori ini adalah bahwa sirkuit saraf yang digunakan untuk mengendalikan pusat gravitasi pada tubuh leluhur pelompat akan dengan sendirinya ikut membantu pengendalian lempeng-lempeng sayap dalam proses evolusinya kemudian. Barangkali, burung mulai terbang dengan melompat dari tanah, sementara kelelawar dengan meluncur dari atas pepohonan. Atau mungkin terbangnya

burung pun dimulai dengan meluncur dari atas pepohonan. Perdebatannya berlanjut.

Bagaimanapun, burung-burung modern sudah jauh lebih maju dari masa-masa awal itu. Berkali-kali lipat lebih maju, karena puncak-puncak Gunung Kemuskilan yang telah mereka taklukkan luar biasa banyaknya. Alap-alap kawah dapat terjun dari angkasa dengan kecepatan lebih dari 100 mil per jam saat mempersempit jarak menuju mangsanya. Elang dan kolibri melayang-layang dengan presisi jitu di satu tempat, layaknya helikopter canggih saja. Dara laut arktik menghabiskan lebih dari enam bulan tiap tahunnya pada migrasi tahunan mereka dari Arktik ke Antartika dan balik lagi, menempuh jarak 12.000 mil. Albatros kelana, dengan rentang sayap 10 kaki, mengitari kutub dengan *heading* searah jarum jam, ditenagai bukan oleh kepakan sayap, melainkan perhatian awas pada mesin alam berupa kecepatan angin yang berubah saat gelombang hawa dingin merangsek ke zona Roaring Forties. Sebagian burung, seperti pegar dan merak, hanya sesekali terbang menghambur saat dikagetkan tanda-tanda bahaya. Sebagian lain, seperti burung unta, rhea, dan moa raksasa (sudah punah) dari Selandia Baru, menjadi terlalu besar untuk bisa terbang dan pertumbuhan sayap-sayapnya justru merosot jika dibandingkan dengan kaki-kakinya yang begap, menjangkah, dan menendang. Pada ujung ekstrem yang lain, walet memiliki kaki yang rapuh dan kikuk, tetapi sayap-sayap sibak-belakangnya canggih dan mereka hampir tak pernah meninggalkan angkasa. Walet mendarat hanya untuk bersarang; bahkan saat kawin dan tidur pun sayap tetap terkembang. Ketika mendarat, walet harus memilih tempat tinggi karena tak dapat lepas landas dari dataran rata. Mereka



membangun sarang dari bahan-bahan yang dipungut di langit atau disabet dari pepohonan sambil bersuit kencang. Bagi seekor walet, turun ke bumi terasa seperti kondisi sulit yang tidak wajar – sebanding dengan, misalnya pada konteks manusia, terjun payung atau berenang di bawah air. Bagi kita, dunia adalah latar anteng bergeming bagi tindak-tanduk kita. Ditinjau dari sepasang mata hitam seekor walet, kondisi latar normalnya dunia adalah cakrawala yang senget-menget, ontang-anting tak henti-hentinya. Bumi kita yang ajek boleh jadi serupa wahana halilintar Dunia Fantasi dalam imajinasi burung walet.

Tidak semua burung mengepakkan sayapnya, tetapi burung yang membubung atau melayang kemungkinan besar berasal dari para leluhur yang mengepak. Terbang mengepak adalah terbang yang rumit dan belum dipahami setiap detailnya. Kita mungkin mengira sayap yang mengentak-entak kuat langsung menghasilkan daya angkat. Itu ada benarnya, terlebih pada saat lepas landas, tetapi yang berperan paling besar dalam menghasilkan daya angkat adalah bentuk sayap (dengan kecepatan udara yang memadai), seperti pada pesawat terbang. Sayap yang secara khusus dilekukkan atau dimiringkan dapat menghasilkan daya angkat bila angin bertiup ke arahnya atau – sama halnya – bila burung bergerak maju menyongsong arah datangnya angin, entah apa pun alasannya. Gerakan mengepakan sayap utamanya bertujuan menghasilkan dorongan maju yang diperlukan. Fungsi baling-baling pada sayap ini efektif bila sayap tidak sekadar dikepakan ke atas dan ke bawah. Justru, burung dengan pandainya memuntir sayap dari bahu, menyetel sendi-sendinya dengan teliti, dan imbas baik lainnya pun otomatis

muncul dari pembengkokan bulu-bulunya. Karena puntiran, setelan, dan pembengkokan ini, gerakan sayap ke atas dan ke bawah diterjemahkan menjadi dorongan ke depan, agak seperti entakan naik-turun ekor paus. Asalkan ada gerakan ke depan melintasi udara, sayap-sayap burung menghasilkan daya angkat dengan cara yang kurang lebih sama seperti sayap-sayap pesawat, meski sayap-sayap pesawat lebih sederhana karena terpaku mati. Makin tinggi kecepatannya, makin hebat daya angkat yang dihasilkan (itulah mengapa Boeing 747 bisa tetap melayang, meski bobotnya kolosal).

Hukum fisika bersekongkol untuk membuat terbang dengan sayap mengepak makin sulit bagi burung-burung besar. Misalkan burung-burung yang sama bentuk terus membesar. Bobot naik sebesar panjang pangkat tiga, sementara bidang sayap hanya naik sebesar panjang pangkat dua. Untuk tetap melayang di udara, burung-burung besar terpaksa harus membesarkan sayap-sayapnya secara tidak proporsional, dan/atau menambah kecepatan terbangnya secara tidak proporsional. Seiring terus membesarnya tubuh-tubuh burung ini, akan tiba waktunya – karena tanpa mesin jet atau piston – kekuatan otot yang dimiliki burung seukuran itu tak lagi kuat untuk menahannya tetap di udara. Titik kritis pada kisaran ukuran ini agak lebih kecil dari burung-burung hering dan albatros. Seperti kita ketahui, ada burung besar yang berhenti berupaya, mengandaskan diri di darat, dan hidup enak dengan terus membesar, seperti burung unta dan emu. Tetapi burung hering, kondor, dan albatros tidak kandas. Mengapa?

Dengan cerdik mereka memanfaatkan sumber tenaga eksternal. Kalau bukan karena panas matahari dan perubahan gravitasi bulan, udara dan laut akan bergeming. Energi

eksternal mendorong arus samudra, memompa angin, memuntir puting beliung, menggoyang atmosfer dengan kekuatan dahsyat yang mampu meratakan rumah atau membuka jalur perdagangan. Energi eksternal juga menimbulkan aliran angin panas ke atas yang, jika digunakan dengan bijak, dapat mengangkat tubuh ke mega-mega. Hering, elang, dan albatros menggunakan angin panas dengan sempurna. Merekalah kelihatannya satu-satunya kelompok hewan yang menyamai keterampilan kita dalam menambang energi cuaca. Sumber informasi utama saya tentang burung-burung yang mampu membubung adalah tulisan-tulisan Dr. Colin Pennycuick dari Universitas Bristol. Ia menggunakan pengetahuan spesialisnya sebagai pilot pesawat layang untuk memahami cara terbang burung dan untuk melayang di antara burung-burung agar dapat mempelajari teknik-teknik mereka secara langsung.

Hering dan elang menggunakan angin panas, persis seperti pilot pesawat layang. Angin panas adalah aliran hawa panas ke atas yang disebabkan area tanah di dasarnya basah dan kurang terkena sinar matahari. Para pilot pesawat layang sangat mengandalkan angin panas, dan pengalaman menemui keahlian mereka untuk mengenali titik-titiknya dari jauh. Ciri-ciri halus yang dapat dijadikan petunjuk keberadaan angin panas, antara lain, bentuk-bentuk khas awan kumulus di puncak kolomnya dan beberapa konformasi tanah tertentu di dasarnya. Teknik yang disetujui untuk kendali pesawat layang lintas alam adalah dengan naik memutar ke puncak kolom angin panas, misalnya hingga ketinggian satu mil, lalu meluncur turun, lurus ke arah yang ingin dituju. Laju turunnya perlahan: Seekor hering biasanya turun satu yard untuk setiap

10 yard ke depan. Artinya, jarak lintas yang dapat ditempuhnya hampir 10 mil, sebelum ia perlu mencari angin panas lain untuk mengangkat tubuhnya ke puncak kolom lagi.

Kebetulan, kolom-kolom angin panas kerap tersusun menyerupai lintasan ‘jalan’, yang dapat dilihat seorang pilot pesawat layang dengan membaca awan. Seperti pilot pesawat layang, hering pun mahir mengikuti lintasan-lintasan ini. Kadang-kadang, bila seekor hering mendapati jalan yang membentang ke arah yang ingin ditujunya, ia melayang di sepanjang lintasan itu, menuai daya angkat dari tiap angin panas, tanpa perlu mengitarinya dahulu. Dengan begitu, seekor hering dapat menempuh jarak yang amat jauh tanpa perlu berhenti untuk memutar. Hewan ini biasanya melakukan itu hanya ketika bepergian dari tempat mencari makan ke tempat bersarang. Lebih seringnya, hering tidak menempuh jarak jauh dengan lintasan lurus, tetapi menjelajah untuk mencari bangkai. Mereka juga memperhatikan tindak-tanduk hering yang lain. Kalau ada yang menemukan daging bangkai dan turun, yang lain tahu dan lekas bergabung. Dengan demikian, gelombang perhatian pun tersebar di seluruh angkasa, bagi gelombang nyala api unggul di puncak-puncak bukit, tersebar di seantero Inggris, yang memberi tanda datangnya Armada Spanyol.

Trik ‘perhatikan kawan’ serupa juga digunakan bangau putih untuk tujuan lain dalam migrasi tahunan panjang mereka dari Eropa bagian utara ke Afrika bagian selatan. Hewan ini melawat dalam kawanan berisi ratusan. Seperti hering, mereka melambung ke puncak-puncak angin panas, lalu terbang lintas alam hingga menemukan angin panas yang lain. Tapi meski mereka mengitari kolom termal bersama-sama,

saat beranjak dari sana, alih-alih merapatkan barisan, mereka justru menyebar dengan formasi garis sejajar. Dengan garis maju yang merentang begitu lebar, jika mereka melayang lurus saja, kemungkinan besar beberapa dari anggota kawanan akan menemukan angin panas lainnya. Bila mereka menemukannya, para jiran di barisan itu akan melihat mereka naik, lalu ikut bergabung. Dengan begitu, segenap isi kawanan besar itu ikut menikmati manfaat angin panas yang ditemukan oleh anggota yang mana pun.

Entah teori meluncur dari pohon ke pohon entah teori berlari lalu melompat, mana pun pandangan yang kita anut soal asal-mula kemampuan terbang burung, bagi hering dan elang, bangau dan albatros, meluncur hampir pasti merupakan kemampuan susulan. Mereka mengevolusikan teknik meluncur dari para leluhur yang berkepak dan berukuran lebih kecil. Untuk pemikiran yang menganggap bahwa meluncur dari pepohonan adalah titik tolak evolusi kemampuan terbang burung, hering modern – yang naik ke puncak angin panas, bukan pucuk pohon – merepresentasikan titik balik ke peluncuran, dengan kepakan sayap sebagai tahap perantaranya. Selama tahap perantara tersebut, sistem saraf mereka, menurut teori ini, mestilah membentuk sirkuit yang baru serta keterampilan kendali dan manuver yang baru. Dengan keterampilan-keterampilan baru ini, mereka mestilah jadi lebih efisien saat kembali ke terbang tanpa kepakan. Hewan cukup lazim kembali ke cara hidup yang jauh lebih purba, setelah ‘magang evolusi’ di cara hidup yang lain. Dan masuk akal jika dikatakan bahwa, usai magang, mereka punya bekal lebih baik untuk menjalani cara hidupnya yang asali. Burung yang membubung agaknya bukan contoh yang afdal,

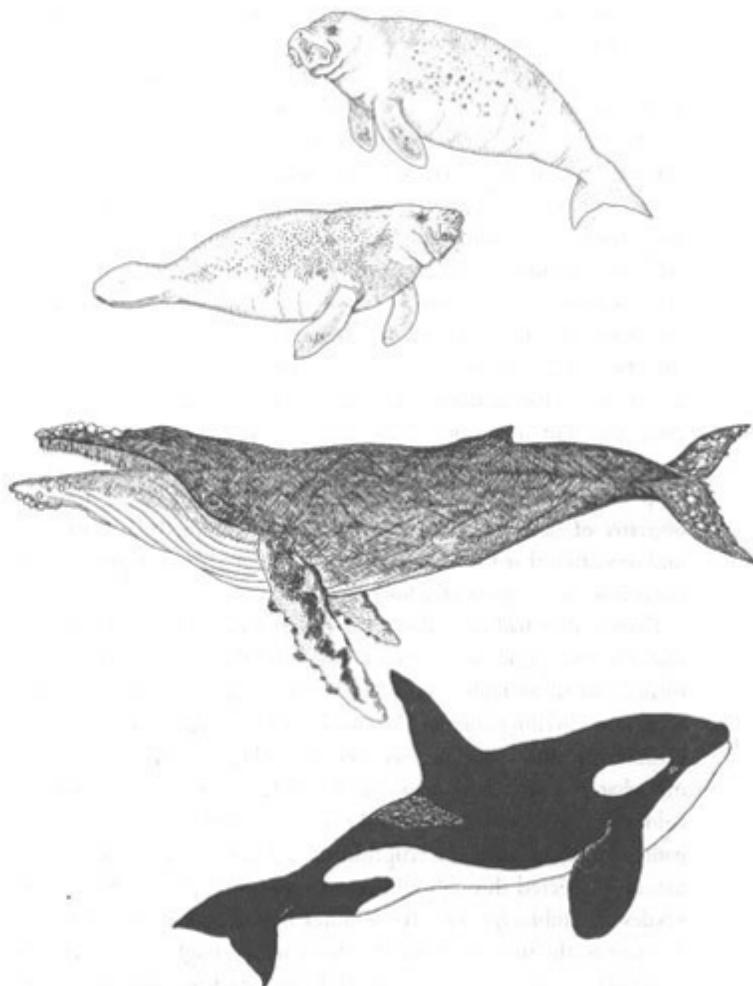
karena kita tidak mengetahui dengan pasti asal-muasal kemampuan terbangnya. Contoh lebih jelas dan tegas untuk kembalinya hewan ke cara hidup terdahulu adalah mereka yang telah kembali ke air, setelah menghabiskan sekian juta tahun di darat. Ke hewan-hewan inilah saya mengarahkan diskusi (Gambar 4.6), sekaligus untuk menutup bab ini.

Lima puluh juta tahun silam, para leluhur paus dan kelompok sapi laut (dugong dan lembu laut) adalah mamalia yang hidup di darat; mungkin karnivor untuk paus, herbivor untuk sapi laut. Leluhur yang lebih purba lagi dari hewan-hewan ini dan semua mamalia penghuni darat lainnya adalah ikan yang hidup di laut. Maka, kembalinya paus dan dugong ke air ibarat mudik. Tentu, kita bisa yakin bahwa hal tersebut terjadi secara gradual. Awalnya, mereka masuk ke air mungkin sekadar untuk mencari makan, seperti berang-berang modern. Hewan-hewan ini mestilah makin lama makin jarang di darat, barangkali lewat sebuah fase di mana mereka menyerupai anjing laut modern. Tapi kini, mereka selalu berada di air dan tak berdaya bila terdampar. Begitu pun, mereka menyandang sekian banyak pengingat akan leluhur penghuni daratnya dan, layaknya semua mamalia, memiliki relik-relik yang jauh lebih tua dari penjelmaan mereka sebelumnya di air. Paus bernapas dengan paru-paru, sebab leluhur darat mereka telah kehilangan fungsi insangnya. Tapi semua mamalia, termasuk paus dan kelompok sapi laut, memiliki jejak-jejak insang di embrionya: sisa-sisa yang dengan jelas menunjukkan masa lalu mereka di air. Siput air tawar pun telah kembali ke air dari darat, dan juga bernapas dengan paru-paru. Leluhur-leluhur terdahulu mereka hidup di laut, seperti kebanyakan famili siput modern. Siput tampaknya berpindah dari laut ke air

tawar melalui darat sebagai ‘jembatan’: Barangkali kehidupan di darat mempermudah transisi mereka. Hewan-hewan darat lain yang mudik ke dunia air meliputi kura-kura, kumbang air, laba-laba air, serta ichthyosaurus dan plesiosaurus yang sudah punah itu. Kura-kura memang dapat mengekstraksi oksigen dari air, tetapi hewan ini melakukannya bukan dengan insang, melainkan lapisan di mulut – dan pada beberapa kasus lapisan di dubur – dan, pada kura-kura tempurung lunak, kulit yang membungkus tempurungnya. Kumbang dan laba-laba air membawa gelembung udara saat turun ke air. Semua hewan ini kembali ke lingkungan berair tempat hidup para leluhur terdahulu mereka, tetapi ketika tiba di sana mereka hidup dengan cara berbeda karena kondisi di tempat hidup perantaranya.

Ketika hewan-hewan darat kembali ke air, mengapa mereka tidak menemukan kembali perangkat lengkap untuk hidup di air? Mengapa paus dan kelompok hewan sapi laut tidak menumbuhkan insang dan menghilangkan paru-parunya? Pertanyaan-pertanyaan ini membawa kita ke pelajaran penting lain yang disuguhkan Gunung Kemuskilan. Dalam evolusi, hasil-hasil ideal bukanlah satu-satunya pertimbangan. Titik awalnya juga menjadi faktor penentu: seperti pada cerita seorang pria yang, saat ditanya jalan menuju Dublin, menjawab, ‘Yang jelas, jangan dari sini.’ Gunung Kemuskilan punya banyak puncak. Ada banyak cara untuk hidup di air. Bisa menggunakan insang untuk menarik oksigen dari air, atau naik ke permukaan untuk bernapas. Terus-terusan ke permukaan tampak seperti kebiasaan aneh yang merepotkan. Mungkin iya, tetapi ingat: Para leluhur paus dan sapi laut bertolak dari titik yang dekat dengan puncak bernapas dengan paru-paru.





Gambar 4.6 Paus dan kelompok hewan sapi laut. Hewan-hewan yang kembali ke laut setelah ratusan juta tahun hidup di darat: (dari atas) dugong, *Dugong dugon*; lembu laut, *Trichechus senegalensis*; paus bungkuk, *Megaptera novaeangliae*; paus pembunuh, *Orcinus orca*.

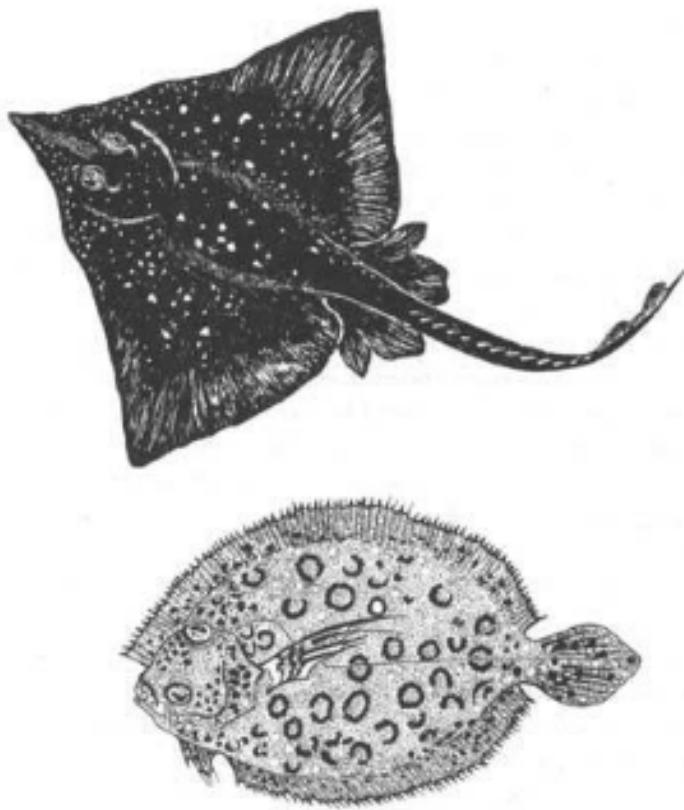
Semua organ dalam tubuhnya telanjur ditujukan untuk bernapas dengan paru-paru. Mungkin mereka bisa saja membentuk ulang semua organ itu dan bergabung dengan rute ikan-ikan, sambil memoles lagi sisa-sisa embrionik insang purba mereka. Tetapi itu berarti infrastruktur jasmani mereka bakal perlu dirombak total. Sama saja dengan turun ke lembah dalam di antara dua puncak dari Gunung Kemuskilan, dengan tujuan akhir memanjat puncak yang sedikit lebih tinggi. Tidak boleh terlalu sering dikatakan bahwa teori Darwinian tidak membolehkan kemunduran tentatif demi mencari tujuan jangka panjang.

Sekalipun mereka memang menuruni lembah itu tadi, belum tentu puncak insang, saat akhirnya berhasil mereka naiki, ternyata adalah puncak yang lebih tinggi. Insang tidak serta-merta lebih baik dari paru-paru bagi hewan yang hidup di air. Tentu nyaman kalau bisa terus bernapas di mana pun berada di dalam air, ketimbang harus jeda sebentar dari aktivitas untuk menyembul ke permukaan. Namun, anggapan kita itu diwarnai fakta bahwa kita bernapas setiap beberapa detik dan panik kalau pasokan udara ke tubuh terhenti barang sebentar. Setelah melalui seleksi alam di sepanjang jutaan generasi yang melaut, paus sperma dapat menyelam selama lima puluh menit, sebelum harus menarik napas lagi. Naik ke permukaan untuk mengambil napas, bagi paus, mungkin terasa seperti perlu buang air seni. Atau perlu makan. Jika bernapas kita bayangkan seperti makan, alih-alih keharusan vital yang perlu terus dipenuhi, jadi kurang pasti apakah setiap makhluk bawah air idealnya lebih baik punya insang. Ada hewan, seperti kolibri, yang kurang lebih setiap saat perlu makan. Bagi kolibri, yang perlu mengisap nektar setiap beberapa detik

selama tubuhnya terjaga, menyambangi bunga-bunga mungkin terasa seperti bernapas. *Sea-squirt*, invertebrata laut berbentuk kantong yang berkerabat jauh dengan vertebrata, tak henti-henti memompa air melalui tubuh mereka, menyaring partikel-partikel makanan. Organisme penyaring makanan seperti ini tidak dapat dikatakan menikmati kegiatan mencari makan layaknya hewan yang lain. Seekor *sea-squirt* mungkin akan merasa sesak dan panik kalau harus mencari makanan. *Sea-squirt* barangkali juga bingung mengapa begitu banyak hewan lebih memilih menerjang bahaya dan susah payah mencari makanan, daripada duduk santai dan menghirupnya saja.

Suka tidak suka, nyatanya riwayat kehidupan darat tertulis jelas di sejumlah tubuh paus dan dugong. Kalau mereka sengaja diciptakan untuk hidup di laut, mereka pasti jauh berbeda, dan jauh lebih mirip ikan daripada kenyataannya kini. Hewan-hewan dengan riwayat yang tampak jelas di sejumlah tubuh mereka adalah salah satu jenis bukti paling nyata bahwa makhluk hidup tidak diciptakan untuk cara hidupnya saat ini, tetapi berevolusi dari leluhur yang lain sekali.

Riwayat ikan sebelah, ikan lidah, dan ikan piring tampak nyata di sejumlah tubuh mereka, hingga ke titik yang mengerikan. Pencipta yang waras, yang merancang seekor ikan pipih dari nol, mustahil membayangkan di papan gambarnya distorsi kepala seabsurd itu demi membuat kedua mata ada di sisi yang sama. Dia pasti, sedari awal, akan memilih desain seperti *skate* atau *pari*, ikan yang telungkup dengan kedua mata ditempatkan secara simetris di sisi atas tubuh (Gambar 4.7). Ikan sebelah dan ikan lidah terpuntir sedemikian rupa karena sejarahnya; sebab para leluhur mereka berbaring menyam-



Gambar 4.7 Dua cara menjadi ikan pipih: *skate* (sejenis ikan pari), *Raja batis* (atas), memipih di perutnya, sementara ikan piring (*plate fish*), *Bothus lunatus*, berbaring miring.

ping. Kesimetrisan ikan *skate* dan pari bisa elok karena sejarah hewan-hewan ini kebetulan berbeda: Ketika para leluhurnya hidup menetap dasar laut, mereka berbaring telungkup, bukan menyamping. Kalau saya bilang ‘kebetulan’ berbeda, bukan berarti tidak ada alasan kuat atas perbedaan itu. Ikan

*skate* dan pari diturunkan dari kelompok hiu, dan tubuh hiu memang sedikit lebih pipih dibanding tubuh ikan bertulang yang biasanya lonjong dan menyerupai bilah. Ikan bertubuh bilah lonjong tidak dapat berbaring telungkup, tetapi terpaksa menyamping. Ketika para leluhur ikan sebelah hidup menetap di dasar laut, mereka memacu langkah ke puncak terdekat Gunung Kemuskilan, walau mungkin ada puncak lebih tinggi yang bisa mereka daki – puncak simetris *skate*/pari – andai mau memaksa turun ke sebuah lembah kecil agar sampai di kaki puncak tersebut. Saya ulangi, menuruni lereng-lereng Gunung Kemuskilan adalah tindakan yang tidak diizinkan oleh seleksi alam, dan ikan-ikan ini tak punya pilihan selain memulihkan penglihatan dengan menggeser satu mata ke sisi tubuh yang lain. Para leluhur ikan *skate* juga bergegas ke puncak ikan pipih terdekat mereka, yang berujung pada kesimetrisan yang elegan. Tentu, terkait ungkapan tak punya ‘pilihan’ dan ‘bergegas’ naik ke puncak gunung, Anda mengerti, seperti biasa, bukan individu ikannya yang dimaksud di sini. Silsilah evolusinalah yang saya maksud, dan istilah ‘pilihan’ mengacu pada rute-rute alternatif perubahan evolusi yang tersedia.

Saya telah menekankan bahwa turun bukit tidak diizinkan, tapi tidak diizinkan oleh siapa? Dan mungkinkan itu *tidak pernah* terjadi? Jawaban untuk kedua pertanyaan itu lebih kurang sama dengan pertanyaan soal sungai, yang tidak ‘diizinkan’ mengalir selain sesuai arah jalur air bakunya sendiri. Air tidak diperintahkan untuk tetap di dalam koridor tepi-tepi sungai; namun, untuk alasan-alasan yang telah dipahami dengan baik, biasanya memang begitulah adanya. Begitu pun, kadang kala, air meluber ke luar, atau bahkan menjebol, tepi-tepi sungai.

Alhasil, sungai itu pun mungkin didapati telah mengubah jalur tetapnya.

Apa yang sekiranya mengizinkan silsilah yang tengah berevolusi sejenak memutar balik arah dan, dengan demikian, membuka jalan baru untuk naik ke puncak Gunung Kemuskilan yang tadinya tak dapat diakses? Pertanyaan seperti inilah yang menarik perhatian genetikawan hebat Sewall Wright yang, omong-omong, merupakan orang pertama yang memakai kiasan bentang alam untuk evolusi, nenek moyang dari Gunung Kemuskilan saya. Wright, seorang Amerika, adalah satu dari tiga seteru sengit yang, pada tahun 1920an dan 1930an, mendirikan paham yang sekarang kita sebut neo-Darwinisme. (Dua yang lain orang Inggris, bocah-bocah ajaib yang tiada tara tapi suka cekcok, R.A. Fisher dan J. B. S. Haldane, dan tidak adil kalau tidak menambahkan bahwa pertikaian sengit di antara ketiganya agaknya disulut oleh mereka, bukan Wright.) Wright menyadari bahwa, secara paradoksal, seleksi alam dapat menjadi kekuatan melawan kesempurnaan ekstrem. Alasannya persis seperti yang baru saja kita bahas tadi. Menuruni lembah dilarang oleh seleksi alam. Spesies yang terjebak di bukit kecil di kaki gunung tidak dapat lolos ke puncak-puncak lebih tinggi selama seleksi alam mengandangkannya di puncak bukit kecil tersebut. Kalau saja seleksi alam agak mengendurkan cengkeramannya sejenak, spesies tersebut kiranya bisa meniti jalan turun dari bukit kecil itu, hingga cukup jauh untuk menyeberangi sebuah lembah menuju lereng-lereng lebih rendah di kaki puncak yang tinggi. Sesampainya di sana, spesies itu siap, ketika seleksi alam mencengkeramnya lagi, untuk berevolusi dengan cepat ke lereng-lereng lebih tinggi gunung itu. Maka, bila dilihat secara



global, salah satu resep peningkatan dalam evolusi adalah periode-periode seleksi ketat yang disela periode-periode longgar. Barangkali kelonggaran seperti ini memang penting dalam evolusi di lapangan. Kapan ‘kelonggaran’ ini kiranya terjadi? Salah satu kemungkinannya adalah saat ada kekosongan yang perlu diisi. Di tataran kecilnya, hal ini akan terjadi setiap kali sebuah populasi tumbuh mekar karena jumlahnya lebih kecil dari yang dapat ditampung di wilayahnya. Mungkin akan terbuka ladang kesempatan dan kelonggaran seleksi ketika sebuah benua perawan pertama kali ditinggali setelah disapu bersih oleh sebuah musibah besar. Mungkin setelah dinosaurus punah, mamalia yang tersisa panen kesempatan yang begitu berlimpah sampai-sampai sebagian dari silsilah mereka menjadi ‘kurang waspada’, melorot turun sebentar, dan karenanya menemukan puncak-puncak Gunung Kemuskilan yang lebih tinggi dan lazimnya tak mampu mereka daki.

Resep lainnya adalah transfusi gen-gen baru dari tempat-tempat lain. Inilah teori yang, di Bab 2 tentang jaring laba-laba, saya sebut akan saya bahas kembali. Pada model jaring laba-laba NetSpinner, terdapat tidak hanya satu populasi seksual pemintal jaring tersimulasi, tetapi tiga ‘dem’ yang berevolusi secara paralel. Ketiganya dibayangkan berevolusi secara mandiri di wilayah geografisnya sendiri-sendiri. Tapi – dan ini poinnya – tidak *sepenuhnya* mandiri. Ada cucuran gen, yang berarti bahwa ada individu yang terkadang bermigrasi, dari satu populasi lokal ke populasi lainnya. Saya mengutarakannya dengan ungkapan bahwa gen-gen migran ini semacam suntikan ‘ide-ide’ baru: ‘Seolah-olah, sebuah subpopulasi yang berhasil mengutus gen-gen yang

“menyarankan” kepada populasi yang kurang berhasil cara lebih baik untuk menyelesaikan masalah konstruksi jaring’. Sama dengan: Dipandu naik, oleh selembar peta yang diseludupkan, ke puncak lebih tinggi dari gunung kiasan itu.

Kini kita siap menangani sasaran favorit kalangan kreasionis, dan karang penghalang unggulan bagi calon pemeluk ajaran evolusi, bertengger terhuyung-huyung di puncak tebing paling terjal di Gunung Kemuskilan: mata.

*Catatan:* Setelah buku ini masuk proses ofset, J. H. Marden dan M. G. Kramer menerbitkan hasil studi menarik mereka tentang lalat batu, yang mengetengahkan satu lagi rute pendakian Gunung Kemuskilan menuju kemampuan terbang dengan sayap mengepak (Marden, J. H., & Kramer, M. G. (1995) ‘Locomotor performance of insects with rudimentary wings’. *Nature*, 377, 332-4). Lalat batu adalah serangga terbang yang agak primitif. Primitif dalam arti, meski merupakan serangga modern, hewan ini dianggap lebih menyerupai para leluhur daripada serangga modern lain menyerupai para leluhur. Spesies yang diteliti Marden dan Kramer, *Allocapnia vivipara*, berselancar di permukaan air mengalir dengan mengangkat dan menggunakan sayap-sayapnya sebagai layar penangkap angin. Kecepatan berlayar kira-kira proporsional dengan panjang sayap. Individu dengan sayap terkecil mampu berlayar lebih cepat dari individu yang tak angkat sayap sama sekali. Sayap-sayap terkecil itu kira-kira seukuran dengan lempeng insang yang dapat digerakkan pada serangga-serangga fosil purba. Boleh jadi, hewan-hewan leluhur tanpa sayap hidup di permukaan air dan mengangkat lempeng-lempeng insang mereka sebagai layar. Bila demikian, pastilah ada tanjakan landai untuk mendaki Gunung Kemuskilan, saat lempeng-lempeng insang tumbuh menjadi layar-layar yang lebih ampuh. Untuk langkah berikutnya menuju terbang mengepak pada hipotesis ini, Marden dan Kramer telah melakukan observasi lain yang relevan. Spesies lalat batu yang lain, *Taeniopteryx burksi*, juga berselancar di sepanjang permukaan air, tetapi dengan cara mengepakkkan sayap-sayapnya. Mungkin serangga, pada pendakian menuju puncak terbang Gunung Kemuskilan, telah melewati fase berlayar seperti *Allocapnia*, kemudian fase berkepak di atas permukaan seperti *Taeniopteryx*. Tidak sulit membayangkan kalau serangga ringan berkepak yang mendengung di atas permukaan dapat

sese kali terangkat oleh embusan angin. Lantas, terbukalah jalur pendakian saat sayap-sayap berkepak itu membuat tubuh mereka melayang untuk durasi yang makin lama makin panjang.



## BAB 5

### EMPAT PULUH JALUR MENUJU PENCERAHAN

SEMUA HEWAN HARUS BERURUSAN DENGAN DUNIANYA, dan benda-benda di dalamnya. Mereka berjalan di atasnya, merangkak di bawahnya, berkelit agar tak menabraknya, memungutnya, memakannya, kawin dengannya, lari darinya. Dahulu kala, ketika evolusi masih amat belia, hewan harus berkontak fisik dengan benda-benda, barulah mereka tahu benda-benda itu ada di situ. Betapa melimpah manfaat yang menanti hewan pelopor teknologi pengindraan jarak jauh: tahu ada rintangan sebelum membenturnya; ada pemangsa sebelum diterkamnya; ada makanan yang masih di luar jangkauan tetapi terletak di mana pun di lingkungan sekitar. Apakah kiranya teknologi canggih ini?

Matahari tidak hanya menyediakan energi untuk memutar roda-roda gigi kimiawi kehidupan. Sang surya juga menawarkan peluang pengadaan teknologi pemandu jarak jauh. Ia menyelemuti tiap milimeter persegi permukaan Bumi dengan guyuran foton: partikel-partikel renik yang melintas lurus dengan kecepatan tertinggi yang diizinkan alam semesta, berselang-seling dan memantul melalui setiap lubang dan celah tanpa terkecuali. Karena foton melintas lurus dengan amat cepatnya, karena beberapa benda menyerapnya lebih kuat dari yang lain dan beberapa benda memantulkannya lebih kuat dari yang lain, dan karena partikel-partikel ini selalu berlimpah dan selalu menyebar luas, foton membuka peluang munculnya teknologi pengindraan jarak jauh dengan taraf

akurasi dan daya yang dahsyat. Teknologi tersebut hanya perlu mendeteksi foton dan – lebih sulit lagi – membedakan arah-arah datangnya. Apakah peluang ini dimanfaatkan? Tiga miliar tahun kemudian, Anda tahu jawabannya, sebab Anda bisa membaca kata-kata ini.

Darwin membuka uraiannya tentang ‘Organ dengan kesempurnaan dan kerumitan tiada tara’ dengan mata:

Mengira bahwa mata, dengan semua gawai kelas wahidnya untuk menyesuaikan fokus pada bermacam jarak, untuk menampung jumlah cahaya yang jamak, serta untuk mengoreksi aberasi sferis dan kromatik, boleh jadi dibentuk oleh seleksi alam, mestilah tampak, rela saya akui, muskil semuskil-muskilnya.

Ada kemungkinan Darwin dipengaruhi keragu-raguan istrinya, Emma, terhadap pokok ini. Lima belas tahun sebelum *Asal Mula Spesies*, ia pernah menulis sebuah esai panjang yang memaparkan kerangka teori evolusi melalui seleksi alam. Ia ingin Emma menerbitkan esai tersebut saat ia meninggal dunia dan mengizinkan istrinya itu membacanya. Catatan pinggir yang ditulis Emma ikut tercetak dalam terbitannya dan menariknya ia mengomentari prasaran Darwin bahwa mata manusia ‘kemungkinan diperoleh melalui seleksi gradual atas penyimpangan-penyimpangan kecil tetapi senantiasa berguna’. Catatan Emma berbunyi, ‘Praduga yang bukan main/E.D.’ Jauh setelah *Asal Mula Spesies* diterbitkan, Darwin mengaku, dalam sepucuk surat kepada seorang sejawat dari Amerika: ‘Mata, hingga kini, membuat saya bergidik ngeri, tetapi bila saya renungkan jenjang-jenjang halus yang kita ketahui, nalar saya berkata saya harus menaklukkan kengerian itu.’ Keragu-raguan Darwin yang timbul sesekali ini boleh

dikata serupa dengan keragu-raguan para fisikawan yang saya kutip di awal Bab 3. Akan tetapi, Darwin melihat keragu-raguannya sebagai tantangan untuk terus berpikir, bukan dalih untuk menyerah.

Sambil lalu, sebutan ‘mata’ kurang pantas kita gunakan saat membahas masalah ini. Secara otoritatif sudah diperkirakan bahwa mata telah berevolusi tak kurang dari empat puluh kali, dan boleh jadi lebih dari enam puluh kali, secara terpisah di berbagai wilayah kingdom animalia. Di beberapa kasus, mata-mata ini menggunakan prinsip-prinsip yang radikal perbedaannya. Sembilan prinsip khas telah dikenali di antara empat puluh hingga enam puluh mata yang telah berevolusi secara mandiri. Saya akan menyebutkan beberapa dari sembilan tipe mendasar mata – yang dapat kita bayangkan sebagai sembilan puncak di berbagai bagian *mandala meru* Gunung Kemuskilan – di sepanjang uraian saya.

Lantas bagaimana kita tahu bahwa sesuatu telah berevolusi secara mandiri di dua kelompok hewan? Contohnya, bagaimana kita tahu bahwa kelelawar dan burung mengembangkan sayap-sayap mereka sendiri-sendiri? Keunikan kelelawar di antara mamalia lainnya adalah sayap-sayapnya yang sejati. Boleh dianggap bahwa mamalia leluhur punya sayap, dan semuanya – kecuali kelelawar – kemudian telah kehilangan sayap-sayap mereka. Tapi agar anggapan itu benar, diperlukan kejadian – dalam jumlah yang tak munasabah – hilangnya sayap secara terpisah, dan bukti yang ada mendukung kewajaran pikir bahwa hal tersebut tidak terjadi. Mamalia leluhur menggunakan kaki-kaki depan mereka bukan untuk terbang, tetapi berjalan, seperti yang masih dilakukan oleh mayoritas keturunan mereka. Melalui

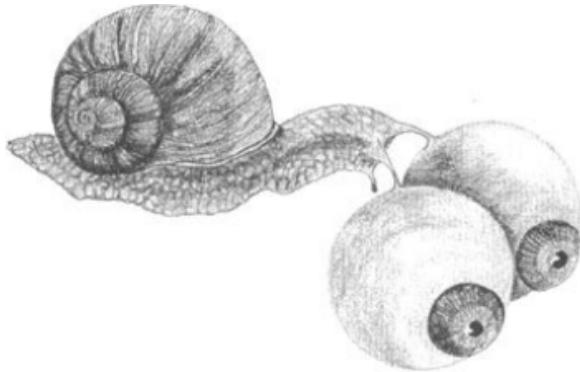
penalaran yang serupa pulalah kita tahu bahwa mata telah muncul berkali-kali secara mandiri di kingdom animalia. Kita juga dapat menggunakan informasi lain, seperti perincian cara mata berkembang di dalam embrio. Katak dan cumi-cumi, contohnya, sama-sama memiliki mata ala kamera yang baik, tetapi mata-mata ini berkembang dengan cara yang amat berlainan di kedua embrionya sehingga kita dapat yakin bahwa keduanya berevolusi secara terpisah. Namun, tidak berarti leluhur bersama katak dan cumi-cumi tak bermata sama sekali. Saya takkan kaget kalau leluhur bersama semua hewan yang ada hingga saat ini, yang barangkali hidup satu miliar tahun silam, memiliki mata. Mungkin hewan leluhur itu punya semacam sepetak zat warna (pigmen) peka cahaya yang masih kasar dan hanya dapat membedakan malam dari siang. Namun mata, dalam pengertian peranti canggih pembentuk citra, telah berevolusi berkali-kali secara sendiri-sendiri, kadang berkonvergensi ke desain yang serupa, kadang muncul dengan desain yang bukan main bedanya. Baru-baru ini ada bukti baru yang menggembirakan terkait pertanyaan keterpisahan evolusi organ mata di berbagai wilayah kingdom animalia. Pembahasan mengenainya saya tunda hingga akhir bab ini.

Menilik keberagaman mata hewan, saya akan sering menyebutkan letak dan posisi ditemukannya tiap jenis mata di lereng-lereng Gunung Kemuskilan. Tapi ingatlah bahwa semuanya itu mata hewan modern, bukan mata hewan leluhur yang sesungguhnya. Kiranya mata hewan-hewan modern dapat memberi kita petunjuk mengenai jenis-jenis mata yang ada pada hewan-hewan leluhur. Setidaknya, mata hewan modern menunjukkan bahwa mata yang kita pandang

tergeletak di tengah-tengah tanjakan menuju Gunung Kemuskilan pun tetap bisa berfungsi. Hal ini sangat penting karena, seperti telah saya utarakan, tak satu pun hewan bertahan dan berkembang dengan menjadi tahap perantara di sebuah jalur evolusi. Yang kita anggap sebagai tanjakan di lereng menuju mata yang lebih canggih barangkali, bagi hewan itu sendiri, justru merupakan organ paling vitalnya dan sangat mungkin merupakan mata ideal khusus untuk cara hidupnya. Mata pembentuk citra beresolusi tinggi, misalnya, tidak cocok untuk hewan-hewan berukuran amat kecil. Mata-mata berkualitas tinggi harus melampaui ukuran tertentu – ukuran absolut, bukan ukuran relatif terhadap tubuh si hewan – dan makin besar makin baik dalam pengertian yang absolut pula. Untuk hewan yang sangat kecil, mata yang jelas-jelas besar mungkin terlalu mahal untuk dibuat serta terlalu berat dan bongsor untuk dibawa-bawa. Siput akan kelihatan konyol kalau kedua matanya memiliki daya lihat mata manusia (Gambar 5.1). Siput yang menumbuhkan mata yang lebih besar sedikit saja dari ukuran reratanya saat ini kiranya mampu melihat lebih baik dari para rivalnya. Tetapi siput itu terpaksa menyunggi beban besar ke mana-mana dan, karenanya, kurang mampu bertahan hidup. Sambil lalu, mata terbesar yang pernah didokumentasikan diameternya 37 sentimeter. Gergasi yang sanggup membawa mata semacam ini adalah cumi-cumi raksasa dengan tentakel-tentakel sepanjang 10 meter.

Menerima batasan-batasan yang disuguhkan metafora Gunung Kemuskilan, kita turun hingga ke dasar lereng-lereng indra penglihatan. Di sini kita menemukan mata-mata yang amat sederhana sehingga hampir tak pantas diakui sebagai

mata sama sekali. Lebih baik jika menyebutnya permukaan tubuh yang agak sensitif terhadap cahaya. Sebutan ini cocok untuk beberapa organisme bersel tunggal, ubur-ubur, bintang laut, lintah, dan aneka ragam cacing. Hewan-hewan seperti itu tidak dapat membentuk sebuah citra, atau bahkan mengetahui arah datangnya cahaya. Yang dapat (lamat-lamat) mereka rasakan adalah hadirnya cahaya (benderang) di suatu tempat di lingkungan sekitar. Anehnya, ada bukti kuat tentang sel-sel yang merespons cahaya pada organ-organ genital kupu-kupu jantan dan betina. Bukan mata yang membentuk citra, tetapi sel-sel ini dapat membedakan antara gelap dan terang dan dapat mewakili titik awal yang kita maksud saat membahas asal mula purbakala evolusi mata. Bagaimana kupu-kupu ini menggunakan sel-sel itu, tampaknya tak ada orang yang tahu – bahkan William Eberhard sekalipun, yang buku memukanya, *Sexual Selection and Animal Genitalia*, menjadi sumber utama saya untuk informasi ini.



Gambar 5.1 Siput fantasi dengan dua mata yang cukup besar untuk dapat melihat sebaik manusia.

Jika kita bayangkan dataran di bawah Gunung Kemuskilan itu dihuni hewan-hewan leluhur yang sama sekali tidak terpengaruh oleh cahaya, kulit-kulit peka tapi-tak-melek-arah-datangnya-cahaya pada bintang laut dan lintah (serta alat-alat kelamin kupu-kupu) baru berada sedikit di atas lereng-lereng rendah, tempat dimulainya jalur pendakian. Jalur ini tidak sulit ditemukan. Bahkan, mungkin, ‘dataran’ ketakpekaan total terhadap cahaya tersebut memanglah kecil. Boleh jadi, memang sudah ‘nasib’ sel-sel hidup untuk terpengaruh cahaya – kemungkinan yang membuat alat-alat kelamin kupu-kupu yang peka cahaya tadi tampak tak seganjil sebelumnya. Sinar cahaya terdiri atas aliran lurus foton-foton. Saat menumbuk molekul dari zat berwarna, foton dapat terhenti di lintasannya dan molekul tersebut berubah ke bentuk lain dari molekul yang sama. Bila ini terjadi, energi dilepaskan. Pada tumbuhan hijau dan bakteri hijau, energi ini dipakai untuk membangun molekul-molekul makanan, dalam serangkaian proses yang disebut fotosintesis. Pada hewan, energi ini dapat memicu reaksi pada saraf, dan inilah langkah pertama dalam proses yang dinamai melihat, bahkan pada hewan-hewan yang matanya tidak kita kenali sebagai mata. Kasarnya, yang mana pun dari beragam macam pigmen berwarna boleh. Pigmen-pigmen semacam itu jamak ada, untuk bermacam-macam alasan selain menjebak cahaya. Langkah-langkah gontai pertama menaiki lereng-lereng Gunung Kemuskilan mestilah berupa peningkatan gradual molekul-molekul pigmen. Ada tanjakan rendah dan panjang menuju peningkatan – mudah didaki dengan langkah yang pendek-pendek.

Tanjakan dataran rendah ini membentang jauh menuju evolusi makhluk hidup yang sepadan dengan fotosel, sebuah



sel khusus untuk menangkap foton dengan sebuah pigmen dan menerjemahkan dampaknya ke dalam denyut-denyut saraf. Saya akan menggunakan kata fotosel untuk menyebut sel-sel di dalam retina (pada manusia, bernama sel batang dan sel kerucut) yang dikhususkan untuk menangkap foton. Cara cerdik sel-sel ini adalah dengan menambah jumlah lapisan pigmen yang siap menangkap foton. Tambahan jumlah ini penting karena sebuah foton kemungkinan besar dapat menembus satu lapisan pigmen mana pun dan keluar tanpa cedera. Makin banyak lapisan pigmennya, makin besar peluangnya untuk menangkap foton. Mengapa jumlah foton yang terjerat dan jumlah yang lolos ini penting? Bukankah masih banyak foton yang tersedia? Tidak, dan pokok ini fundamental bagi pemahaman kita akan desain mata. Ada semacam ekonomi foton, sebuah ekonomi yang sama kejinya dengan ekonomi moneter manusia dan disertai kompromi yang tak bisa dielakkan.

Sebelum kita masuk ke bahasan tentang kompromi ekonomis ini, tidak diragukan lagi bahwa, terlepas dari faktor eksternal apa pun, pasokan foton ada kalanya seret. Pada 1986, di suatu malam cerah penuh bintang, saya membangunkan Juliet, putri dua tahun saya, dan menggendongnya, masih terbungkus selimut, keluar rumah ke taman. Di situ saya mengarahkan wajahnya yang terkantuk-kantuk ke lokasi Komet Halleys sebagaimana diberitakan. Juliet kecil tak paham perkataan saya, tapi tetap saya bisik ke telinganya cerita tentang komet itu dan bahwa saya pasti takkan melihatnya lagi, tapi dia mungkin masih bisa saat usianya tujuh puluh delapan nanti. Saya jelaskan, dia saya bangunkan supaya bisa bercerita kepada cucu-cucunya nanti pada 2062 nanti bahwa dia sudah

pernah melihat komet itu, dan barangkali dia juga akan mengingat ayahnya yang murah tangan dan seenak perut menggendongnya ke luar, malam-malam, untuk menunjukkan peristiwa itu. (Saya bahkan mungkin membisikkan kata-kata murah tangan dan seenak perut karena anak kecil suka dengan bunyi kata-kata yang tidak mereka ketahui, saat dilafalkan dengan teliti.)

Boleh jadi beberapa foton dari Komet Halley memang menyentuh retina Juliet malam itu pada 1986, tetapi, jujur saja, saya sendiri susah payah yakin bahwa saya bisa melihat komet itu. Kadang saya seperti membayangkan bercak halus kelabu di sekitar titik yang benar di angkasa. Kadang lagi, bercak itu luntur. Masalahnya, jumlah foton yang jatuh ke retina-retina kami hampir nol.

Seperti rintik hujan, foton tiba pada waktu yang tidak beraturan. Ketika hujan benar-benar turun, kita tak lagi sangsi dengan fakta itu, sambil membatin kalau saja kita sedia payung. Tapi bila hujan turunnya bertahap, bagaimana kita menentukan kapan persisnya hujan dimulai? Kita merasakan satu tetesan, lalu dengan cemas melihat ke atas dan merasa kurang yakin hingga tetesan kedua atau ketiga mendarat. Bila hujan menetes jarang-jarang seperti ini, orang yang satu bilang hujan turun, sementara kawannya tidak. Tetesan-tetesannya bisa cukup jarang, mengenai orang yang satu semenit sebelum kawannya. Agar benar-benar yakin ada cahaya, foton perlu berderai-derai menumbuk retina kita dengan tingkat kecepatan yang lumayan tinggi. Ketika saya dan Juliet menatap luas ke arah Komet Halley, foton-foton dari komet itu mungkin menumbuk fotosel-fotosel pada retina mata kami berdua dengan kecepatan yang bukan main



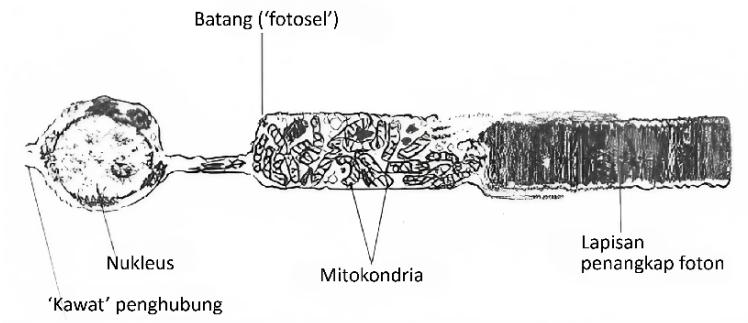
lambatnya: sekitar satu foton per empat puluh menit! Ini berarti, satu fotosel bisa merasa, ‘Ya, ada cahaya di sana,’ sementara mayoritas besar fotosel jirannya tidak. Satu-satunya alasan saya menerima sensasi yang lamat-lamat akan adanya benda berbentuk komet adalah karena otak saya merangkum putusan-putusan dari ratusan fotosel. Dua fotosel menangkap lebih banyak foton dari satu. Tiga menangkap lebih banyak dari dua, dan seterusnya di sepanjang lereng Gunung Kemuskilan. Mata canggih seperti mata kita memiliki jutaan fotosel yang berkerumun padat seperti tumpukan di selembar permadani, dan tiap-tiap di antara mereka dipancang di sana untuk menangkap sebanyak mungkin foton.

Gambar 5.2 adalah tipikal fotosel canggih – kebetulan, dari manusia, tetapi fotosel-fotosel lain pun cukup serupa. Yang tampak seperti kumpulan belatung menggeliat di bagian tengah gambar itu adalah mitokondria. Mitokondria adalah jasad-jasad renik yang hidup di dalam sel. Mereka awalnya turun dari bakteri parasit, tetapi lantas dipertahankan karena kemampuannya menghasilkan energi di semua sel kita. Yang tampak terpenggal di ujung kiri gambar adalah kawat penghubung saraf dari fotosel itu. Susunan selaput berbentuk persegi panjang apik, yang berbaris rapi di sebelah kanan, adalah tempat foton ditangkap. Tiap lapisan mengandung molekul pigmen vital penangkap foton. Saya hitung ada 91 satu lapisan selaput di gambar ini. Jumlah pastinya tidak begitu penting: Untuk urusan tangkap-menangkap foton, makin ramai makin seru, meski akan ada biaya operasional yang membuat jumlahnya tidak jadi terlalu banyak. Intinya, 91 selaput lebih ampuh menghentikan foton dibanding 90, 90 lebih ampuh dibanding 89, dan seterusnya hingga satu

selaput, yang lebih ampuh dibanding nol. Inilah yang saya maksud saat berkata ada tanjakan mulus menaiki Gunung Kemuskilan. Kita berhadapan dengan tebing curam yang mencuat tiba-tiba jika, misalnya, jumlah selaput di atas 45 sangat efektif sementara jumlah di bawah 45 sekali tidak efektif. Baik akal sehat maupun bukti yang ada tidak menggiring kita untuk curiga bahwa ada pemegatan yang begitu tiba-tiba.

Seperti telah kita lihat, organ penglihatan cumi-cumi mirip dengan vertebrata, tetapi hewan ini telah mengevolusikan organ itu secara mandiri. Bahkan fotosel-fotosel mereka pun sangat mirip. Perbedaan utamanya: Pada cumi-cumi, lapisannya berupa cincin yang ditumpuk di sekitar tabung kopong, bukan dijejalkan jadi setumpuk cakram. (Perbedaan superfisial semacam ini biasa dalam evolusi, untuk alasan yang sama remehnya dengan, misalnya, sakelar lampu di Inggris ditekan ke bawah untuk menyalakan, sementara di Amerika untuk mematikan.) Semua fotosel hewan taraf maju memainkan aneka versi dari trik yang sama, yaitu menambah jumlah lapisan selaput yang dijejali pigmen yang harus dilewati foton kalau lolos tak tertangkap. Dari sudut pandang Gunung Kemuskilan, pokok pentingnya adalah bahwa satu lapisan ekstra akan sedikit meningkatkan kans untuk menangkap foton, terlepas dari sebanyak, atau sesedikit, apa lapisan yang sudah ada. Pada akhirnya, bila sebagian besar foton telah ditangkap, akan berlaku hukum imbalan menurun untuk kian tingginya biaya memproduksi lebih banyak lapisan lagi.

Tentu saja, di alam liar, tujuan mendeteksi Komet Halley, yang kembali tiap 76 tahun dengan kontribusinya foton terpantul-



Gambar 5.2 Perangkat penangkap foton atau ‘fotosel biologis’: satu buah sel retina (sel batang) manusia.

nya yang tak berarti, bukan tujuan yang menggiurkan. Tapi, bagi burung hantu, berguna sekali kalau punya mata yang cukup peka untuk bisa melihat di bawah sinar temaram bulan atau bahkan sinar sayu bintang. Di malam biasa, satu fotosel kita mungkin menerima foton dengan kecepatan satu per detik, yang memang lebih tinggi dari kecepatan untuk kasus komet tadi, tetapi tetap cukup lambat untuk menimbulkan kebutuhan menangkap setiap foton yang ada jika bisa. Namun, bila kita membahas sulitnya ekonomi foton, akan keliru jika kita menduga kesulitan tersebut hanya terjadi pada malam hari. Pada hari yang cerah, foton dapat menabuh retina bak hujan tropis yang lebat, tetapi tetap ada masalah. Hakikat dari melihat citra berpola adalah bahwa fotosel di aneka bagian retina harus melaporkan balik beragam intensitas cahaya, yang berarti berbagai kecepatan derai di berbagai bagian dari hujan badi foton itu harus dicermati. Penyortiran foton yang datang dari berbagai titik halus pada tayangan itu dapat berakibat pemiskinan foton lokal yang sama seriusnya

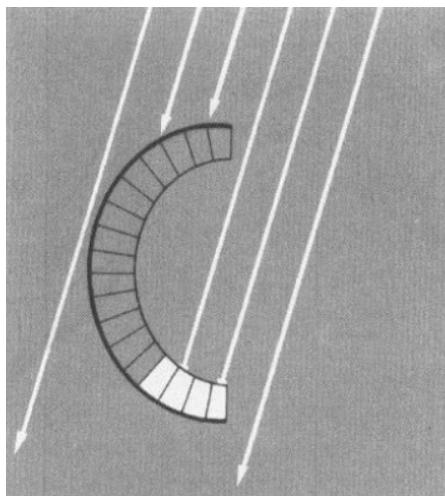
dengan pemiskinan global di malam hari. Ke ihwal penyortiran inilah fokus bahasan kita alihkan.

Fotosel, jika sendiri, hanya dapat memberi tahu seekor hewan tentang ada tidaknya cahaya. Hewan lantas dapat membedakan antara malam dan siang, serta bisa tahu ketika muncul bayang-bayang yang boleh jadi, misalnya, mengisyaratkan adanya pemangsa. Langkah peningkatan berikutnya mestilah pemerolehan sensitivitas kasar terhadap arah cahaya dan arah gerakan, misalnya, bayangan yang mengancam. Cara minimal untuk mencapai hal ini adalah dengan melatari fotosel dengan layar gelap pada satu sisinya saja. Sebuah fotosel transparan tanpa layar gelap akan menerima cahaya dari segala arah dan tak bisa membedakan arah datangnya cahaya. Hewan dengan satu saja fotosel di kepalanya bisa bergerak menuju, atau menjauh dari, cahaya – asalkan fotoselnya dilatari layar. Resep sederhana untuk melakukan ini adalah dengan mengayun-ayunkan kepala, seperti bandul; jika intensitas cahaya pada kedua sisi itu tidak seimbang, ubah arahnya hingga seimbang. Ada beberapa jenis belatung yang menggunakan resep ini untuk bergerak langsung menjauh dari cahaya.

Tetapi mengayun-ayunkan kepala adalah cara kasar mendeteksi arah cahaya, cocok untuk diletakkan di lereng terendah Gunung Kemuskilan. Cara yang lebih baik adalah dengan menuju lebih dari satu fotosel ke berbagai arah, dan tiap fotosel ini dilatari layar gelap. Lalu, dengan membandingkan tingkat-tingkat kecepatan derai foton pada kedua sel, arah cahaya dapat disimpulkan. Kalau punya selembar penuh fotosel, cara yang lagi baik adalah dengan menekuk lembaran, beserta layar latarnya, ke bentuk kurva,

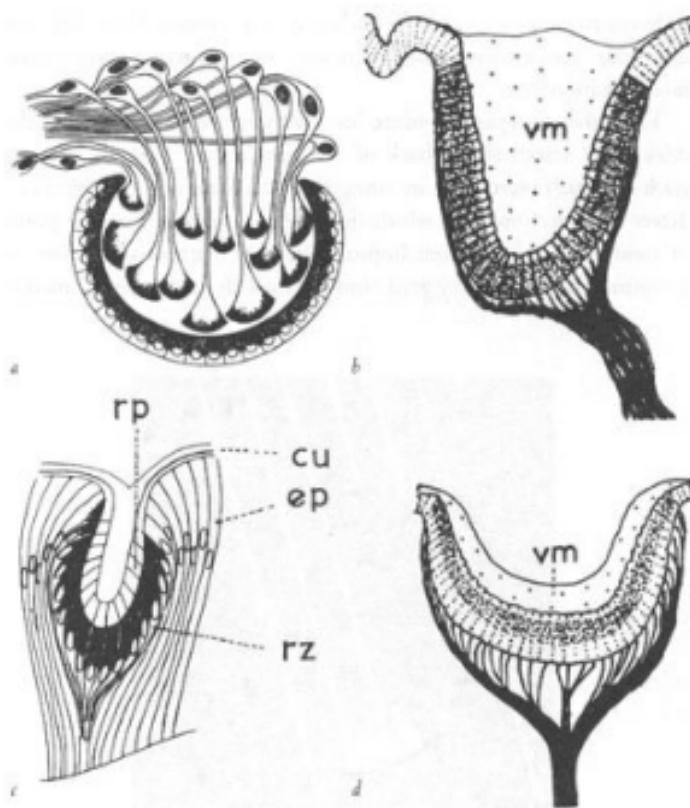
sehingga fotosel-fotosel pada berbagai bagian kurva tersebut menunjuk secara sistematis ke berbagai arah. Kurva cembung, lambat laun, dapat memunculkan semacam ‘mata majemuk’ yang dimiliki serangga, dan saya akan kembali ke pokok ini nanti. Kurva cekung membentuk mangkuk dan dapat memunculkan jenis utama mata yang lain, mata kamera seperti mata kita sendiri. Fotosel di berbagai bagian mangkuk akan menyala bila cahaya datang dari berbagai arah, dan makin banyak selnya makin halus pula pencermatannya.

Sinar-sinar cahaya (garis-garis panah putih yang tersusun sejajar) terhalang layar hitam tebal pada bagian latar mangkuknya (Gambar 5.3). Dengan melacak fotosel mana saja yang menyala dan mana saja yang tidak, otak dapat mendeteksi arah datangnya cahaya. Dari sudut pandang Gunung Kemusikilan, yang penting adalah adanya gradasi evo-

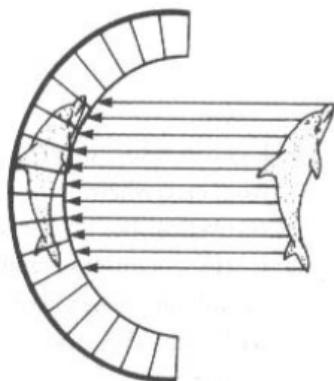


Gambar 5.3 Mata mangkuk sederhana dapat mendeteksi arah cahaya.

lusi yang berkelanjutan – tanjakan mulus menaiki gunung – yang menghubungkan hewan-hewan dengan lembaran fotosel datar ke hewan-hewan dengan mangkuk. Mangkuk dapat perlahan-lahan makin dalam atau perlahan-lahan makin dangkal, dengan pergeseran derajat yang langsam dan sinambung. Makin dalam mangkuknya, makin besar kemam-



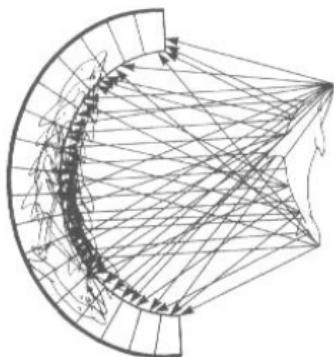
Gambar 5.4 Mata mangkuk dari sekitaran kingdom animalia: (a) cacing pipih; (b) kerang-kerangan; (c) cacing polychaeta; (d) limpet.



Gambar 5.5 Bukan cara  
kerja mata – sungguh sinar  
cahaya yang baik budi!

puan mata untuk mencermati cahaya yang datang dari berbagai arah. Di Gunung Kemuskilan, tidak ada tebing terjal yang harus dilompati. Mata mangkuk seperti ini lazim di kingdom animalia. Gambar 5.4 menunjukkan mata seekor limpet, seekor cacing bulu, seekor kerang, dan seekor cacing pipih. Bentuk mangkuk dari semua mata ini kemungkinan besar berevolusi secara terpisah. Hal ini tampak jelas, khususnya, pada mata cacing pipih, yang menyingkap asal mula independennya dengan menyimpan fotosel-fotoselnya *di dalam* mangkuk. Sekilas, susunannya tampak ganjil – sinar cahaya harus menembus belukar saraf penghubung sebelum menumbuk fotosel, tapi tak perlu ceriwis soal ini karena desain yang ternyata sama buruknya juga menodai mata kita yang jauh lebih canggih ini. Saya akan membahasnya lebih lanjut nanti untuk menunjukkan bahwa desain tersebut tidak seburuk kelihatannya.

Bagaimanapun, mata mangkuk, bila sendiri, jauh dari kata mampu membentuk hal yang kita kenali, dengan mata unggulan kita ini, sebagai citra yang layak. Pembentukan citra

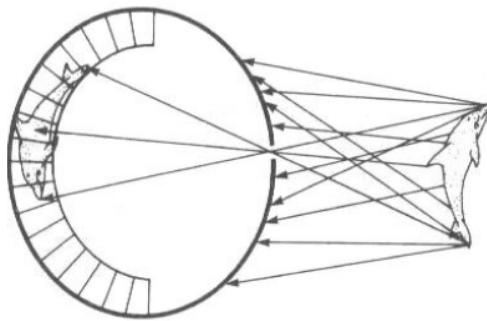


Gambar 5.6 Sinar-sinar cahaya dari mana pun ke mana pun. Alhasil, citra tidak terlihat. Citra-citra lumba-lumba yang tak terkira jumlahnya saling berbentrokan, dan semuanya kabur.

versi kita, yang bergantung pada prinsip lensa, perlu sedikit dijelaskan. Kita dekati masalahnya dengan mengajukan sebuah tanya: Mengapa lembar fotosel yang tidak dilatari layar gelap, atau mangkuk yang cetek, tidak akan melihat citra, misalnya, seekor lumba-lumba, sekalipun bila lumba-lumba itu terpampang jelas di depannya?

Jika sinar cahaya berperilaku seperti pada Gambar 5.5, segalanya jadi mudah dan citra lumba-lumba itu, dalam posisi yang benar, akan muncul di retina. Sayangnya, cahaya tidak begitu. Lebih tepatnya lagi, ada sinar cahaya yang memang berperilaku persis seperti yang saya buat di gambar itu. Masalahnya, pada saat bersamaan, sinar-sinar ini dikeroyok oleh sekian banyak sinar yang bergerak dari semua arah lainnya. Setiap titik pada lumba-lumba mengirim segaris sinar ke setiap titik pada retina. Dan bukan cuma setiap titik pada lumba-lumba, melainkan setiap titik pada latar belakang dan segala hal lain yang ada di tayangan itu. Kita dapat membayangkan hasilnya sebagai citra lumba-lumba yang tak terkira banyaknya, di setiap titik pada permukaan mangkuk-

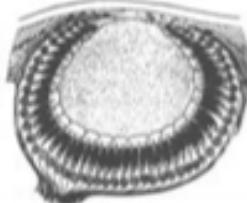
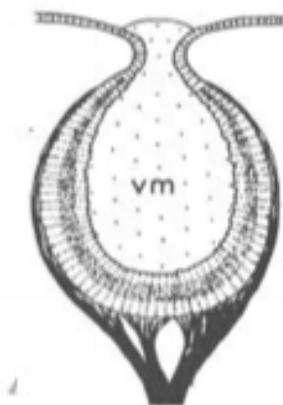
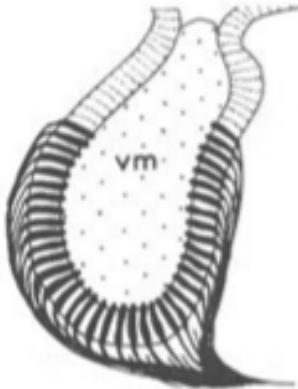
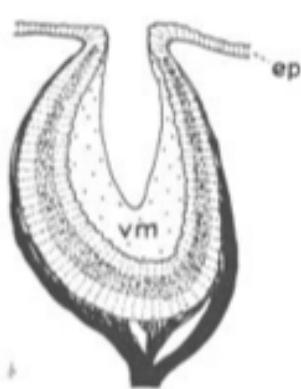
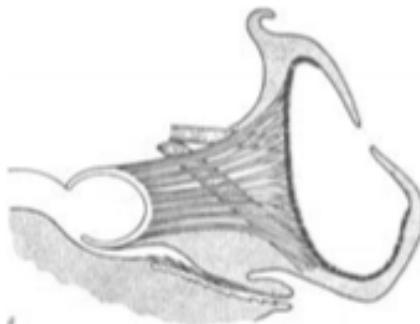
Gambar 5.7 Prinsip mata lubang jarum. Sebagian besar dari citra lumba-lumba yang berlomba-lomba itu dicegat. Idealnya, hanya satu (dengan posisi terbalik) yang masuk melalui lubang jarumnya.



nya, dan dalam posisi yang karut-marut. Tapi tentu, itu sama saja dengan tanpa citra sama sekali, sekadar penebaran merata cahaya ke seluruh permukaannya (Gambar 5.6).

Kita telah mendiagnosis masalahnya. Mata melihat terlalu banyak citra: Lumba-lumba dalam jumlah tak terhingga, bukan satu saja. Solusi yang jelas ada adalah menguranginya: Singkirkan, hingga tersisa satu saja citra lumba-lumba. Tak usah dulu menyoal yang mana, tapi bagaimana menyisihkan sisanya itu? Salah satu caranya adalah dengan menyeret langkah menaiki Gunung Kemuskilan melalui lereng yang juga memberi kita mangkuk itu: Terus perdalam dan pagari keliling si mangkuk hingga bukaannya menyempit sesempit lubang jarum. Sekarang, mayoritas besar sinar cahaya tidak bisa memasuki mangkuk. Segelintir yang lolos hanyalah sinar-sinar yang membentuk sejumlah kecil citra serupa – dan terbalik – dari lumba-lumbanya (Gambar 5.7). Jika lubang jarumnya menjadi amat sangat kecil, kekaburannya menghilang dan tersisalah satu gambar tajam lumba-lumba (sebenarnya, lubang-lubang jarum yang teramat kecil menghadirkan jenis

Gambar 5.8 Ragam mata invertebrata yang mengilustrasikan pendekatan ke pembentukan citra yang kasar tetapi efektif: (a) mata lubang jarum *Nautilus*; (b) siput laut; (c) kerang-kerangan; (d) abalone; (e) cacing perca (*ragworm*).



kekaburam baru, tapi kita lupakan dahulu sejenak soal itu). Lubang jarum dapat dibayangkan sebagai saringan citra, yang menyisihkan semua kecuali satu dari hiruk-pikuk visual lumbar-lumba yang membingungkan.

Efek lubang jarum hanyalah versi ekstrem dari efek mangkuk yang telah kita bahas sebagai alat bantu untuk mendeteksi arah cahaya. Letaknya hanya sedikit lebih jauh di lereng Gunung Kemuskilan yang sama dan tidak ada tebing terjal di antara keduanya. Tak ada kesukaran dalam evolusi mata lubang jarum dari mata mangkuk, dan tak ada kesukaran dalam evolusi mata mangkuk dari selembar datar fotosel. Lereng dari lembaran datar ke lubang jarum adalah tanjakan yang gradual dan mudah ditapaki dari ujung ke ujung. Mendakinya berarti terus menyisihkan citra-citra yang bersalahan hingga, di puncaknya, hanya satu yang tersisa.

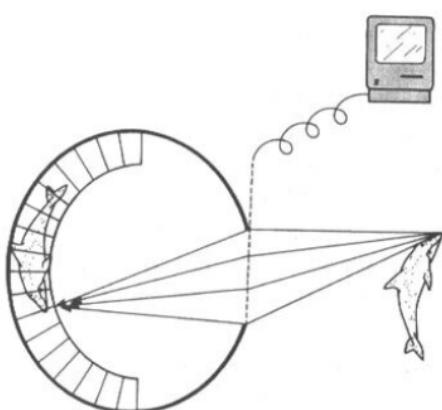
Mata lubang jarum, dengan jarak bukaan yang beragam, nyatanya berserakan di wilayah kingdom animalia. Mata lubang jarum yang paling saksama adalah mata hewan moluska yang penuh teka-teki, *Nautilus* (Gambar 5.8a), yang berkerabat dengan ammonit (dan berkerabat lebih jauh dengan seekor gurita, tetapi dengan cangkang yang mengumpar). Yang lain, seperti mata seekor siput laut pada Gambar 5.8b, barangkali lebih baik digambarkan sebagai mangkuk-mangkuk yang dalam daripada lubang jarum. Mereka semua mengilustrasikan mulusnya tanjakan ini di atas Gunung Kemuskilan.

Sekilas, mata lubang jarum mestinya berfungsi lumayan baik, asalkan lubang jarumnya cukup kecil. Kalau lubang jarumnya dibuat hampir tak terhingga kecilnya, kita mungkin mengira,

dengan memangkas sejumlah sangat besar citra yang bercampur aduk tidak karuan, citra yang didapat hampir tak terhingga sempurnanya. Tapi kini timbul dua perkara. Yang pertama, difraksi, soal yang kita lupakan sejenak tadi. Difraksi adalah masalah pengaburan yang timbul dari fakta bahwa cahaya berperilaku layaknya gelombang, yang dapat saling membelit. Pengaburan ini kian parah bila lubang jarumnya sangat kecil. Perkara kedua terkait lubang jarum kecil ini mengingatkan kita pada ihwal kompromi dalam 'ekonomi foton'. Bila lubang jarumnya cukup kecil untuk menghasilkan citra yang tajam, logikanya: cahaya yang masuk melalui lubang itu begitu sedikit sehingga kita dapat melihat benda tersebut dengan baik hanya jika diterangi cahaya yang benderangnya hampir mustahil. Pada tingkat pencahayaan normal, foton yang masuk melalui lubang jarum itu tidak cukup sehingga mata tidak dapat memastikan objek yang sedang dilihatnya. Dengan lubang jarum yang kerdil, kita dihadapkan pada versi lain dari masalah Komet Halley. Masalah ini bisa diberantas dengan membuka lubang jarumnya lagi. Tapi kini kita kembali terjerat keruwetan 'lumba-lumba' yang berlomba-lomba. Ekonomi foton telah menggiring kita ke jalan buntu pada bukit di kaki Gunung Kemuskilan ini. Dengan desain lubang jarum, kita bisa melihat citra yang lumayan tajam tetapi gelap, atau lumayan terang tetapi kabur. Harus pilih salah satu, tidak bisa dua-duanya. Kompromi semacam ini adalah makanan sehari-hari ahli ekonomi, dan itulah alasan saya merekayasa istilah ekonomi foton. Begitu pun, tak adakah cara untuk mencapai citra yang terang sekaligus tajam? Untungnya, ada.

Pertama, tilik masalah ini dari perspektif komputasi. Bayangkan kita memperlebar lubang jarumnya hingga bisa

disusupi lumayan banyak cahaya. Namun, alih-alih lubangnya dibiarkan menganga, kita sisipkan ‘jendela ajaib’, sebuah mahakarya sihir elektronik yang diembuskan ke bahan kaca dan dihubungkan ke sebuah komputer (Gambar 5.9). Kelakuan dari jendela yang dikendalikan komputer ini sebagai berikut. Sinar-sinar cahaya, alih-alih lolos langsung melalui kaca itu, dibengkokkan melalui sebuah sudut cerdik. Sudut ini dihitung teliti oleh komputer sehingga semua sinar yang bertolak dari satu titik (misalnya, hidung lumba-lumba) dibengkokkan supaya menyatu ke titik yang sama pada retina. Yang saya gambar hanya garis-garis sinar dari hidung lumba-lumba, tetapi layar ajaibnya tentu tidak menganakemaskan titik mana pun dan melakukan kalkulasi sepadan untuk tiap titik lainnya juga. Semua sinar yang berasal dari ekor lumba-lumba dibengkokkan sedemikian rupa sehingga menyatu ke titik ekor yang sama pada retina, dan seterusnya. Hasil dari jendela ajaib ini adalah munculnya citra sempurna lumba-lumba pada retina. Tetapi citra tersebut bukan citra gelap dari lubang jarum kecil, karena banyak sinar (yang berarti semburan fo-

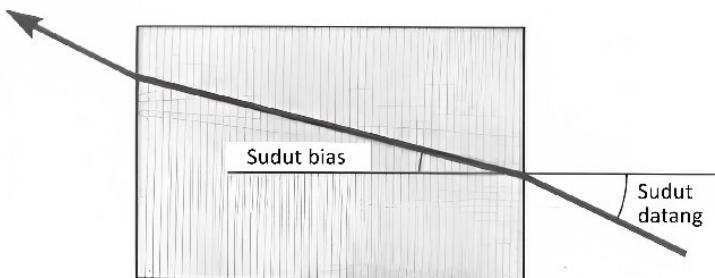


Gambar 5.9  
Pendekatan hipotetis yang rumit dan bukan main mahalnya untuk masalah pembentukan citra tajam sekaligus terang: ‘lensa terkomputasi’.

ton) menyatu dari hidung lumba-lumba itu, banyak sinar menyatu dari ekor lumba-lumba itu, banyak sinar menyatu dari tiap titik pada lumba-lumba itu ke titik khususnya sendiri-sendiri pada retina. Jendela ajaib ini menghasilkan manfaat yang sama dengan lubang jarum dan menyingkirkan mudaratnya.

Boleh-boleh saja menyulap ‘jendela ajaib’ yang muncul entah dari mana. Tapi tidakkah ini lebih mudah untuk dikatakan ketimbang dilakukan? Bayangkan kerja kalkulasi rumit yang dijalankan komputer yang terhubung ke jendela ajaib itu. Perangkat itu menerima jutaan sinar cahaya, yang berasal dari jutaan titik di luar sana. Tiap titik pada lumba-lumba mengirimkan jutaan sinar dengan jutaan sudut ke berbagai titik pada permukaan jendela ajaib itu. Sinar-sinar itu saling berseling-silang, berseliweran membentuk garis-garis lurus yang simpang siur. Jendela ajaib dan komputer tersebut harus mengurus jutaan sinar ini satu per satu dan menghitung sudut tertentunya masing-masing, untuk dibelokkan sedemikian persisnya. Dari mana datangnya komputer menakjubkan ini, kalau bukan dari keajaiban yang luar biasa pelik? Di titik inikah langkah kita membentur dinding tebing terjal dalam pendakian Gunung Kemuskilan?

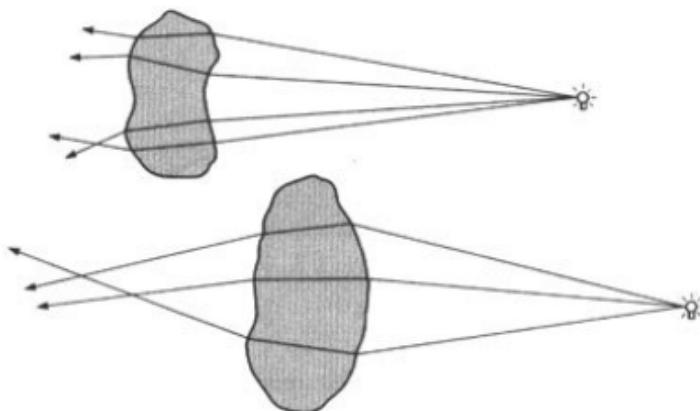
Sungguh, jawabannya tidak. Komputer pada diagram itu hanyalah ciptaan khayali guna menekankan betapa rumitnya tugas ini jika ditinjau dari satu sisi. Namun, jika masalah ini kita dekati dari sisi yang lain, solusinya ternyata amat mudah, sampai-sampai membuat gelisah. Ada peranti yang bukan main sederhananya, yang kebetulan sekarakter dengan jendela ajaib kita, tetapi tanpa komputer, tanpa sihir elektronik, tanpa keruwetan sama sekali. Peranti itu adalah lensa. Tak perlu



Gambar 5.10 Pembengkokan arah rambat cahaya. Prinsip refraksi pada balok kaca.

komputer karena kalkulasinya memang tak perlu dieksplisitkan. Kerumitan semu kalkulasi jutaan sudut sinar diurus tuntas, secara otomatis dan tanpa repot, oleh segumpal benda transparan yang melengkung. Saya akan jelaskan sebentar cara kerja lensa, sebagai pengantar untuk menunjukkan bahwa evolusinya mestilah tidak sulit-sulit amat.

Adalah fakta fisika bahwa sinar-sinar cahaya dibengkokkan ketika lewat dari satu benda transparan ke benda transparan yang lain (Gambar 5.10). Sudut pembelokan bergantung pada perbedaan sifat pada kedua benda transparan tersebut, karena sebagian zat memiliki indeks refraktif – ukuran kapasitas untuk membengkokkan cahaya – lebih besar dari yang lain. Jika bendanya adalah kaca dan air, sudut pembengkokannya kecil karena indeks refraktif air hampir sama dengan indeks refraktif kaca. Jika bidang batasnya terletak di antara kaca dan udara, cahaya dibengkokkan lewat sudut yang lebih besar karena udara memiliki indeks refraktif yang relatif rendah. Pada bidang batas di antara air dan udara,



Gambar 5.11 Bongkahan acak membiaskan sinar ke sembarang arah.

sudut pembengkokannya cukup besar untuk membuat dayung sampan terlihat bengkok.

Gambar 5.10 mengilustrasikan sebuah balok kaca di udara. Garis tebal itu sinar cahaya yang masuk ke balok kaca, dibengkokkan di dalam medium itu, lalu membengkok kembali ke sudut aslinya saat menembus sisi yang lain. Namun, tentu saja gumpalan benda transparannya tidak harus membentuk sisi-sisi yang sejajar rapi. Tergantung sudut permukaan gumpalan itu, sinar dapat merambat ke arah mana pun yang dipilih. Dan jika gumpalan itu diliputi segi-segi dengan berbagai sudut, sekelompok sinar bisa diluncurkan ke berbagai arah (Gambar 5.11). Jika dicembungkan pada satu atau kedua sisinya, gumpalan itu akan menjadi lensa, peranti yang sama ampuhnya dengan jendela ajaib kita. Benda-benda transparan tidak langka di alam liar. Udara dan air, dua dari zat-zat paling umum di planet kita, sama-sama transparan. Demikian pula banyak benda cair lainnya. Demikian pula beberapa jenis kristal jika permukaannya dipoles, misalnya



oleh ombak di laut, untuk menghilangkan kekasarannya. Bayangkan sebongkah kecil benda kristal, yang melapuk ke sebuah bentuk acak gara-gara ombak. Sinar-sinar cahaya dari satu sumber dibengkokkan ke segala arah oleh bongkahan itu, tergantung sudut-sudut permukaannya. Bongkahan macam-macam bentuknya. Cukup lazim pula bila kedua sisinya cembung. Apa efeknya terhadap sinar-sinar cahaya dari sumber tertentu seperti bola lampu?

Ketika muncul dari bongkahan yang sisi-sisinya agak-agak cembung, sinar-sinar itu akan cenderung menyatu. Bukan menyatu dengan rapi ke satu titik seperti mekanisme yang akan merekonstruksi sebuah citra sempurna dari sumber cahaya itu layaknya ‘jendela ajaib’ khayali kita. Tidak sampai seperti itu. Tapi ada kecenderungan pasti ke arah yang benar. Kerikil kuarsa yang kebetulan melapuk ke bentuk lengkung mulus di kedua sisinya bisa menjadi ‘jendela ajaib’ yang bagus, lensa sejati yang mampu membentuk citra-citra yang, meski jauh dari kata tajam, tetap jauh lebih terang dari yang bisa dihasilkan lubang jarum. Kerikil-kerikil yang dilapukkan oleh air biasanya memang cembung di kedua sisinya. Kalau kerikil-kerikil itu terbuat dari benda transparan, banyak di antaranya bisa menjadi lensa yang lumayan berfungsi, meskipun mentah.

Kerikil hanyalah satu contoh benda taksengaja dan takdirancang, yang kebetulan dapat berfungsi sebagai lensa mentah. Ada benda-benda lainnya. Setetes air yang menggantung di pucuk daun punya tepi melengkung. Memang begitu adanya. Otomatis, tanpa desain lanjutan dari kita, tetes air akan berfungsi sebagai lensa kasar. Cairan dan gel dengan sendirinya membentuk lengkungan kecuali ada semacam

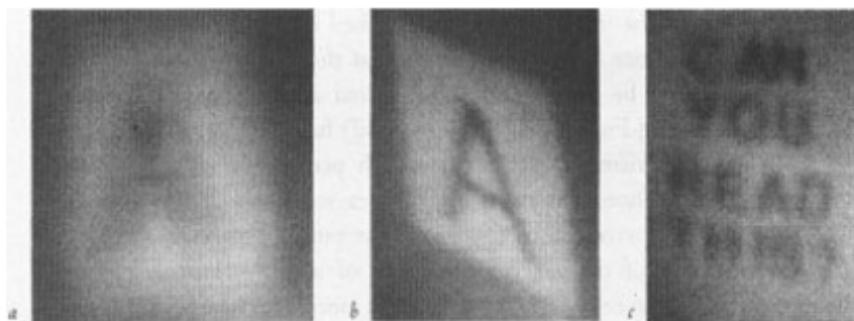
gaya, seperti gravitasi, yang melawannya. Sering kali, ini berarti bahwa benda-benda itu mau tak mau akan berfungsi sebagai lensa. Demikian pula halnya dengan benda-benda hidup. Ubur-ubur anakan berbentuk lensa dan transparan dengan indahnya. Hewan ini bisa berfungsi sebagai lensa yang lumayan baik, sekalipun fungsi-fungsi lensanya tak pernah benar-benar digunakan dan tak ada saran bahwa seleksi alam telah memilih fungsi-fungsi bak-lensa tersebut. Transparansinya mungkin menguntungkan karena menyulitkan musuh untuk melihatnya, dan bentuk melengkungnya menguntungkan karena alasan struktural yang tidak berkaitan dengan lensa.

Berikut ini beberapa gambar yang saya proyeksikan ke sebuah layar menggunakan berbagai peranti pembentuk citra kasar dan takdirancang. Gambar 5.12a menunjukkan huruf A besar, sebagaimana diproyeksikan ke selembar kertas di belakang sebuah kamera lubang jarum (kotak kardus tertutup dengan lubang di satu sisinya). Anda mungkin hampir tidak bisa membacanya kalau tidak diberi arahan terlebih dahulu, sekalipun saya menggunakan cahaya yang amat terang untuk membuat citra ini. Agar cahaya yang didapat cukup banyak sehingga bentuk itu bisa dibaca, saya harus membuat lubang ‘jarum’ yang agak besar, dengan diameter sekitar satu sentimeter. Saya barangkali bisa menajamkan citranya dengan mempersempit lubang jarumnya, tetapi film tidak akan merekamnya – isu kompromi yang kita bahas tadi.

Sekarang, lihat beda yang bisa dihasilkan ‘lensa’ kasar dan darurat sekalipun. Untuk Gambar 5.12b, huruf A yang sama kembali diproyeksikan melalui lubang yang sama ke dinding latar kotak kardus yang sama. Tapi kali ini, saya menggantung

kantong polietilena berisi air di depan lubangnya. Kantong tersebut tidak dirancang supaya berbentuk lensa. Dia hanya menggantung montok alami bila diisi dengan air. Dugaan saya, seekor ubur-ubur, yang melengkung mulus alih-alih berkerut kisut, mestilah bisa menghasilkan citra yang lebih baik lagi. Gambar 5.12c ('CAN YOU READ THIS' atau 'BISA BACA KATA INI?') dibuat dengan kotak kardus dan lubang yang sama, tetapi kali ini – alih-alih kantong plastik – sebuah gelas *wine* bundar berisi air ditaruh di depan lubangnya. Memang gelas *wine* benda buatan manusia, tetapi perancangnya tidak pernah meniatkan benda ini untuk menjadi lensa dan bentuk bulatnya pun dibuat untuk tujuan berbeda. Sekali lagi, meski tidak dirancang untuk tujuan itu, ternyata sebuah benda mampu menjadi lensa yang memadai.

Tentu saja kantong polietilena dan gelas *wine* tidak ada di masa hewan-hewan leluhur purba. Saya tidak bermaksud mengatakan bahwa evolusi mata telah melalui tahap kantong polietilena, pun tahap kotak kardus. Maksud inti saya tentang



Gambar 5.12 Citra-citra yang dilihat melalui aneka lubang dan lensa kasar: (a) lubang jarum biasa; (b) kantong polietilena kendur berisi air; (c) gelas *wine* bulat berisi air.

kantong polietilena itu adalah bahwa, seperti tetes air hujan atau ubur-ubur atau kristal kuarsa bundar, benda ini tidak dirancang untuk menjadi lensa. Bentuknya serupa lensa karena alasan lain yang kebetulan berpengaruh di alam.

Maka, tidak sulit bagi benda-benda mentah mirip lensa untuk mengada dengan serta merta. Segumpal jeli agak transparan hanya perlu melengkung saja (dan ada banyak penyebabnya). Bila sudah begitu, ia akan langsung meningkatkan sedikit kualitas mangkuk sederhana atau lubang jarum. Hanya butuh peningkatan kecil untuk meniti langkah naik di lereng-lereng rendah Gunung Kemuskilan. Seperti apa kiranya perawakan para perantaranya? Lihat lagi Gambar 5.8 dan, sekali lagi, harus saya tekankan hewan-hewan ini hewan-hewan modern dan jangan dibayangkan sebagai rangkaian keleluhuran yang sebenarnya. Perhatikan bahwa mangkuk di Gambar 5.8b (siput laut) memiliki lapisan jeli transparan, 'massa vitreus' ('*vitreous mass*') yang mungkin berfungsi melindungi fotosel-fotosel sensitif dari air laut yang mengalir bebas melalui bukaan ke dalam cawannya. Massa vitreus yang murni untuk tujuan protektif ini memiliki salah satu dari sifat-sifat penting lensa – transparansi – tetapi kelengkungannya kurang tepat sehingga perlu ditebalkan. Sekarang lihat Gambar 5.8c, d, dan e, mata dari kerang bivalvia, abalone, dan cacing perca. Selain menambah khazanah contoh mangkuk dan perantara dari mangkuk ke lubang jarum, semua mata ini menunjukkan massa vitreus yang ditebalkan dengan hebatnya. Massa vitreus, dengan berbagai taraf ketunabentukan, ada di mana-mana di kingdom animalia. Sebagai lensa, tak satu pun dari jeli tak beraturan bentuk ini akan dilirik oleh Tuan Zeiss atau Tuan Nikon. Biarpun begitu, gumpalan jeli yang sedikit

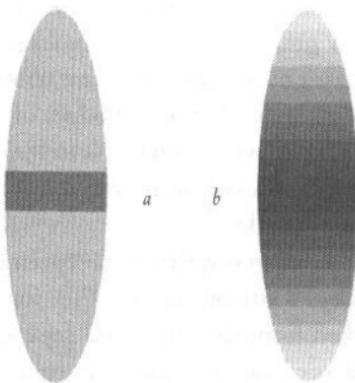
mencembung ini merupakan peningkatan berarti dari lubang jarum yang terbuka.

Perbedaan terbesar antara lensa yang baik dan hal seperti massa vitreus abalone adalah sebagai berikut: Untuk hasil terbaik, lensa mestilah terpisah dari retina dan terpisah sejauh jarak tertentu. Celahnya tidak harus kosong. Bisa diisi dengan massa vitreus juga. Yang penting, lensanya mesti memiliki indeks refraktif yang lebih tinggi dari zat yang memisahkannya dari retina. Ada beragam cara untuk mewujudkan hal ini dan tak satu pun di antaranya sulit. Saya akan bahas satu saja: Lensanya dikondensasi dari satu area lokal di bagian depan massa vitreus, seperti pada Gambar 5.8e.

Pertama-tama, ingat bahwa setiap zat transparan memiliki indeks refraktif, ukuran untuk kapasitasnya dalam membelokkan arah rambat cahaya. Manusia membuat lensa biasanya menganggap indeks refraktif segumpal kaca itu seragam di seluruh badan kaca tersebut. Begitu segeris sinar cahaya memasuki lensa kaca tertentu dan berubah arah rambat, sinar tersebut tetap merambat lurus hingga membentur bidang batas di sisi lain lensanya. Seni membuat lensa terletak pada kepiawaian pembuatnya dalam mengasah dan memoles permukaan kaca ke bentuk-bentuk presisi, dan dalam menggabungkan berbagai lensa membentuk tumpukan majemuk.

Berbagai jenis kaca dapat direkatkan dengan aneka cara rumit untuk membuat lensa majemuk dengan beragam indeks refraktif di berbagai bagiannya. Lensa pada Gambar 5.13a, misalnya, memiliki inti sentral yang terbuat dari berbagai jenis kaca dengan indeks refraktif yang lebih tinggi. Tapi tetap ter-

Gambar 5.13 Dua jenis lensa kompleks.



dapat perubahan-perubahan khas dari satu indeks refraktif ke indeks lainnya. Biarpun demikian, pada prinsipnya, lensa tetap dapat memiliki indeks refraktif yang bervariasi secara sinambung di sepanjang bagian dalamnya. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 5.13b. ‘Lensa indeks bertingkat’ sulit dicapai para pembuat lensa dan ini ada kaitannya dengan cara yang harus ditempuh saat membuat lensa dari kaca.\* Namun, lensa-lensa hayati mudah dibangun seperti ini karena tidak dibuat langsung jadi, tetapi berkembang dari awalan-awalan kecil saat hewan anakan tumbuh besar. Dan, kenyataannya, lensa-lensa dengan indeks refraktif bervariasi ditemukan pada ikan, gurita, dan banyak hewan lainnya. Jika diamati dengan cermat pada Gambar 5.8e, akan tampak semacam area indeks refraktif bervariasi pada zona di belakang bukaan matanya.

Kembali ke cerita saya tadi, tentang cara lensa kiranya berevolusi dari massa vitreus yang mengisi seluruh mata. Prinsip dari proses kejadiannya, dan kecepatan untuk mencapainya, telah dengan elok didemonstrasikan dalam

sebuah model komputer oleh sepasang ahli biologi dari Swedia, Dan Nilsson dan Susanne Pelger. Saya akan masuk ke penjelasan tentang model komputer mereka yang elegan lewat jalan memutar. Alih-alih langsung ke hal-hal yang sebenarnya mereka lakukan, saya kembali dahulu ke perkembangan dari model komputer Biomorf ke NetSpinner dan membahas cara ideal membuat model komputer serupa untuk evolusi sebuah mata. Lalu, saya akan menjelaskan bahwa hal ini pada hakikatnya sepadan dengan yang dilakukan Nilsson dan Pelger, kendati mereka tidak mengerjakannya dengan cara yang sama.

Ingat lagi bahwa biomorf berevolusi melalui seleksi buatan: Pelaku seleksinya adalah selera manusia. Kita tidak dapat menemukan cara realistik untuk menyertakan seleksi alam ke dalam model tersebut dan, jadinya, kita beralih ke jaring laba-laba model. Keuntungan menggunakan jaring laba-laba adalah bahwa, karena dibangun di mandala dua dimensi, efisiensinya dalam menangkap lalat dapat dikalkulasi dengan komputer secara otomatis. Demikian pula biaya sutranya dan, karenanya, jaring model dapat secara otomatis 'dipilih' oleh komputer melalui semacam seleksi alam. Kita sepakat ciri-ciri tersebut membuat jaring laba-laba sesuai untuk tujuan ini: Sulit berharap bisa melakukan hal yang sama untuk tulang belakang seekor citah yang sedang berburu atau liuk-liuk paus yang sedang berenang karena detail-detail fisik yang harus disertakan dalam menilai efisiensi organ tiga dimensi itu terlalu rumit. Tetapi mata, dalam hal ini, seperti jaring laba-laba. Efisiensi sebuah mata model yang digambarkan dalam dua dimensi dapat ditakar secara otomatis oleh komputer. Saya tidak bermaksud menyiratkan bahwa mata adalah

struktur dua dimensi, karena memang bukan. Hanya saja, jika diasumsikan mata itu sirkular saat dilihat dari depan, efisiensinya di medan tiga dimensi dapat dinilai dari gambar komputer dari sebuah irisan vertikal melalui titik tengahnya. Komputer dapat melakukan analisis pelacakan sinar sederhana dan menaksir ketajaman citra yang mampu dibentuk oleh mata itu. Penskoran kualitas ini sepadan dengan kalkulasi NetSpinner untuk efisiensi jaring laba-laba komputer dalam menangkap lalat-lalat komputer.

Seperti jaring NetSpinner yang membiakkan jaring-jaring anakan mutan, mata model juga bisa kita biarkan untuk menghasilkan mata anakan mutan. Tiap mata anakan pada dasarnya akan memiliki bentuk yang sama dengan induknya, tetapi dengan perubahan acak dan kecil pada segi minor dari bentuk tersebut. Tentu saja, beberapa dari ‘mata-mata’ komputer ini akan begitu tidak miripnya dengan mata sungguhan sampai-sampai tidak pantas disebut mata – tapi tak apa. Tetap bisa dibiakkan, dan kualitas optiknya tetap bisa diberi skor numerik – yang kemungkinan akan rendah sekali. Oleh karena itu, kita bisa, dengan cara yang sama seperti NetSpinner, mengevolusikan mata yang lebih baik melalui seleksi alam di komputer. Bisa dimulai dengan mata yang lumayan baik, untuk dievolusikan menjadi mata yang sangat baik. Atau bisa dimulai dengan mata yang sangat buruk atau bahkan tanpa mata sama sekali.

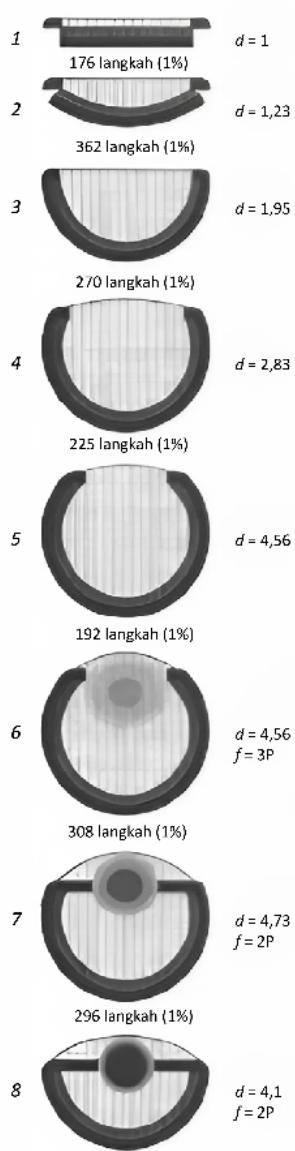
Banyak pelajaran yang bisa kita petik bila menjalankan program seperti NetSpinner sebagai sebuah simulasi evolusi yang sebenarnya, melepasnya dari titik awal yang elementer dan menanti untuk melihat di mana titik ujungnya. Titik kulminasi pada garis evolusi yang satu pun bahkan bisa

berbeda dari yang lain karena, boleh jadi, memang ada puncak alternatif yang bisa didaki di Gunung Kemuskilan. Model mata ini juga bisa kita jalankan dalam mode evolusi, yang akan menjadi peragaan yang jelas sekali. Namun, sebenarnya, hal yang bisa kita pelajari dengan membiarkan model tersebut berevolusi tidak jauh lebih banyak dibanding dengan menjelajahi, secara lebih sistematis, titik ujung jalur(-jalur) pendakian Gunung Kemuskilan. Dari satu titik awal mana pun, jalur yang terus naik, tanpa pernah turun, adalah jalur yang akan diikuti seleksi alam. Jika modelnya dijalankan dalam mode evolusi, seleksi alam akan mengikuti jalur tersebut. Jadi, akan hemat waktu komputer jika kita mencari secara sistematis jalur-jalur naiknya dan puncak-puncak yang bisa digapai dari titik-titik tolak yang dikemukakan. Hal pentingnya adalah bahwa aturan mainnya tidak mengizinkan langkah turun di sepanjang jalannya. Pencarian jalur-jalur pendakian secara lebih sistematis inilah yang dilakukan oleh Nilsson dan Pelger, tapi sekarang Anda bisa melihat alasan saya memilih untuk mengetengahkan karya mereka seolah kita, bersama mereka berdua, sedang merencanakan penyelenggaraan evolusi ala NetSpinner.

Mode apa pun yang kita pilih untuk menjalankan modelnya, entah ‘mode seleksi alam’ atau ‘mode eksplorasi gunung sistematis’, kita harus memutuskan kaidah-kaidah embriologinya: yakni, kaidah-kaidah yang mengatur cara gen mengendalikan perkembangan tubuh. Apa saja aspek bentuk yang dipengaruhi oleh mutasinya? Dan sebesar, atau sekecil, apa mutasinya itu sendiri? Pada contoh NetSpinner, mutasi memengaruhi aspek-aspek yang diketahui dari perilaku laba-laba. Pada contoh biomorf, mutasi memengaruhi panjang dan

sudut cabang pada pohon yang sedang tumbuh. Pada contoh mata, Nilsson dan Pelger mengawalinya dengan mengetahui bahwa ada tiga tipe jaringan utama pada tipikal mata ‘kamera’. Ada bungkus luar kameranya, yang biasanya buram terhadap cahaya. Ada lapisan berisi ‘fotosel’ yang peka cahaya. Dan ada semacam benda transparan, yang dapat berfungsi sebagai jendela pelindung atau yang dapat mengisi rongga di dalam mangkuk – kalau memang ada mangkuk, karena di simulasi kita ini tak satu pun hal kita anggap pasti ada. Titik tolak Nilsson dan Pelger – kaki gunungnya – adalah lapisan datar fotosel (abu-abu pada Gambar 5.14), yang bertumpu pada layar latar datar (hitam) dan dipuncaki layar datar jaringan transparan (putih keabu-abuan). Mereka mengasumsikan bahwa mutasi terjadi dengan timbulnya perubahan dalam persentase kecil pada ukuran sesuatu, contohnya, penurunan dalam persentase kecil pada ketebalan lapisan transparan, atau peningkatan dalam persentase kecil pada indeks refraktif sebuah area lokal di lapisan transparan tersebut. Pertanyaan besarnya adalah bisa sampai di titik mana kita nanti di atas gunung kalau terus mendaki dari satu *base camp* tertentu. Mendaki berarti bermutasi, selangkah kecil demi selangkah kecil, dan hanya menerima mutasi yang meningkatkan kinerja optik.

Jadi, sampai di mana kita? Dengan riang hati, melalui jalur pendakian yang mulus, mulai dari tanpa mata sama sekali, kita sampai di sebiji mata ikan, lengkap dengan lensanya. Lensanya tidak seragam seperti lensa biasa buatan manusia, tetapi lensa indeks bertingkat seperti yang kita lihat pada Gambar 5.13b. Indeks refraktifnya yang bervariasi dengan sinambung direpresentasikan dalam diagram itu dengan berbagai bayang



Gambar 5.14 Rangkaian evolusi teoretis Nilsson dan Pelger yang berujung pada sebiji mata ‘ikan’. Jumlah langkah di antara tahap-tahapnya mengasumsikan, secara manasuka, bahwa tiap langkah mewakili perubahan 1 persen pada besar sesuatu. Lihat teks untuk terjemahan dari satuan-satuan manasuka ini ke dalam jumlah generasi evolusi.

warna abu-abu. Lensanya telah ‘terkondensasi’ dari massa vitreus melalui serangkaian perubahan pada indeks refraktif yang terjadi secara gradual, setitik demi setitik. Tak ada tipu muslihat di sini. Nilsson dan Pelger tidak terlebih dahulu memprogram massa vitreus simulasi mereka dengan sebuah lensa primordial yang siap melesat maju. Mereka hanya mengizinkan indeks refraktif dari tiap cuil benda transparan itu untuk bervariasi di bawah kendali genetik. Tiap cuil benda transparan itu bebas meragamkan indeks refraktifnya ke arah mana pun secara acak. Tak terhingga jumlah pola indeks refraktif bervariasi yang bisa saja muncul di dalam massa vitreus itu. Yang membuat lensanya jadi ‘berbentuk lensa’ adalah gerak naik berkelanjutan, yang sepadan dengan pembiakan secara selektif dari mata dengan penglihatan terbaik pada tiap generasi.

Tujuan Nilsson dan Pelger bukan hanya untuk menunjukkan bahwa ada lintasan mulus peningkatan dari lapisan datar berisi fotosel ke mata ikan yang baik. Kita juga dapat menggunakan model mereka untuk memperkirakan waktu yang berselang pada evolusi sebuah mata dari tanpa mata. Jumlah total langkah yang diambil model mereka adalah 1.829 jika tiap langkahnya mencapai perubahan 1 persen pada besarnya sesuatu. Tapi tak ada yang ajaib dengan angka 1 persen. Jumlah total perubahan yang sama akan membutuhkan 363.992 langkah pada laju perubahan 0,005 persen. Nilsson dan Pelger harus mengekspresikan kembali jumlah total perubahan dalam satuan-satuan realistik yang tidak manasuka – dan itu berarti satuan-satuan perubahan genetik. Untuk melakukan ini, perlu dibuat asumsi. Contohnya, mereka harus membuat asumsi tentang intensitas



seleksinya. Mereka mengasumsikan bahwa untuk setiap 101 hewan dengan mata lebih baik yang bertahan hidup, 100 hewan tanpa peningkatan dapat bertahan hidup. Kalau dilihat dengan akal sehat, rasio ini tampak seperti intensitas seleksi yang rendah sekali; ada tidaknya peningkatan hampir tidak ada bedanya. Mereka sengaja memilih angka yang rendah, konservatif, atau ‘pesimistik’ karena mereka berusaha keras untuk memprasangkakan perkiraan laju evolusinya ke arah yang terlalu lambat. Mereka juga harus membuat dua asumsi lainnya: asumsi ‘heritabilitas’ dan asumsi ‘koefisien variasi’. Koefisien variasi adalah ukuran besar variasi yang terdapat di dalam populasinya. Seleksi alam membutuhkan variasi untuk digarap dan Nilsson dan Pelger, lagi-lagi, dengan sengaja memilih nilai yang rendah sekali. Heritabilitas adalah ukuran banyaknya variasi, dari yang tersedia pada populasinya, yang diwariskan. Jika heritabilitasnya rendah, itu berarti sebagian besar variasi di dalam populasinya disebabkan faktor-faktor lingkungan (bukan genetik), dan seleksi alam, walau dapat ‘memilih’ mana individu yang hidup atau mana yang mati, akan berdampak kecil pada evolusi. Jika heritabilitasnya tinggi, seleksi akan berdampak besar pada generasi-generasi berikutnya karena kesintasan individu benar-benar diterjemahkan ke dalam kesintasan gen. Heritabilitas ternyata seringnya lebih besar dari 50 persen; maka, keputusan Nilsson dan Pelger untuk menetapkan angka 50 persen adalah asumsi yang pesimistik. Terakhir, mereka membuat asumsi pesimistik bahwa beberapa bagian mata tidak dapat berubah secara bersamaan dalam satu generasi.

‘Pesimistik’ pada semua asumsi ini berarti bahwa estimasi yang akhirnya muncul untuk durasi evolusi mata kemungkinan

akan tergolong panjang. Berikut ini alasan kita menyebut estimasi berlebihan pesimistik, bukan optimistik. Orang yang skeptis terhadap kekuatan evolusi, seperti Emma Darwin, otomatis tergiring ke pandangan bahwa organ yang rumit bukan main dan jamak-bagian seperti mata, kalaupun bisa berevolusi, akan membutuhkan waktu yang luar biasa panjang untuk evolusinya. Estimasi Nilsson dan Pelger justru mengagetkan pendeknya. Pada akhir kalkulasinya, ternyata hanya butuh sekitar 364.000 generasi untuk berevolusi hingga menjadi mata ikan yang baik, lengkap dengan lensanya. Bakal lebih pendek lagi kalau saja mereka lebih optimistik (dan boleh jadi itu berarti lebih realistik) dalam asumsinya.

Berapa lama 364.000 generasi itu dalam satuan tahun? Tentu saja hal itu tergantung pada waktu generasinya. Hewan yang kita bahas di sini adalah hewan laut kecil seperti cacing, moluska, dan ikan kecil. Bagi hewan seperti ini, satu generasi biasanya memakan waktu satu tahun atau kurang. Jadi, Nilsson dan Pelger berkesimpulan evolusi mata berlensa dapat dicapai dalam waktu kurang dari setengah juta tahun. Dan itu durasi yang amat sangat singkat jika diukur dengan standar-standar geologis. Begitu singkatnya sampai-sampai, pada strata era-era purba yang dimaksud di sini, hampir tidak bisa dibedakan dari sekejap mata. Tudingan bahwa tak ada cukup waktu bagi mata untuk berevolusi ternyata tidak hanya salah, tetapi salah dengan jelas, meyakinkan, dan memalukan.

Tentu saja ada beberapa detail lain dari mata paripurna yang belum ditangani Nilsson dan Pelger dan yang mungkin (walau mereka berdua meragukannya) butuh waktu lebih lama untuk berevolusi. Ada evolusi awal sel-sel peka cahaya – yang sejauh ini kita sebut fotosel – yang mereka anggap telah dicapai

sebelum titik awal sistem evolusi model mereka. Ada fitur-fitur lain yang lebih maju dari mata modern, seperti perangkat untuk mengubah fokus mata, untuk mengubah ukuran pupil atau ‘f-stop’, dan untuk menggerakkan biji mata. Ada pula sistem di dalam otak yang dibutuhkan untuk mengolah informasi dari mata. Kemampuan menggerakkan mata itu penting, tidak hanya karena alasan yang sudah jelas, tetapi juga – lebih tak pelak lagi – untuk menahan arah pandang saat tubuh bergerak-gerak. Burung melakukannya dengan menggunakan otot-otot leher untuk menahan posisi kepala, meski sisa tubuh sedang bergerak aktif. Sistem bertaraf maju untuk tujuan ini melibatkan mekanisme otak yang cukup canggih. Tetapi tak sulit untuk melihat bahwa penyesuaian kasar dan tak sempurna lebih baik daripada nol. Maka, tak sulit pula mengurutkan rangkaian leluhur purba yang mengikuti jalur pendakian mulus di Gunung Kemuskilan.

Untuk memfokuskan sinar yang datang dari target amat jauh, kita butuh lensa yang lebih lemah daripada lensa untuk memfokuskan sinar yang datang dari target dekat. Fokus tajam untuk target jauh dan dekat adalah kemewahan yang tidak wajib, tetapi di alam liar setiap dorongan kecil bagi peluang bertahan hidup sungguh berarti dan, kenyataannya, bermacam-macam hewan menunjukkan berbagai mekanisme untuk mengubah-ubah fokus lensanya. Mamalia seperti kita melakukannya dengan otot-otot yang menarik lensa dan mengubah bentuknya sedikit. Demikian pula burung dan sebagian besar reptilia. Bunglon, ular, ikan, dan katak melakukannya sama seperti cara kamera, dengan sedikit menarik maju atau mundur lensanya. Hewan-hewan dengan mata yang lebih kecil tidak perlu begitu. Mata mereka seperti

kamera Brownie: kira-kira (meski tak sungguh tajam) terfokus pada semua jarak. Saat kita menua, sayangnya, mata kita makin mirip kamera Brownie dan kerap kali kita butuh kacamata bifokal untuk dapat melihat dekat dan jauh.

Sama sekali tidak sulit untuk membayangkan evolusi gradual mekanisme-mekanisme untuk mengubah-ubah fokus. Saat bereksperimen dengan kantong polietilena berisi air, saya lekas sadar bahwa ketajaman fokus dapat dibuat lebih baik (atau lebih buruk) kalau kantongnya saya sodok dengan jari. Tanpa mengawasi bentuknya – tanpa melihat kantongnya, bahkan – tetapi dengan berkonsentrasi pada kualitas citra yang diproyeksikan, saya menyodok dan meremas kantong itu secara acak hingga fokusnya lebih baik. Otot mana pun yang berada di sekitar gumpalan massa vitreus bisa saja, karena mengerut untuk tujuan lain, tak sengaja memfokuskan lensanya. Hal ini membuka jalur lebar nan mulus pendakian lereng-lereng Gunung Kemuskilan, yang dapat memuncak pada metode pengubahan fokus sebagaimana tampak pada mamalia atau bunglon.

Kemampuan mengubah bukaan – ukuran lubang masuk cahaya – mungkin sedikit lebih sulit dicapai, tetapi tidak sulit-sulit amat. Alasan bukaan perlu diubah-ubah serupa dengan skenario yang terjadi di sebuah kamera. Pada tiap taraf sensitivitas film/fotosel, boleh jadi cahayanya terlalu banyak (silau), boleh jadi terlalu sedikit. Selain itu, makin sempit lubangnya, makin baik kedalaman fokusnya – kisaran jarak yang dapat terfokus secara bersamaan. Kamera, atau mata, yang canggih memiliki pengukur cahaya bawaan yang secara otomatis mengatur kecil besarnya ukuran bukaan, sebagai respons terhadap jumlah cahaya yang tersedia. Pupil mata

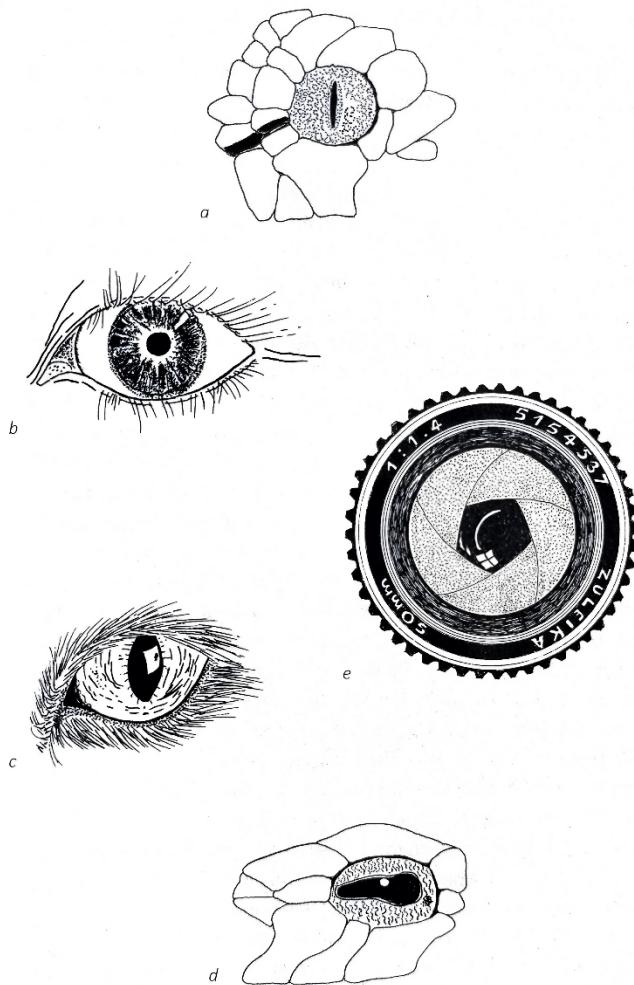
manusia adalah peranti teknologi otomasi yang lumayan canggih, sebuah karya yang dapat membuat bangga seorang ahli teknik rekayasa mikro dari Jepang.

Namun, sekali lagi, tidak sulit membayangkan betapa mekanisme canggih ini kiranya berawal dari lereng-lereng rendah Gunung Kemuskilan. Kita biasa mengira pupil berbentuk lingkaran, tetapi sebenarnya tidak harus. Bentuk apa pun bisa. Domba dan sapi memiliki pupil yang panjang, horizontal, berbentuk belah ketupat. Begitu pula gurita dan beberapa jenis ular, tetapi ada juga ular yang pupilnya berbentuk sayatan vertikal. Pupil kucing bervariasi, dari lingkaran hingga sayatan tipis vertikal (Gambar 5.15).

Apa Cingerling tahu manik-manik matanya  
Akan berubah sebentar-sebentar,  
Dan dari bundar ke hilal,  
Dari hilal ke bundar mereka berkitar?  
Cingerling merambat di sesela rumput  
Sendiri, acuh, dan bestari,  
Lalu menengadahkan ke bulan bersulih  
Dua matanya yang silih berganti.

WB Yeats

Pupil kamera mahal pun seringnya berbentuk segi banyak yang kasar, bukan lingkaran sempurna. Karena yang utama adalah bahwa jumlah cahaya yang masuk ke mata bisa dikendalikan. Bila ini sudah disadari, evolusi dini pupil bervariasi tak lagi jadi masalah. Ada banyak jalur landai untuk ditapaki di lereng-lereng bawah Gunung Kemuskilan. Diafragma iris, sama seperti sfincter anus, bukanlah pagar penghalang yang tak dapat ditembus oleh evolusi. Mungkin besaran terpenting yang perlu ditingkatkan adalah kecepatan

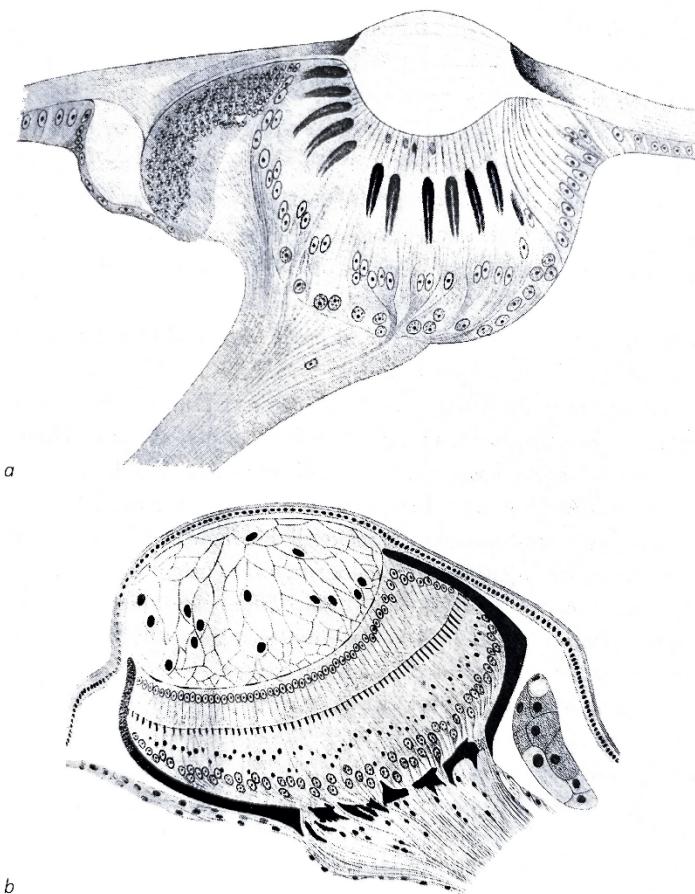


Gambar 5.15 Macam ragam pupil, termasuk pupil kamera. Tak penting bentuknya seperti apa, dan itulah alasan bentuk pupil beragam macam: (a) sanca kembang; (b) manusia; (c) kucing; (d) ular pohon hidung panjang; (e) kamera.

responsivitas pupilnya. Begitu sarafnya sudah ada, pemerceptannya jadi lereng gunung yang mudah ditanjaki. Pupil manusia merespons cepat – coba cek dengan mengarahkan senter ke mata sambil melihat pupil di cermin. (Efeknya tampak paling dramatis jika senter disorotkan ke satu mata sementara mata yang lain melihat pupilnya: karena keduanya bergandengan.)

Seperti telah kita lihat, model Nilsson dan Pelger memunculkan lensa indeks bertingkat, yang berbeda dari sebagian besar lensa buatan manusia, tetapi serupa dengan lensa pada mata ikan, cumi-cumi, dan mata kamera bawah air lainnya. Lensa tersebut timbul akibat kondensasi sebuah zona terbatas dengan indeks refraktif tinggi di dalam jeli transparan yang tadinya seragam.

Tidak semua lensa berevolusi dengan proses kondensasi dari segumpal massa yang kental. Gambar 5.16 menunjukkan dua mata serangga yang membentuk lensa mereka dengan cara yang cukup berbeda. Keduanya disebut mata sederhana, untuk membedakannya dari mata majemuk yang akan kita bahas sebentar lagi. Pada contoh mata sederhana yang pertama, dari larva lalat gergaji, lensa terbentuk dari penebalan kornea – lapisan transparan luar. Pada contoh kedua, dari lalat capung, kornea tidak ditebalkan dan lensanya berkembang menjadi segumpal massa sel transparan yang nirwana. Kedua metode pengembangan lensa ini mengilustrasikan cara mendaki Gunung Kemuskilan yang sama seperti yang telah kita lalui untuk mata massa vitreus cacing. Lensa, seperti mata itu sendiri, tampak telah berkali-kali berevolusi secara mandiri. Gunung Kemuskilan punya banyak puncak dan bukit kecil.



Gambar 5.16 Dua cara tumbuh lensa mata serangga: (a) larva lalat gergaji; (b) lalat capung.

Retina pun menunjukkan keragaman asal mulanya lewat bentuknya yang bervariasi. Terkecuali satu, semua mata yang sejauh ini saya terangkan menempatkan fotosel-fotoselnya di depan saraf yang menghubungkannya ke otak. Cara ini jelas-

jelas wajar, tetapi tidak universal. Cacing pipih pada Gambar 5.4a menaruh fotosel-fotoselnya pada sisi yang keliru dari saraf-saraf penghubungnya. Demikian pula mata vertebrata kita. Fotosel-fotoselnya mengarah ke belakang, membelakangi cahaya. Fakta ini tidak sekonyol kedengarannya. Karena perawakannya yang amat kerdil dan transparan, ke mana pun mereka mengarah, rata-rata foton akan langsung masuk dan melewati halang-rintang belukar yang diruyaki pigmen, siaga menangkap mereka. Satu-satunya alasan untuk mengatakan bahwa fotosel-fotosel vertebrata menghadap ke belakang adalah karena ‘kawat-kawat’ (saraf) penghubungnya ke otak bertolak ke arah yang salah, menuju cahaya, bukan ke otak. Saraf-saraf ini melintas hingga ke permukaan depan retina, menuju ke satu titik, yang disebut ‘titik buta’. Di titik inilah mereka menyelam melalui retina ke saraf optik, dan itulah alasan retina buta di titik ini. Meskipun kita semua secara teknis buta di titik itu, kita hampir tidak menyadarinya karena otak begitu cerdik dalam menyusun kembali bagian hilangnya. Kita sadar akan adanya titik buta hanya jika citra sebuah benda kecil, yang telah kita pastikan keberadaannya, bergeser ke titik tersebut: Citra itu tampak lenyap seperti cahaya, seolah digantikan oleh warna latar belakang umum dari area itu.

Tadi saya katakan bahwa tak banyak pengaruhnya kalau retinanya terbalik. Dapat diketengahkan bahwa – bila semua faktor lainnya mutlak diabaikan – agaknya akan lebih baik andai retina kita tidak terbalik. Mungkin ini contoh yang baik bahwa Gunung Kemuskilan nyatanya memiliki lebih dari satu puncak, dengan lembah-lembah yang dalam di antara puncak-puncaknya. Begitu mata yang baik mulai berevolusi dengan

retina terbalik, satu-satunya cara untuk naik adalah dengan meningkatkan desain mata yang ada. Perubahan ke desain yang amat sangat berbeda sama dengan melangkah turun, tidak hanya sedikit, tetapi hingga ke jurang yang dalam, dan hal itu tidak diizinkan oleh seleksi alam. Retina vertebrata menghadap seperti itu karena caranya berkembang di dalam embrio, dan hal ini tentu dipengaruhi oleh para leluhur purbanya. Mata dari banyak invertebrata tumbuh dengan beragam cara, dan retina mereka kemudian menghadap ke arah yang ‘benar’.

Mengesampingkan fakta menarik soal menghadap terbalik ini, retina vertebrata mampu menaiki sebagian dari puncak-puncak tertinggi Gunung Kemuskilan. Retina manusia memiliki sekitar 166 juta fotosel, yang dibagi ke dalam berbagai jenis. Pembagian dasarnya adalah sel batang (khusus untuk penglihatan nirwarna dengan presisi rendah pada cahaya yang relatif temaram) dan sel kerucut (khusus untuk penglihatan berwarna dengan presisi tinggi pada cahaya terang). Anda membaca kata-kata ini hanya dengan sel-sel kerucut. Andai Juliet melihat Komet Halley, sel-sel batang matanya lah yang berjasa untuk itu. Sel-sel kerucut terkonsentrasi di satu area sentral yang kecil, fovea (Anda membaca dengan fovea Anda) dan di area itu tidak terdapat sel-sel batang. Itulah mengapa, kalau ingin melihat objek yang sangat redup seperti Komet Halley, kita harus mengarahkan mata bukan langsung ke bendanya, tetapi sedikit menjauh, sehingga cahaya tirusnya tidak menimpa fovea. Jumlah fotosel, dan perbedaan fotosel ke lebih dari satu jenis, tidak menghadirkan masalah khusus dari sudut pandang pendakian Gunung Kemuskilan. Kedua



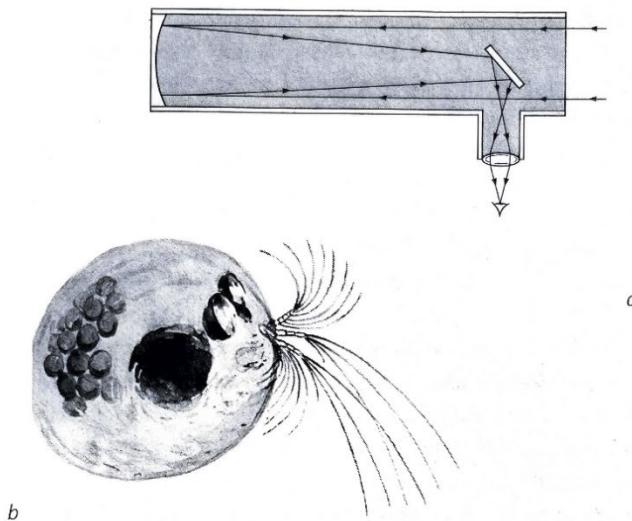
jenis peningkatan ini jelas-jelas merupakan lereng-lereng landai ke atas gunung.

Retina besar melihat lebih baik dari retina kecil. Fotosel yang dapat dimuat ke dalamnya lebih banyak dan, alhasil, detail yang dapat dilihat pun lebih banyak. Namun, selalu ada biayanya. Ingat lagi siput surealis di Gambar 5.1. Tapi ada cara bagi seekor hewan kecil untuk dapat menikmati retina yang lebih besar dari yang dibayarnya. Profesor Michael Land dari Universitas Sussex, pemilik segudang prestasi penemuan-penemuan eksotis di dunia mata dan sosok yang menjadi tempat saya menimba ilmu tentang mata, menemukan contoh menakjubkan pada laba-laba peloncat.\*\* Laba-laba tidak memiliki mata majemuk: Laba-laba peloncat telah membawa mata kamera ke puncak ekonomi yang mengagumkan (Gambar 5.17). Yang ditemukan oleh Land adalah sebuah retina yang luar biasa. Alih-alih berupa lembaran lebar tempat citra lengkapnya dapat diproyeksikan, retina laba-laba ini berbentuk garis vertikal panjang, yang tak cukup lebar untuk mengakomodasi citra yang layak. Tetapi hewan ini mengompensasi kesempitan retinanya dengan akal-akalan cerdik. Ia menggerakkan retinanya secara sistematis, ‘memindai’ area tempat citra mungkin diproyeksikan. Oleh karena itu, retina efektifnya jauh lebih besar dari retina aktualnya – agak mirip dengan prinsip laba-laba bolas yang, dengan seutas benang sutranya yang diputar-putar, dapat menyamai luas bidang tangkapan jaring laba-laba pada umumnya. Jika retina laba-laba peloncat menemukan objek menarik, seperti lalat yang sedang bergerak atau laba-laba peloncat lainnya, retina ini akan memusatkan gerakan pemindainya tepat pada area sasarannya. Efeknya sepadan



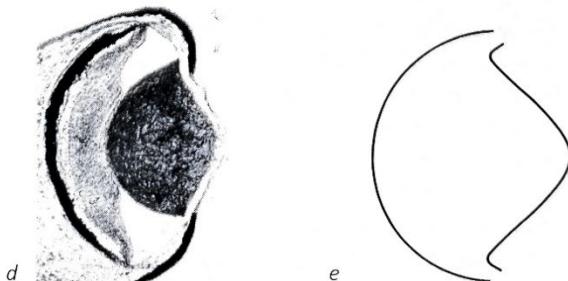
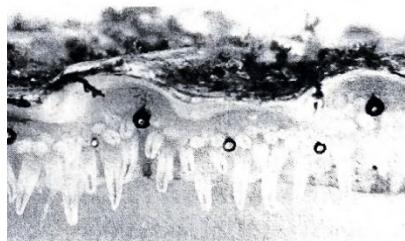
Gambar 5.17 Laba-laba peloncat.

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



b

Gambar 5.18 Solusi cermin lengkung untuk masalah pembentukan citra: (a) teleskop reflektor; (b) *Gigantocypris*, hewan krustasea planktonis besar, dilukis oleh Sir Alister Hardy; (c) barisan mata simpung, mengintip dari celah cangkangnya; (d) tampang lintang mata simpung; (e) bentuk oval Kartesian.



dengan fovea yang digerak-gerakkan. Dengan trik pintar ini, laba-laba peloncat telah membawa mata berlensa ke sebuah puncak kecil yang terhormat di area lokalnya di Gunung Kemuskilan.

Saya mengemukakan lensa sebagai solusi sempurna untuk masalah kelemahan mata lubang jarum. Tapi itu bukan satu-satunya solusi. Cermin lengkung, walau berbeda prinsip dari lensa, dapat menjadi solusi alternatif yang baik untuk isu pengumpulan sejumlah besar cahaya dari tiap titik pada sebuah benda, dan memfokuskannya ke satu titik pada sebuah citra. Untuk beberapa tujuan, cermin lengkung justru merupakan solusi yang lebih hemat ketimbang lensa, dan semua teleskop optik terbesar di dunia adalah teleskop reflektor (Gambar 5.18a). Satu persoalan minor pada teleskop reflektor adalah bahwa citranya dibentuk di depan cermin, menghalangi jalan masuknya sinar. Teleskop reflektor biasanya dilengkapi sebuah cermin kecil untuk memantulkan citra terfokusnya ke samping, menuju sebuah kanta mata atau kamera. Cermin kecil ini tidak sampai menghalangi jalan hingga merusak citranya. Citra terfokus dari cermin kecilnya tidak terlihat: Alat ini hanya sedikit saja mereduksi jumlah total cahaya yang membentur cermin besar di belakang teleskop.

Maka, cermin lengkung adalah solusi fisik yang secara teoretis dapat menjawab sebuah soalan penting. Adakah contoh mata cermin lengkung di kingdom animalia? Prasaran paling awal terkait hal ini dikemukakan oleh profesor lama saya di Oxford, Sir Alister Hardy, saat mengomentari lukisan hewan krustasea laut dalam menakjubkan, *Gigantocypris*, yang dibuatnya (Gambar 5.18b). Ahli astronomi menangkap segelintir foton

yang datang dari bintang-bintang jauh dengan cermin-cermin lengkung besar di observatorium seperti Gunung Wilson dan Palomar. Bawa *Gigantocypris* melakukan hal serupa dengan segelintir foton yang menembus samudra-samudra dalam adalah pikiran yang menggoda. Namun, penyelidikan-penyelidikan terbaru Michael Land secara terperinci memastikan bahwa kemiripan tersebut tidak ada. Saat ini, cara *Gigantocypris* melihat tidak jelas.

Akan tetapi, ada jenis hewan lain yang memang menggunakan cermin lengkung yang bonafid untuk membentuk citra, meski tetap dibantu dengan lensa. Sekali lagi, fakta ini ditemukan oleh Raja Midas penelitian mata satwa, Michael Land. Hewan tersebut adalah simping.

Foto pada Gambar 5.18c adalah hasil pembesaran dari potongan kecil (dengan lebar dua gelombang cangkang) celah dari salah satu jenis hewan bivalvia ini. Di antara cangkang dan tentakelnya terdapat sebaris berisi puluhan mata mungil. Tiap mata membentuk sebuah citra, menggunakan cermin lengkung yang terletak jauh di belakang retina. Cermin inilah yang menyebabkan tiap mata berbinar seperti mutiara kecil berwarna biru atau hijau. Jika ditampang lintang, matanya tampak seperti Gambar 5.18d. Seperti saya sebutkan tadi, ada lensa ada pula cermin, dan saya akan kembali ke pokok itu lagi nanti. Retinanya adalah seluruh area keabu-abuan yang terletak di antara lensa dan cermin lengkungnya. Bagian retina yang melihat citra tajam yang diproyeksikan oleh cermin itu adalah bagian yang berbatasan langsung dengan belakang lensa. Citranya terbalik dan dibentuk dengan sinar-sinar yang dipantulkan mundur oleh cerminnya.

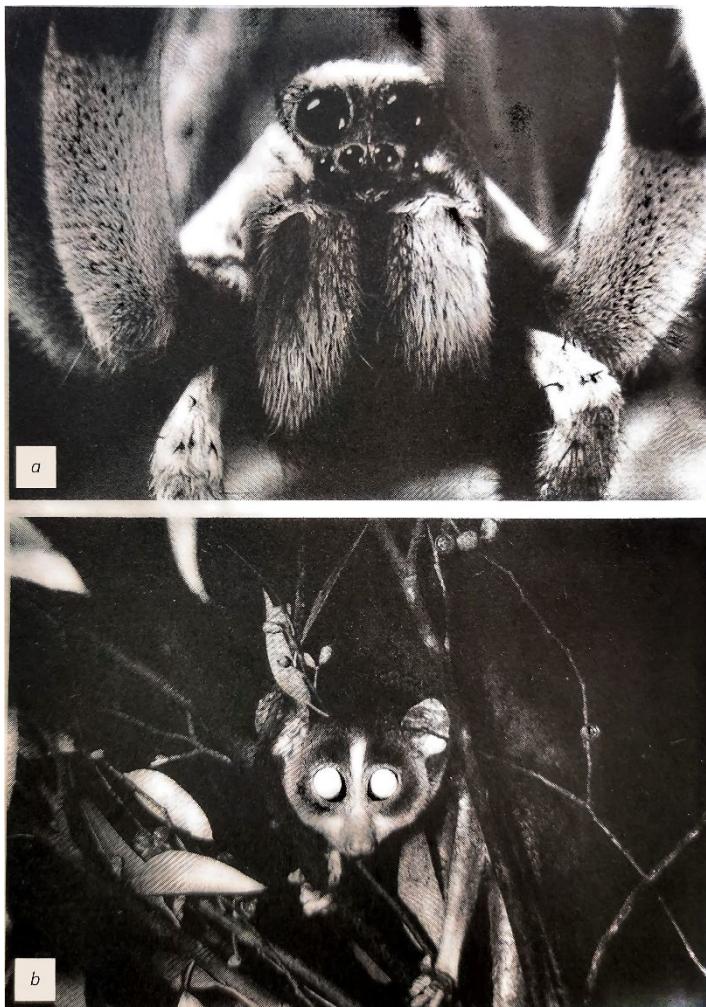
Lalu, buat apa ada lensa di sana? Cermin-cermin bundar seperti ini dapat mengalami sejenis distorsi yang disebut aberasi sferis. Salah satu desain terkenal teleskop reflektor, Schmidt, mengatasi masalah ini dengan kombinasi cerdik lensa dan cermin. Mata simpung agaknya memecahkan masalah ini dengan cara yang sedikit berbeda. Aberasi sferis, secara teoretis, dapat diatasi dengan sejenis lensa khusus yang bentuknya disebut 'oval Kartesian'. Gambar 5.18e adalah diagram oval Kartesian yang secara teoretis ideal. Sekarang lihat lagi profil lensa aktual dari mata simpung tersebut (Gambar 5.18d). Melihat betapa kentara kemiripannya, Profesor Land menyarankan bahwa lensanya ada sebagai pengoreksi aberasi sferis cermin, peranti pembentuk citranya yang utama.

Terkait dengan asal mula mata cermin lengkung di lereng-lereng bawah kawasannya sendiri di Gunung Kemuskilan, kita dapat mengemukakan sebuah hipotesis. Lapisan-lapisan reflektor di belakang retina lazim ada di kingdom animalia, tetapi untuk tujuan berbeda, bukan untuk membentuk citra, seperti pada simpung. Cobalah masuki hutan dengan membawa senter yang terang. Anda akan melihat banyak berkas sinar kembar yang melotot balik. Banyak mamalia, khususnya mamalia nokturnal seperti *potto* emas atau *angwantibo* dari Afrika Barat (Gambar 5.19b), memiliki sebuah tapetum, lapisan reflektor di belakang retina. Tapetum berfungsi menyediakan kesempatan kedua untuk menangkap foton yang gagal dihentikan fotosel: Tiap foton dipantulkan langsung ke fotosel yang gagal menangkapnya tadi, sehingga citranya tidak terdistorsi. Invertebrata pun telah menemukan tapetum. Senter terang di hutan adalah cara sempurna untuk



menemukan jenis-jenis laba-laba tertentu. Malah, kalau melihat potret seekor laba-laba serigala (Gambar 5.19a), mungkin kita membatin: Mengapa ‘mata kucing’ yang bertebaran di jalan raya tidak disebut ‘mata laba-laba’ saja? Tapetum untuk menangkap foton hingga rintik terakhir barangkali telah berevolusi pada mata mangkuk purba jauh sebelum lensa. Mungkin tapetum adalah pra-adaptasi yang, pada segelintir makhluk, telah dimodifikasi untuk membentuk mata ala teleskop reflektor. Atau cerminnya dapat juga timbul dari sumber yang lain. Sulit untuk memastikan mana yang benar.

Lensa dan cermin lengkung adalah dua cara untuk memfokuskan citra dengan tajam. Pada kedua kasus ini, citranya terbalik (atas-bawah dan kiri-kanan). Jenis mata yang sama sekali berbeda, yang menghasilkan citra dengan posisi tegak yang benar, adalah mata majemuk, yang lebih dipilih oleh serangga, krustasea, beberapa jenis cacing dan moluska, kepiting raja (makhluk laut aneh yang konon berkerabat lebih dekat ke laba-laba daripada kepiting sungguhan), dan kelompok besar trilobit yang kini telah punah. Ada beberapa jenis mata majemuk, sebenarnya. Saya akan mulai dari jenis yang paling elementer, yang disebut mata majemuk aposisi. Untuk memahami cara kerja mata aposisi, kita beranjak kembali hingga hampir ke kaki Gunung Kemuskilan. Seperti telah kita lihat, jika ingin mata dapat melihat sebuah citra atau lebih dari sekadar memberi isyarat tentang intensitas cahaya, perlu lebih dari satu fotosel, dan kumpulan fotosel ini harus menangkap cahaya dari berbagai arah. Salah satu cara untuk membuat mereka melihat ke berbagai arah adalah dengan mewadahinya di sebuah mangkuk, yang dilatari layar buram.

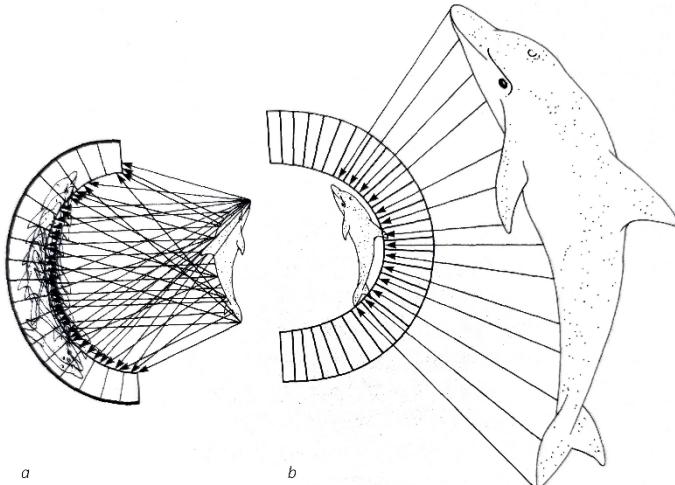


Gambar 5.19 Sapu bersih foton dengan memantulkannya balik. Tapetum berpijar di balik mata (a) seekor laba-laba serigala, *Geolycosa sp.*, dan (b) seekor *potto* emas.

Semua mata yang sejauh ini kita bicarakan diturunkan dari prinsip mangkuk cekung ini. Tapi mungkin solusi yang lebih

jelas lagi untuk masalah ini adalah menempatkan fotosel-fotosel pada permukaan luar yang cembung dari mangkuknya sehingga fotosel-fotoselnya menghadap keluar, ke berbagai arah. Ini cara bagus untuk membayangkan mata majemuk, dalam versinya yang paling sederhana.

Coba ingat lagi waktu pertama kali kita ketengahkan masalah pembentukan citra lumba-lumba. Saya menunjukkan bahwa masalahnya bisa disebut masalah terlalu banyak citra. Hiruk pikuk ‘lumba-lumba’ pada retina, yang jumpalitan di setiap titik pada retina, sama dengan tak terlihatnya satu lumba-lumba pun (Gambar 5.20a). Mata lubang jarum bisa menjadi solusi karena mampu menyaring hampir semua sinarnya, menyisakan segelintir yang saling bersilangan di dalam lubang jarum dan membentuk citra lumba-lumba terbalik. Kita mem-



Gambar 5.20 (a) reproduksi Gambar 5.6; (b) mangkuknya dicembungkan.  
Prinsip mata majemuk aposisi.

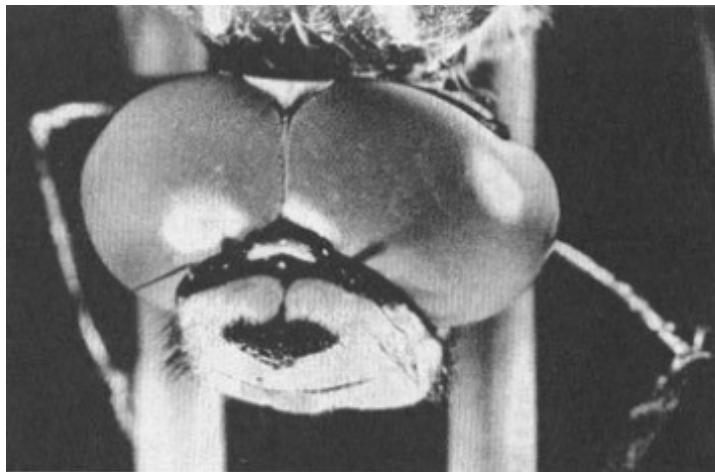
perlakukan lensa sebagai versi lebih canggih dari prinsip yang sama. Mata majemuk aposisi memecahkan masalah ini dengan cara yang bahkan lebih sederhana.

Mata dibangun sebagai segugus padat pipa lurus panjang, yang memancar ke semua arah dari atap kubahnya. Tiap pipa ini ibarat alat bidik yang hanya melihat sebagian kecil dunia di arah garis tembak langsungnya. Dalam konteks metafora saringan, boleh dikata sinar yang berasal dari bagian-bagian lain pemandangannya itu dicegah, oleh dinding pipa dan pelataran kubahnya, sehingga tidak dapat membentur sisi belakang pipa, tempat fotosel berada.

Seperti itulah, pada dasarnya, cara kerja mata majemuk aposisi. Pada praktiknya, tiap-tiap dari mata pipa kecil itu (ommatidium, istilah teknisnya) sedikit lebih dari sekadar pipa. Ommatidium memiliki lensanya sendiri, dan ‘retina’ kecil yang menampung, biasanya, lebih kurang enam buah fotosel. Kalaupun tiap ommatidium dapat menghasilkan citra di dasar pipa sempit tersebut, citra itu terbalik: Ommatidium berfungsi layaknya mata kamera yang panjang dan buruk mutunya. Namun, citra-citra terbalik dari tiap-tiap ommatidium diabaikan. Ommatidium hanya melaporkan sebanyak apa cahaya yang melalui pipanya. Lensa bertugas hanya untuk mengumpulkan lebih banyak sinar dari arah alat bidik ommatidium dan memfokuskan sinar-sinar itu ke retina. Ketika semua ommatidium disatukan, yang terbentuk adalah ‘citra’ tegak yang benar, sebagaimana tampak pada Gambar 5.20b.

Tentu saja, ‘citra’ di sini tidak harus seperti bayangan kita tentang citra: sebuah persepsi akurat warna-warni dari selu-





Gambar 5.21 Mata majemuk besar pada predator terbang yang berburu dengan peranti visual, capung *Aeshna Cyanea*.

ruh tayangannya. Alih-alih, yang dimaksud adalah kemampuan menggunakan mata untuk membedakan hal yang tengah berlangsung di berbagai penjuru. Sebagian serangga mungkin, contohnya, menggunakan mata majemuk mereka hanya untuk melacak sasaran yang bergerak. Hewan-hewan ini boleh jadi buta terhadap tayangan diam. Pertanyaan apakah hewan melihat dengan cara yang sama seperti kita adalah pertanyaan yang agak filosofis dan menjawab pertanyaan itu mungkin tugas yang lebih sulit dari biasanya.

Prinsip mata majemuk cukup efektif bagi, misalnya, seekor capung untuk membidik lalat yang bergerak, tetapi agar mata majemuk dapat melihat detail sebanyak kita, ukurannya mestilah jauh lebih besar dari mata kamera sederhana yang kita punya. Berikut ini kira-kira alasannya. Jelas, makin banyak ommatidium, yang semuanya menuju ke arah yang sedikit

berbeda, makin halus detail yang terlihat. Seekor capung memiliki sekitar 30.000 ommatidium dan hewan ini sudah lumayan pandai berburu serangga sambil terbang (Gambar 5.21). Tetapi untuk melihat detail sebanyak yang bisa kita lihat, perlu jutaan ommatidium. Satu-satunya cara untuk memuat jutaan ommatidium adalah dengan membuatnya amat sangat kecil. Dan sayangnya, ada batas tegas untuk bisa sekecil apa ommatidium itu. Batas itu sama dengan yang kita jumpai saat membahas lubang jarum yang sangat kecil, dan namanya adalah batas difraksi. Konsekuensinya adalah bahwa, agar mata majemuk melihat sepersis mata kamera manusia, ia harus bukan main besarnya: dengan diameter dua puluh empat meter! Ilmuwan Jerman, Kuno Kirschfeld, mendramatisir hal ini dengan menggambar rupa seorang lelaki jika ia bisa melihat sebaik manusia biasa, tetapi dengan mata majemuk (Gambar 5.22). Omong-omong, pola sarang lebah pada gambar itu bersifat impresionis. Tiap segi yang digambar sebetulnya memuat 10.000 ommatidium. Alasan mata majemuk lelaki itu hanya berdiameter sekitar satu meter (bukan dua puluh empat) adalah karena Kirschfeld menimbang fakta bahwa kita manusia melihat dengan sangat persis hanya pada pusat retina kita. Ia menghitung rerata dari penglihatan sentral kita yang persis dan penglihatan yang jauh kalah persis pada area sekitar tepi retina kita, lalu memunculkan mata satu meter yang tampak di gambar itu. Entah semeter entah dua puluh empat meter, mata majemuk sebesar ini tidak praktis. Intinya adalah, kalau ingin melihat citra-citra dunia yang mendetail dan persis, pakai mata kamera sederhana dengan satu lensa yang baik, jangan mata majemuk. Tentang mata majemuk ini, Dan Nilsson bahkan berkomentar ‘Tidak terlalu berlebihan jika dikata bahwa evo-



Gambar 5.22 Ilustrasi Kuno Kirschfeld atas perawakan seorang lelaki dengan mata majemuk kalau ia ingin melihat layaknya manusia normal.

lusi tampak berjuang habis-habisan untuk memperbaiki desain yang sudah nahas sejak awal'.

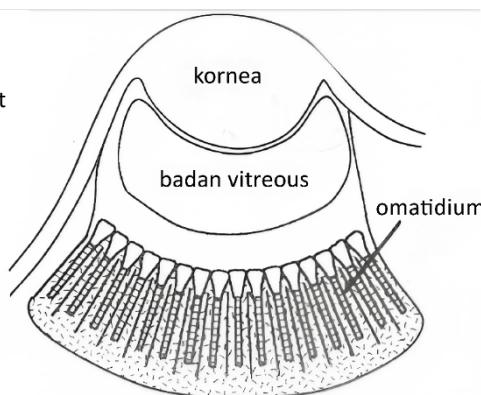
Lantas mengapa serangga dan krustasea meninggalkan mata majemuk lalu mengevolusikan mata kamera? Boleh jadi, ini tergolong kasus terjebak di sisi yang keliru dari sebuah lembah di mandala meru Gunung Kemuskilan. Untuk mengubah mata majemuk menjadi mata kamera, harus ada serangkaian sinambung berisi perantara-perantara yang fungsional: Dilarang turun ke bawah lembah sebagai awalan untuk memanjat puncak yang lebih tinggi. Jadi, apa masalah yang ada pada perantara-perantara dari mata majemuk dan mata kamera?

Setidak-tidaknya, terlintas satu kesulitan yang luar biasa. Ma-

ta kamera membentuk citra yang terbalik. Citra mata majemuk benar posisinya. Menemukan perantara di antara keduanya adalah, istilah halusnya, proposisi yang berat. Boleh jadi, perantaranya adalah kondisi tanpa citra sama sekali. Beberapa hewan sampai terpaksa 'rela' tak melihat citra karena hidup di habitat yang pasokan fotonnya miskin papa (laut dalam atau tempat yang hampir gelap gulita). Harapan yang tersisa bagi mereka hanyalah mengetahui ada tidaknya cahaya. Hewan semacam ini bisa kehilangan perangkat saraf pengolah citranya sehingga harus mulai dari nol lagi di lereng gunung yang sama sekali berbeda. Oleh karena itu, ia dapat menjadi perantara di jalur dari mata majemuk ke mata kamera.

Beberapa krustasea yang hidup laut dalam memiliki mata majemuk besar, tetapi tanpa lensa atau perangkat optik sama sekali. Ommatidium mereka telah kehilangan pipa-pipanya dan fotosel-fotosel mereka terbuka tepat di permukaan luar tempatnya menangkap segelintir foton yang ada, terlepas dari

Gambar 5.23 Mata kamera dengan mata majemuk pada riwayat keleluhurnya. Mata menakjubkan *Ampelisca*.



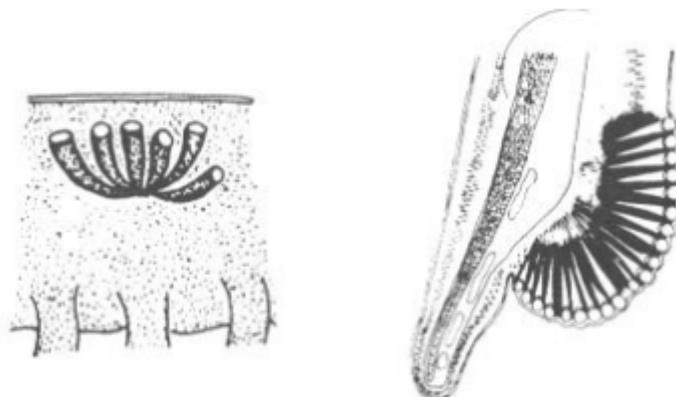
arahnya. Dari situ, tak sulit untuk beranjak ke mata menakjubkan pada Gambar 5.23. Mata ini milik seekor krustasea, yang disebut *Ampelisca*, yang habitatnya tidaklah amat dalam – barangkali hewan ini sedang dalam perjalanan naik lagi dari para leluhur laut dalamnya. Mata *Ampelisca* berfungsi layaknya mata kamera, dengan sebuah lensa yang membentuk citra terbalik pada retina. Namun, retinanya jelas-jelas diturunkan dari sebuah mata majemuk dan terdiri atas sisa-sisa sekumpulan ommatidium. Langkah yang pendek mungkin, tapi hanya jika, selama masa peralihan dari kondisi hampir buta total, otaknya memiliki cukup waktu evolusi untuk ‘melupakan’ segalanya tentang pemrosesan citra yang tegak benar.

Itulah satu contoh evolusi dari mata majemuk ke mata kamera (yang, omong-omong, sekaligus menjadi contoh lain mudahnya mata berevolusi secara mandiri di seantero kingdom animalia). Tapi bagaimana awalnya mata majemuk itu berevolusi? Apa yang kita temukan pada lereng-lereng rendah dari puncak Gunung Kemuskilan yang ini?

Sekali lagi, kita bisa terbantu dengan melihat sekitaran kingdom animalia modern. Di luar kelompok artropoda (serangga, krustasea, dan kerabatnya), mata majemuk hanya ditemukan pada cacing Polychaeta (cacing perca dan cacing tabung) dan pada beberapa jenis moluska bivalvia (lagi-lagi, kemungkinan dievolusikan secara terpisah). Cacing dan moluska dapat berperan bagi kita sebagai sejarawan evolusi karena di bangsa mereka terdapat beberapa mata primitif yang agaknya merupakan perantara yang berjejer di sepanjang lereng-lereng rendah Gunung Kemuskilan menuju puncak mata majemuk. Mata pada Gambar 5.24 berasal dari

dua spesies cacing. Sekali lagi, mereka ini bukan hewan leluhur, melainkan spesies modern, dan bahkan mungkin tidak diturunkan dari hewan perantara yang sebenarnya. Tetapi mereka menjadi jendela tempat kita mengintip sekilas seperti apa kiranya perkembangan evolusi itu, dari gugusan longgar fotosel di kiri ke mata majemuk di kanan. Lereng ini tentu sama landainya dengan lereng yang kita tanjaki untuk sampai ke mata kamera yang biasa.

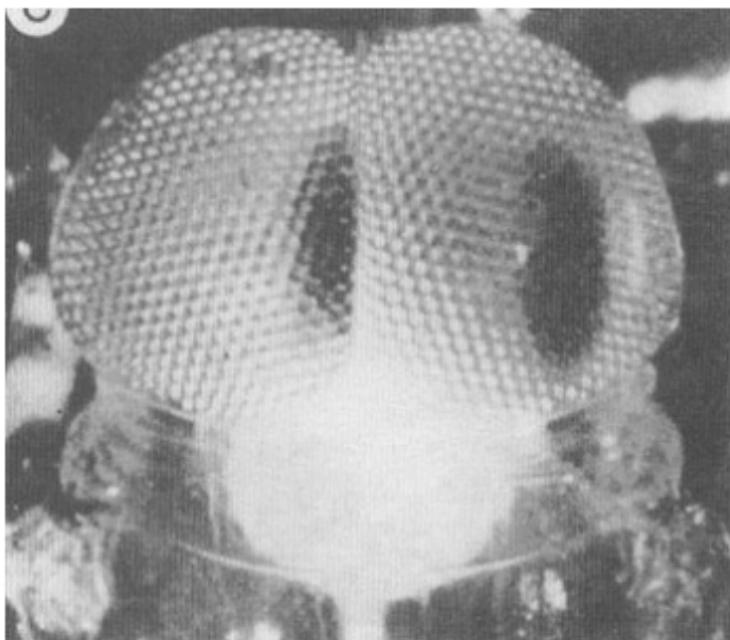
Ommatidium, sebagaimana sejauh ini telah kita bahas, bergantung pada efektivitas keterpencilannya dari para tetangga. Alat bidik yang melihat ke ujung ekor lumba-lumba itu tak boleh menangkap sinar dari bagian-bagian lain lumbanya; kalau tidak, kita akan kembali ke masalah awal: jutaan citra lumba-lumba. Sebagian besar ommatidium mewujudkan keterpencilan ini dengan menaruh selubung pigmen gelap di sekeliling pipanya. Namun, ada kalanya hal ini berefek samping yang buruk. Beberapa makhluk laut mengan-



Gambar 5.24 Mata majemuk yang kemungkinan primitif dari dua jenis cacing.

dalkan transparansi untuk kamuflasenya. Mereka hidup di dan terlihat seperti air laut. Maka, hakikat dari kamuflase mereka adalah tidak menghentikan foton. Padahal, tujuan utama layar gelap di sekeliling ommatidium adalah menghentikan foton. Bagaimana cara untuk lolos dari kontradiksi yang kejam ini?

Ada beberapa krustasea laut dalam yang telah memunculkan solusi parsial yang lihai (Gambar 5.25). Tidak ada pigmen penyelubung dan ommatidiumnya pun bukan pipa dalam pengertian lumrahnya, melainkan berupa pandu-pandu cahaya transparan, yang berfungsi persis seperti sistem serat



Gambar 5.25 Mata seekor krustasea laut dalam dengan pandu cahaya serat optik.

optik buatan manusia. Ujung dari tiap pandu cahaya itu menggembung jadi lensa mungil, dengan indeks refraktif bervariasi seperti mata ikan. Dengan lensa dan *ubarampe*-nya, pandu cahaya tersebut memumpun sejumlah besar cahaya ke fotosel-fotosel di dasarnya. Namun, cahaya yang masuk hanyalah yang datang lurus segaris dengan alat bidiknya. Berkas-berkas cahaya yang datang dari samping pipa, alih-alih ditangkis dengan layar pigmen, dipantulkan balik dan tidak memasuki pandu cahaya itu.



Gambar 5.26 Potret Charles Darwin, difoto oleh Michael Land melalui lensa majemuk seekor kunang-kunang.



Tidak semua mata majemuk mencoba mengisolir arus cahayanya sendiri. Hanya mata bertipe aposisi saja yang begitu. Setidaknya ada tiga jenis mata majemuk ‘superposisi’ yang berfungsi dengan cara yang lebih pelik lagi. Bukananya menangkap sinar dengan pipa atau pandu cahaya serat optik, ketiga jenis mata majemuk ini membiarkan sinar melewati lensa dari satu ommatidium untuk ditangkap oleh fotosel-fotosel ommatidium di sebelahnya. Ada zona kosong transparan yang digunakan bersama oleh semua ommatidium. Lensa-lensa dari semua ommatidium bersekongkol untuk membentuk satu citra di retina bersama yang disatupadukan dari sel-sel peka cahaya semua ommatidiumnya. Gambar 5.26 adalah gambar Charles Darwin yang difoto oleh Michael Land menggunakan lensa majemuk mata majemuk superposisi kunang-kunang.

Citra di mata majemuk superposisi ini, seperti citra mata majemuk aposisi tetapi lain dari citra mata kamera *Ampelisca* di Gambar 5.23, tegak lurus dengan benar. Hal ini sudah bisa diduga bila kita mengasumsikan bahwa mata superposisi diturunkan dari leluhur aposisi. Secara historis, jadi masuk akal – dan, dalam kaitannya dengan kerja otak, mestilah ada transisi mudahnya. Tetapi ini tetap fakta yang sangat mengagumkan. Karena coba timbang permasalahan fisik dalam upaya mengonstruksi citra yang tegak benar dengan cara ini. Tiap ommatidium di sebuah mata aposisi memiliki lensa normal di depannya yang, kalaupun bisa, akan menghasilkan citra yang tegak terbalik. Oleh karena itu, untuk mengubah mata aposisi menjadi superposisi, sinar, saat melewati tiap lensa, harus diputar sedemikian rupa agar tegak benar. Tidak hanya itu, tiap-tiap citra dari tiap-tiap lensa harus

disusun-tumpuk dengan teliti untuk menghasilkan satu citra bersama. Keuntungan dari hal ini adalah bahwa citra bersama ini jauh lebih terang. Namun, tugas memutar balik sinar ini adalah tugas yang berat. Menakjubkannya, masalah ini tidak hanya telah terpecahkan dalam evolusi, tetapi dipecahkan sedikitnya dengan tiga cara: dengan lensa pelengkap, dengan cermin pelengkap, dan dengan sirkuit saraf pelengkap. Perinciannya begitu pelik sehingga, jika diuraikan semua, bab yang sudah lumayan rumit ini akan jadi runyam. Karena itu, saya akan paparkan ringkasnya saja.

Lensa tunggal membuat citranya tegak terbalik. Sejalan dengan itu, lensa tambahan, yang ditempatkan di belakangnya dengan jarak pas, akan membalik citra itu ke posisi yang benar. Kombinasi ini digunakan dalam sebuah instrumen yang disebut teleskop Keplerian. Efek yang sepadan dapat dicapai dengan satu lensa kompleks, menggunakan gradasi indeks refraktif. Seperti telah kita lihat bersama, lensa biologis, lain dari lensa buatan manusia, pandai mewujudkan gradasi indeks refraktif ini. Metode penyimulasian efek teleskop Keplerian ini dipakai oleh lalat capung, lalat jala, kumbang, ngengat, lalat kadis, dan hewan-hewan yang tergolong dalam lima kelompok krustasea. Jarak kesepupuan satwa-satwa ini mengindikasikan bahwa setidaknya beberapa dari kelompok-kelompok ini mengembangkan trik Kepleriannya sendiri-sendiri. Trik yang sepadan diperagakan oleh tiga kelompok krustasea, menggunakan cermin. Dua dari ketiga kelompok ini juga memiliki anggota yang memakai trik lensa. Sungguh, jika kita amati kelompok hewan mana yang menerapkan jenis mana dari beberapa tipe mata majemuk yang ada, akan tampak hal yang menakjubkan. Aneka solusi

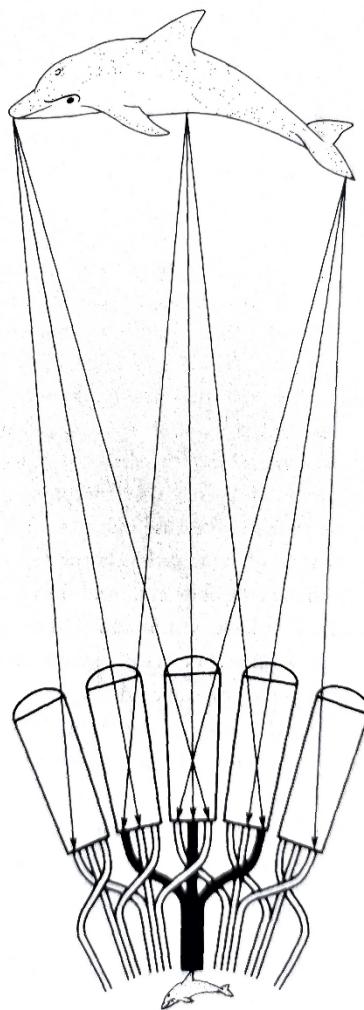


timbul di sini, di sana, di mana-mana – yang lagi-lagi menyarankan bahwa mereka berevolusi dengan pesat dan dalam sekejap.

‘Superposisi neural’ atau ‘superposisi terangkai’ telah berevolusi di satu kelompok besar dan penting dari serangga bersayap dua, lalat-lalatan (sambil lalu, kunang-kunang, seperti yang disebutkan pada Gambar 5.26, bukan lalat, melainkan kumbang). Sistem serupa juga terjadi pada serangga air *water boatman* (Corixidae), yang lagi-lagi tampaknya berevolusi secara mandiri. Superposisi neural ini cerdiknya bukan main. Boleh dibilang, metode ini bukan superposisi sama sekali karena jajaran ommatidium tetap berupa pipa-pipa terpencil, sebagaimana terdapat pada mata aposisi. Namun, efek bak-superposisinya dicapai dengan perangkaian cerdik sel-sel saraf di belakang ommatidium. Begini caranya. Tadi dikatakan bahwa ‘retina’ dari satu ommatidium terbuat dari sekitar enam fotosel. Pada mata aposisi yang biasa, nyala dari keenam fotosel ini semata-mata ditambahkan – itu alasan saya menulis ‘retina’ dalam tanda kutip: Semua foton yang melewati pipanya dihitung, terlepas dari fotosel yang ditimpanya. Satu-satunya tujuan mengadakan beberapa fotosel adalah meningkatkan sensitivitas total terhadap cahaya. Inilah mengapa tidak apa-apa kalau citra mungil di dasar sebuah ommatidium aposisi secara teknis terbalik.

Namun, pada mata seekor lalat, luaran dari keenam sel ini tidak dihimpun dengan satu sama lain. Alih-alih, tiap-tiap luaran diikatkan dengan luaran sel-sel tertentu dari ommatidium tetangganya (Gambar 5.27). Agar tidak salah sangka, skala pada gambar ini tidak benar. Oleh karena itu,

Gambar 5.27 Prinsip cerdik mata majemuk 'superposisi terangkai'.



anak-anak panahnya tidak merepresentasikan sinar (yang akan dibengkokkan oleh lensa-lensanya), tetapi pemetaan dari titik-titik pada lumba-lumba ke titik-titik pada dasar pipa-

pipanya. Sekarang, coba perhatikan betapa lihainya mekanisme ini. Ide utamanya adalah bahwa fotosel-fotosel yang melihat ke kepala lumba-lumba pada satu ommatidium digandengkan dengan fotosel-fotosel yang melihat kepala lumba-lumba pada ommatidium-ommatidium jirannya. Fotosel-fotosel yang melihat ekor lumba-lumba pada satu ommatidium dirangkai dengan fotosel-fotosel yang melihat ekor lumba-lumba pada ommatidium-ommatidium jirannya. Dan seterusnya. Alhasil, tiap-tiap potongan lumba-lumba itu dipancarkan oleh sejumlah besar foton, lebih dari yang terdapat pada mata aposisi biasa dengan susunan pipa sederhana. Solusi yang lebih bersifat komputasional daripada optik ini dapat memecahkan masalah cara menambah jumlah foton yang tiba dari tiap titik pada lumba-lumbanya.

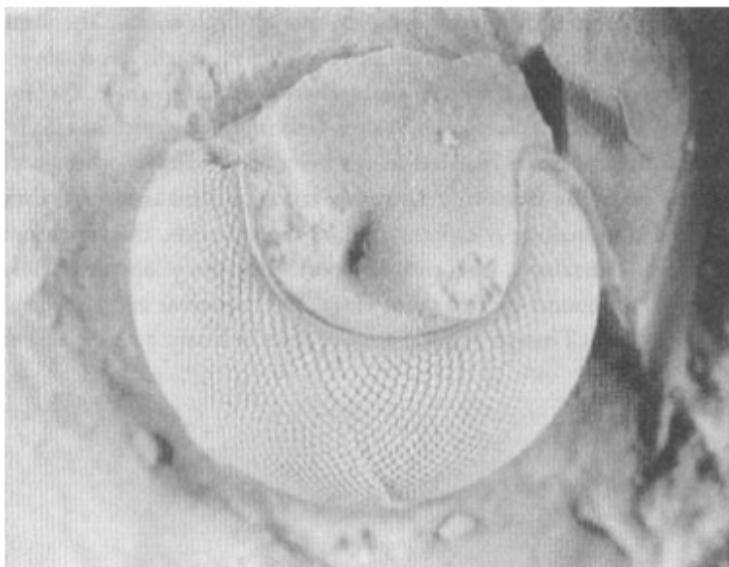
Jelaslah alasan cara ini disebut superposisi, sekalipun tidak memenuhi definisi ketatnya. Pada superposisi yang sesungguhnya, dengan lensa atau cermin pelengkap, cahaya yang masuk melalui corong-corong sekitar disusun lapis sehingga foton-foton dari kepala lumba-lumba tiba di tempat yang sama dengan foton-foton lain dari kepala lumba-lumba; foton-foton dari ekor tiba di tempat yang sama dengan foton-foton lain dari ekornya. Pada superposisi neural, foton-fotonnya masih tiba di tempat yang berbeda-beda, seperti pada mata majemuk. Namun, sinyal dari foton-foton ini berakhir di tempat yang sama karena saraf-sarafnya dianyam dan diulur dengan lihai menuju otak.

Pasti belum lupa, estimasi Nilsson untuk laju evolusi mata kamera terbilang instan menurut standar-standar geologis. Mujur kalau bisa menemukan fosil-fosil yang mencatat tahap-tahap peralihannya. Estimasi persis untuk mata majemuk atau

desain-desain mata yang lain belum pernah dihitung, tetapi saya ragu kalau lajunya jauh lebih lambat. Lazimnya, kita tidak menduga bisa melihat detail-detail mata pada fosil karena organ ini terlalu lunak untuk dapat memfosil. Kecuali mata-mata majemuk, karena sebagian besar detailnya terungkap dalam jajaran elegan corong-corong yang lumayan keras pada permukaan luarnya. Gambar 5.28 menunjukkan mata seekor serangga purba trilobit, dari era Devon, hampir 400 juta tahun silam. Penampakannya persis seperti mata majemuk modern yang sudah maju. Itulah kiranya yang terjadi bila waktu yang dibutuhkan mata untuk berevolusi terbilang sekelebat, dari perspektif standar-standar geologis.

Pesan utama dari bab ini adalah bahwa mata berevolusi dengan mudah dan cepat, dalam sekejap. Bab ini saya buka dengan mengutip kesimpulan dari seorang tokoh otoritatif: bahwa mata telah berevolusi secara independen sekurang-kurangnya empat puluh kali di berbagai wilayah kingdom animalia. Sekilas, pesan ini tampak bertentangan dengan serangkaian hasil eksperimen menarik, yang belum lama ini dilaporkan oleh tim peneliti laboratorium di Swiss pimpinan Profesor Walter Gehring. Dengan singkat akan saya jelaskan temuan mereka dan mengapa temuan tersebut sebetulnya tidak bertentangan dengan kesimpulan dari bab ini. Sebelumnya, saya perlu meminta maaf atas tradisi menjengkelkan yang diterapkan oleh para genetikawan dalam menamai gen-gen. Gen yang disebut *eyeless* (tanpa mata) pada lalat buah *Drosophila* justru fungsinya membuat mata! (Aneh, ‘kan?) Alasan untuk sungsang istilah yang membingungkan dan hantam kromo ini sebetulnya cukup sederhana dan, bahkan, lumayan menarik. Kita mengetahui



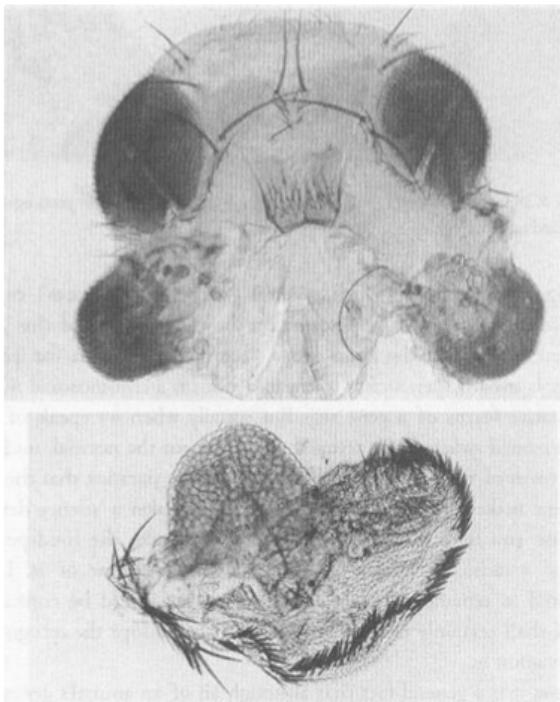


Gambar 5.28 Mata majemuk sudah sangat maju 400 juta tahun yang lalu: mata trilobit yang memfosil.

fungsi sebuah gen dengan memperhatikan apa yang terjadi jika gen itu menyalah. Ada gen yang, bila menyalah (bermutasi), menyebabkan lalat tidak bermata. Posisi gen ini pada kromosom, karenanya, dinamai lokus *eyeless* ('locus' adalah bahasa Latin untuk tempat dan oleh genetikawan dijadikan nama untuk slot pada kromosom, tempat bentuk-bentuk alternatif dari sebuah gen berada). Tapi biasanya, saat membahas lokus yang bernama *eyeless*, yang sebetulnya dimaksud adalah bentuk normal dan sempurna dari gen di lokus tersebut. Dari situlah timbul paradoks gen *eyeless* membuat mata. Ibarat menyebut sebuah pelantang suara dengan istilah 'peranti hening' karena diketahui bahwa, bila pelantang suara itu dicabut dari radio, radionya hening. Saya

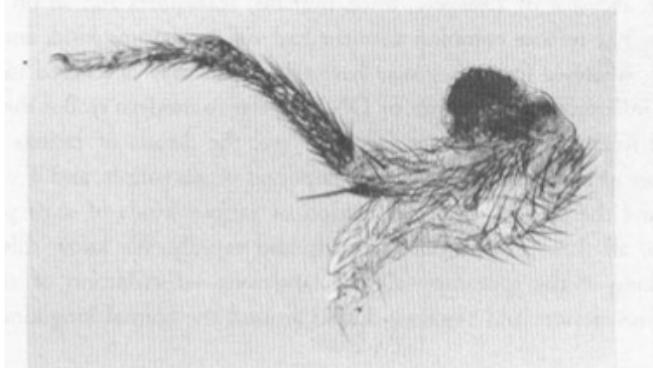
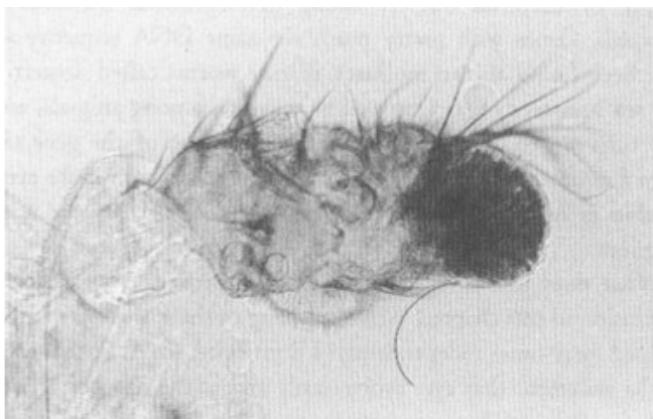
ogah memakai istilah itu. Ingin rasanya menamai ulang gen ini jadi *eyemaker* (pembuat mata), tetapi nanti sama saja rancunya. Yang jelas, saya tidak akan menyebutnya *eyeless*. Maka, saya pakai saja singkatan lazimnya *ey*.

Adalah fakta umum bahwa, meski semua gen seekor hewan ada pada semua selnya, hanya segelintir saja yang benar-benar diaktifkan atau 'diekspresikan' pada bagian tubuh tertentu. Itulah alasan organ hati berbeda dari ginjal, sekalipun keduanya mengandung paket lengkap gen yang sa-



Gambar 5.29 Mata ektopik yang diinduksi pada Drosophila; mata di gambar bawah telah diinduksi dengan gen tikus.

ma. Pada hewan *Drosophila* dewasa, *ey* biasanya mengekspresikan dirinya hanya di kepala – dan itu mengapa matanya tumbuh di sana. George Halder, Patrick Callaerts, dan Walter Gehring menemukan sebuah manipulasi eksperimental yang membuat *ey* diekspresikan di bagian-bagian tubuh yang lain. Dengan mengutak-atik larva *Drosophila* menggunakan cara-cara cerdik, mereka berhasil membuat *ey* mengekspresikan diri di antena, sayap, dan kaki. Hebatnya, lalat dewasa hasil rekayasa tersebut tumbuh deng-



an mata majemuk yang terbentuk sempurna pada sayap, kaki, antena, dan di titik-titik lain pada tubuhnya (Gambar 5.29). Walau sedikit lebih kecil dari mata biasa, mata ‘ektopik’ ini adalah mata majemuk yang layak, dengan banyak ommatidium yang terbentuk dengan benar, dan berfungsi pula. Walau kita tidak tahu pasti lalatnya benar-benar melihat sesuatu melalui semua mata itu, minimal rekaman elektrik dari saraf-saraf di dasar jajaran ommatidium tersebut menunjukkan bahwa mereka peka terhadap cahaya. Itu fakta menakjubkan yang pertama. Fakta kedua bahkan lebih menakjubkan lagi. Ada sebuah gen pada tikus yang disebut *small eye* (mata kecil) dan gen pada manusia yang disebut *aniridia*. Keduanya juga dinamai dengan tradisi penamaan sungsang para genetikawan: Kerusakan mutasional pada gen-gen ini berakibat berkurangnya atau hilangnya mata atau bagian-bagian mata. Rebecca Quiring dan Uwe Waldorf, sejawat selaboratorium di Swiss, menemukan bahwa gen-gen mamalia ini hampir identik, dalam urutan-urutan DNA mereka, dengan gen *ey* pada *Drosophila*. Artinya, gen yang sama telah turun dari hewan-hewan leluhur jauh ke hewan-hewan modern, mulai dari mamalia hingga serangga. Selain itu, pada kedua cabang utama kingdom animalia ini, gen tersebut tampaknya berkaitan erat dengan mata. Fakta menakjubkan ketiga hampir terlalu mencengangkan. Halder, Callaerts, dan Gehring berhasil menyuntikkan gen tikus ke dalam embrio-embrio *Drosophila*. Takjub, gen tikus menginduksi mata ektopik pada *Drosophila*. Gambar 5.29 (bawah) menunjukkan mata majemuk kecil yang diinduksi dengan gen padanan *ey* pada tikus di kaki seekor lalat buah. Omong-omong, perhatikan bahwa mata majemuk seranggallah yang diinduksi, bukan mata tikus. Gen tikusnya

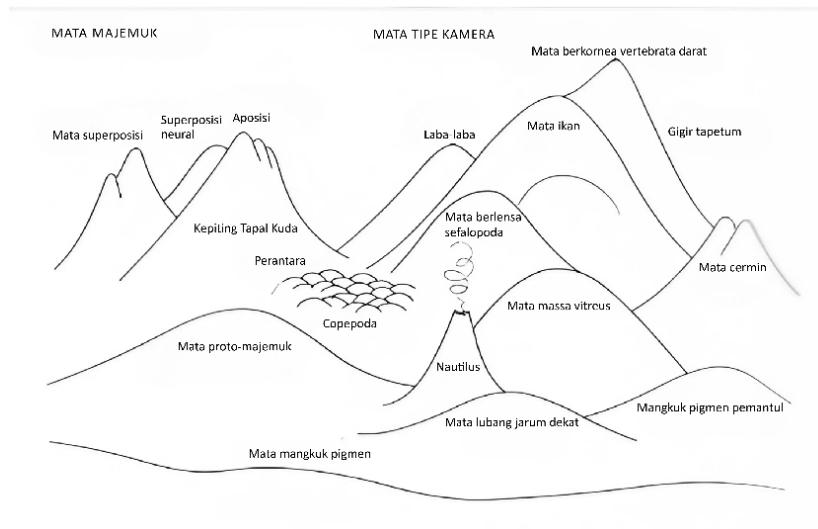
semata-mata mengaktifkan jentera pembuatan mata pada *Drosophila*. Gen-gen dengan urutan DNA yang kurang lebih sama dengan *ey* juga telah ditemukan pada moluska, cacing laut yang bernama *nemertine*, dan *sea-squirt*. *ey* boleh jadi bersifat universal di antara margasatwa dan, mungkin, ternyata adalah kaidah umum bahwa satu versi dari gen tersebut, yang diambil dari donor di satu wilayah kingdom animalia, dapat menginduksi perkembangan mata pada tubuh penerima di wilayah lain yang sangat berjauhan di kingdom animalia.

Lantas apa arti serangkaian eksperimen luar biasa ini bagi kesimpulan kita di bab ini? Salahkah jika tadi kita berpikir mata telah berkembang empat puluh kali secara mandiri? Saya rasa tidak. Minimal, hakikat dari pernyataan bahwa mata berevolusi dengan mudah dan dalam sekejap tetap tak tercederai. Eksperimen-eksperimen ini boleh jadi memang berarti bahwa leluhur bersama *Drosophila*, tikus, manusia, *sea squirt*, dan seterusnya memiliki mata. Leluhur jauh bersama tersebut punya semacam indra penglihatan dan matanya, terlepas dari apa pun bentuknya, kemungkinan berkembang dipengaruhi urutan DNA yang serupa dengan gen *ey* modern. Tapi bentuk aktual dari berbagai jenis mata, detail-detail retina dan lensa atau cermin, pilihan majemuk atau sederhana, dan – jika majemuk – pilihan aposisi atau beragam jenis superposisi, semua ini berevolusi secara independen dan cepat. Kita mengetahuinya dengan melihat distribusi yang sporadis – hampir-hampir plin-plan – dari beragam peranti dan sistem ini, di sekitaran kingdom animalia. Singkatnya, hewan kerap memiliki mata yang lebih menyerupai sepupunya yang lebih jauh daripada menyerupai sepupunya



yang lebih dekat. Kesimpulan kita tetap tak tergoyahkan oleh demonstrasi bahwa leluhur bersama semua hewan ini kemungkinan memiliki sejenis mata, dan bahwa perkembangan embrionik semua mata kelihatannya cukup serupa hingga dapat diinduksikan dengan urutan DNA yang sama.

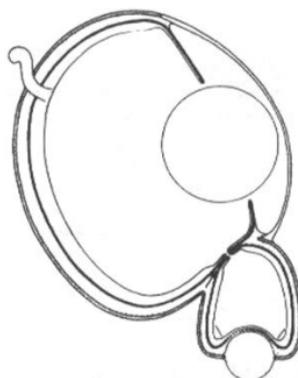
Setelah Michael Land membaca dan memberi masukan kritis untuk draf pertama bab ini, saya mengajaknya untuk mencoba melukiskan ilustrasi visual kawasan mata di Gunung Kemuskilan dan hasil penggambarannya dapat dilihat pada Gambar 5.30. Sudah jadi sifat metafora: bagus untuk tujuan tertentu tetapi tidak untuk tujuan lain. Dan kita harus siap mengubah, atau bahkan meninggalkannya, bilamana perlu.



Gambar 5.30 Kawasan mata di wilayah pegunungan Gunung Kemuskilan: bentang alam Michael Land untuk evolusi mata.

Ini bukan kali pertama pembaca menyadari bahwa Gunung Kemuskilan, meski diberi nama yang berkesan tunggal seperti kawasan puncak Jungfrau, sesungguhnya merupakan wilayah tinggi yang rumit dan berpuncak jamak.

Tokoh otoritatif lain di Ini bukan kali pertama pembaca menyadari bahwa Gunung Kemuskilan, meski diberi nama yang berkesan tunggal seperti bidang mata satwa, Dan Nilsson, yang juga membaca draf bab ini, merangkum pesan intinya dengan mengarahkan perhatian saya ke hal yang barangkali merupakan contoh teraneh dari evolusi *ad hoc* dan oportunistis sebuah mata. Tiga kali, secara independen, di tiga kelompok ikan, telah berevolusi sebuah kondisi yang disebut 'caturmata' (*four-eyed*). Mungkin, *Bathylychnops exilis* (Gambar 5.31) adalah yang paling menakjubkan dari ikan-ikan bermata empat ini. Hewan ini memiliki mata ikan tipikal, yang melihat ke luar ke arah yang biasa. Namun, sebiji mata sekunder telah berevolusi sebagai tambahannya, menyembul



Gambar 5.31 Mata ganda ikan *Bathylychnops exilis* yang mengagumkan.

dari dinding mata utama dan melihat lurus ke bawah. Mana kita tahu apa yang dilihatnya. Barangkali *Bathylychnops* dihantui predator laknat yang biasa menyergapnya dari bawah. Dari sudut pandang kita, hal menariknya adalah yang satu ini. Perkembangan embriologis mata sekunder ini sama sekali lain dari mata utamanya, walau kita dapat menduga bahwa perkembangannya mungkin ternyata diinduksi secara alami oleh sebuah versi dari gen *ey*. Secara khusus, seperti dituangkan Dr. Nilsson dalam suratnya kepada saya, ‘Spesies ini telah menciptakan kembali lensa itu walau sudah punya satu yang lain. Fakta ini adalah bukti yang mendukung pandangan bahwa lensa tidak sulit berevolusi’.

Tak ada yang sulit berevolusi sesulit yang kita, manusia, bayangkan. Darwin berlebihan saat ia dengan susah payah mengakui sulitnya mengevolusikan mata. Dan istrinya berlebihan saat menggarisbawahi kesangsiannya di pinggir halaman. Darwin tahu apa yang dilakukannya. Kaum kreasionis suka sekali kutipan yang saya cantumkan di awal bab ini, tetapi mereka tak pernah menyajikannya dengan utuh. Setelah pengakuan retorisnya itu, Darwin lanjut menulis:

Ketika pertama sekali dikatakan bahwa matahari diam dan dunia ini berputar, akal manusia menyatakan doktrin tersebut palsu; namun, pepatah lama *Vox populi, vox Dei*, sebagaimana setiap filsuf ketahui, usahlah dipercaya dalam ilmu pengetahuan. Nalarnya, jika rangkaian panjang berjenjang dari mata yang tidak sempurna dan sederhana menuju mata yang sempurna dan rumit, yang tiap jenjangnya berguna bagi pemiliknya, dapat dibuktikan ada, seperti yang pasti terjadi; jika selanjutnya mata terus bervariasi sedikit demi sedikit dan variasi-variasi tersebut diwariskan, seperti yang juga pasti terjadi; dan jika variasi-variasi seperti itu senantiasa berguna bagi hewan mana pun dalam

menghadapi berbagai perubahan keadaan hidup, maka keraguan bahwa mata yang sempurna dan rumit dapat terbentuk melalui seleksi alam, meski tak terbayangkan oleh khayalan kita, tidaklah dapat dianggap nyata.

---

\* Setelah menulis ini, saya diberi tahu oleh seorang koresponden, Howard Kleyn, yang pernah bekerja di Cable and Wireless Company, bahwa ternyata manusia sudah membuat produk yang sepadan dengan lensa indeks bertingkat. Produk itu adalah serat optik indeks bertingkat. Menurut uraiannya, begini cara membuatnya. Ambil tabung kopong yang terbuat dari bahan kaca yang baik, dengan panjang sekitar satu meter dan diameter beberapa sentimeter. Panaskan tabung ini. Lalu tiupkan kaca bubuk ke dalam tabung tersebut. Kaca bubuk ini akan meleleh dan menyatu dengan lapisan tabungnya, yang lantas menebal dan mempersempit lubang tabung itu. Nah, di sini trik cerdiknya. Saat prosedur ini berlangsung, bubuk yang dituupkan adalah bubuk kaca dengan kualitas yang bervariasi secara gradual: khususnya, bubuk itu adalah hasil-hasil gilingan kaca dengan indeks refraktif yang meningkat secara progresif. Pada saat lubangnya menyempit hingga tertutup rapat, tabung tersebut telah menjadi batang dengan kaca yang sangat refraktif di pusat intinya dan, seiring menjauh dari bagian inti tersebut, indeks refraktifnya secara gradual menurun. Batang kaca itu kemudian dipanaskan lagi, dan ditarik menjadi filamen (kawat) yang halus. Filamen ini mempertahankan indeks refraktif bertingkat yang sama, dari inti ke tepi, dalam versi miniaturnya, dengan batang kaca itu. Secara teknis, produk ini lensa indeks bertingkat, meski sangat tipis dan panjang. Karakter lensanya ini digunakan bukan untuk memfokuskan sebuah citra tetapi meningkatkan kualitasnya sebagai pandu cahaya yang tidak membiarkan berkas cahayanya menebar. Beberapa dari filamen-filamen ini biasanya akan digunakan untuk membuat kabel serat optik beruntai jamak.

\*\* Hewan-hewan kecil yang memikat ini, yang biasa menelengkan kepala saat melihat kita sehingga tampak jenaka, menguntit mangsa mereka seperti seekor kucing, lalu melompat secepat kilat dan menerkamnya tanpa aba-aba. Secepat kilat karena mereka melompat dengan memompa cairan secara hidraulik ke dalam kedelapan kakinya secara serentak, agak mirip seperti kita (yang punya organnya) saat menegangkan penis, tetapi bedanya: Tegangnya kaki-kaki hewan ini terjadi seketika, bukan perlahan-lahan.



## BAB 6

### MUSEUM SEMESTA CANGKANG

SELEKSI ALAM ADALAH TEKANAN YANG MENGERAKKAN langkah evolusi di atas lereng-lereng Gunung Kemuskilan. Tekanan adalah metafora yang lumayan baik. Ada istilah ‘tekanan seleksi’, dan tenaganya dalam mendorong satu spesies untuk berevolusi, menanjaki lereng-lereng gunung ini, seolah bisa kita rasakan. Kita berkata, pemangsa memberikan tekanan seleksi yang menggerakkan antelop untuk mengevolusikan kaki-kaki gesitnya. Biarpun demikian, kita tetap mewaspadai maksud sesungguhnya dari perkataan itu: Gen-gen untuk kaki pendek lebih mungkin berakhir di perut pemangsa dan, karenanya, dunia ini makin sepi dari mereka. ‘Tekanan’ dari betina yang pilih-pilih menggerakkan evolusi bulu-bulu meriah pegar jantan. Artinya, gen untuk bulu indah sangat berpeluang menunggangi sel sperma untuk masuk ke dalam tubuh si betina. Namun, kita membayangkannya sebagai ‘tekanan’ yang mendorong para pejantan ke arah keindahan yang lebih menawan. Tentu saja, pemangsa menghadirkan tekanan seleksi ke arah sebaliknya, menuju bulu yang lebih bersahaja, karena pejantan yang molek kiranya menarik mata pemangsa, selain burung betina. Tanpa tekanan dari pemangsa, pegar jantan akan kian cemerlang dan mewah akibat pengaruh tekanan dari betina. Maka, tekanan seleksi dapat mendorong ke arah-arah berlawanan, atau ke arah yang sama, atau bahkan (ahli matematika bisa mencari cara untuk memvisualisasikannya) ke ‘sudut’ mana pun yang relatif terhadap sudut lainnya. Selain itu, tekanan seleksi bisa

‘kuat’ atau ‘lemah’, istilah yang dapat dipahami lewat makna-maknanya dalam bahasa sehari-hari. Jalur pendakian Gunung Kemuskilan yang diambil suatu silsilah akan dipengaruhi oleh berbagai tekanan seleksi, yang mendorong dan menarik ke berbagai arah dan dengan kekuatan bervariasi, yang terkadang saling bekerja sama, terkadang saling berlawanan.

Tetapi tekanan bukanlah akhir dari cerita. Jalur pendakian Gunung Kemuskilan yang dipilih juga akan bergantung pada aneka bentuk lereng-lerengnya. Ada tekanan seleksi, yang mendorong dan menarik ke berbagai arah dan dengan beragam kekuatan, tetapi juga ada rute yang lempang serta tebing yang tak teratas. Tekanan seleksi boleh mendorong sekuatnya ke arah tertentu. Namun, jika arah itu terhalang tebing yang tak terlewati, tak ada puncak untuk dinaiki. Maka, seleksi alam harus punya opsi-opsi alternatif untuk dipilih. Sekuat-kuatnya tekanan seleksi, ia tak bisa berbuat apa-apa tanpa variasi genetik. Perkataan bahwa pemangsa memberikan tekanan seleksi yang memilih antelop yang gesit hanya berarti bahwa pemangsa memakan antelop yang lamban. Tetapi jika tidak ada yang dapat dipilih di antara gen-gen antelop gesit dan antelop lamban – yakni, jika perbedaan soal kecepatan berlari semata-mata ditentukan faktor-faktor lingkungan – urusan evolusi tidak akan terselenggara. Gunung Kemuskilan mungkin tidak menyuguhkan lereng pendakian menuju kecepatan yang lebih baik.

Sekarang, kita masuk ke sebuah ketidakpastian dan spektrum opini di antara para ahli biologi. Di ekstrem yang satu, berdiri kelompok ahli yang merasa bahwa variasi genetik itu sekiranya sudah terberi. Mereka merasa, jika ada tekanan seleksi, akan selalu pula ada cukup variasi genetik untuk

mengakomodasinya. Lintasan suatu silsilah di ruang evolusi, pada praktiknya, akan ditentukan oleh pergumulan di antara tekanan-tekanan seleksi itu sendiri. Di ekstrem yang satu lagi, berdiri kelompok ahli yang merasa variasi genetik yang tersedia adalah faktor penting yang menentukan arah evolusi. Beberapa di antara ahli ini bahkan sampai menganggap peran seleksi alam itu minor dan pembantu saja. Jika perdebatan kedua kalangan ini dikarikaturkan, boleh dibayangkan mereka berselisih paham tentang mengapa babi tidak bersayap. Kalangan ekstrem pro seleksi bilang bahwa babi tak bersayap karena sayap tidak ada manfaatnya bagi hewan ini. Kalangan ekstrem anti seleksi bilang bahwa, boleh jadi, sayap bermanfaat bagi babi, tetapi hewan ini tidak bersayap karena tak pernah ada tonjolan sayap mutan untuk digarap seleksi alam.

Kontroversinya lebih rumit dari itu dan Gunung Kemuskilan, bahkan dalam versinya yang berpuncak jamak, bukan metafora yang cukup berdaya untuk menjelajahinya. Kita butuh metafora baru, dengan imajinasi yang disukai ahli matematika, walau kita tidak akan menggunakan simbol-simbol matematika. Dibanding Gunung Kemuskilan, metafora ini akan menuntut upaya lebih dari kita, tetapi hasilnya sepadan. Di buku *Pembuat Arloji yang Buta* saya mengadakan tamasya singkat ke tempat yang kadang saya namai ‘ruang genetik’, kadang ‘negeri biomorf’, kadang ‘Melacak Jejak di Ruang Satwa’. Belum lama ini, filsuf Daniel Dennet telah masuk lebih jauh ke negeri yang belum ditemukan ini yang, dengan alusi puitis ke Perpustakaan Babel karya Borges, disebutnya Perpustakaan Mendel. Versi saya di bab ini adalah sebuah museum raksasa imajinasi zoologi.



Bayangkan sebuah museum dengan galeri-galeri yang membentang ke segala arah hingga ke cakrawala, dan sejauh mata memandang ke atas dan ke bawah. Di museum ini, diawetkan setiap jenis rupa binatang yang pernah ada, dan setiap jenis yang bisa dibayangkan. Tiap hewan ditempatkan bersebelahan dengan hewan-hewan yang paling menyerupai dirinya. Setiap dimensi di museum itu – artinya, tiap arah bentang sebuah galeri – melambangkan satu dimensi variasi hewan-hewannya. Misalnya, saat berjalan ke utara menyusuri sebuah galeri, Anda mengamati pemanjangan tanduk yang progresif dari spesimen-spesimen di kabinet-kabinetnya. Putar balik ke selatan, tanduk-tanduknya pun memendek. Beloklah ke timur, maka tanduk-tanduknya tetap sama, tetapi ada hal lain yang berubah, misalnya gigi-geligi yang makin tajam. Berjalanlah ke barat dan gigi-giginya makin tumpul. Karena panjang tanduk dan ketajaman gigi hanyalah dua dari ribuan cara hewan bervariasi, galeri-galeri tersebut mestilah saling bersilangan di ruang multidimensi, tidak hanya di ruang tiga dimensi biasa yang mampu dibayangkan oleh kita, yang akalnya terbatas ini. Inilah maksudnya saat tadi saya berkata kita harus belajar berpikir layaknya seorang matematikawan.

Apa artinya berpikir dalam empat dimensi? Misalkan hewan yang akan kita tangani adalah antelop dan variabel yang diukur ada empat: panjang tanduk, ketajaman gigi, panjang usus, dan ketebalan bulu. Jika kita abaikan salah satu dimensinya, misalnya ketebalan bulu, tiap-tiap antelop itu dapat ditaruh pada tempatnya yang benar di sebuah bagan tiga dimensi (kubus) dengan tiga variabel sisanya, yaitu panjang tanduk, ketajaman gigi, dan panjang usus. Nah, bagaimana kita menyisipkan dimensi keempatnya, ketebalan

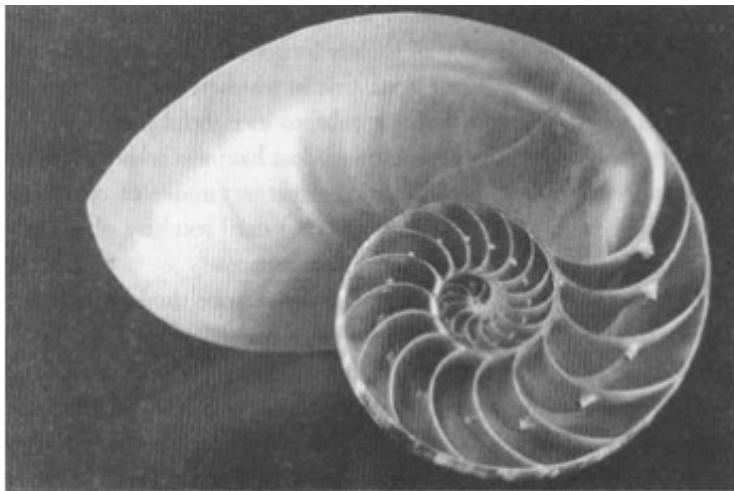
bulu? Kita kerjakan dahulu kubus untuk semua antelop berbulu pendek, lalu kita buat kubus lain untuk semua antelop berbulu sedikit lebih panjang, dan seterusnya. Seekor antelop akan ditempatkan, pertama-tama, di kubus mana pun yang berkenaan dengan panjang bulunya. Kemudian, di dalam kubus tersebut, antelop tadi ditempatkan pada posisi yang ditentukan oleh tanduk, gigi, dan ususnya. Ketebalan bulu adalah dimensi keempat. Pada prinsipnya, kita bisa lanjut membangun keluarga kubus, dan kubusnya kubus, dan kubusnya kubusnya kubus hingga semua hewan ditaruh di ruang yang sepadan dengan ruang multidimensi.

Untuk bisa sedikit membayangkan mekanisme Museum Hewan Segala Rupa, bab ini akan menangani satu kasus khusus yang kurang lebih dapat dibatasi ke tiga dimensi. Di bab berikutnya, saya akan menilik kembali kontroversi yang membuka bab ini dan mencoba mengajukan sebuah tawaran konstruktif ke kubu seberang (karena saya memang bukan pihak netral). Kasus khusus tiga dimensi bab ini adalah kasus cangkang siput dan cangkang melingkar lainnya. Alasan galeri-galeri cangkang dapat dibatasi ke tiga dimensi adalah karena variasi terpenting di antara semua cangkang dapat diungkapkan sebagai perubahan pada tiga jenis bilangan saja. Pada uraian selanjutnya, saya akan mengikuti jejak langkah David Raup, seorang ahli paleontologi terkenal dari Universitas Chicago. Raup diinspirasi oleh D'Arcy Wentworth Thompson, dari perguruan tinggi tertua dan terhormat di Skotlandia, Universitas St. Andrews, yang bukunya, *On Growth and Form* (terbit pertama kali tahun 1919), telah memberikan pengaruh yang signifikan – kalau bukan dominan – kepada para ahli zoologi di sebagian besar kurun abad ke-20.

Wafatnya D'Arcy Thompson tepat sebelum era komputer adalah salah satu dari tragedi-tragedi kecil di dunia biologi, karena segudang wacana di hampir setiap halaman buku hebatnya itu perlu digarap dengan komputer. Raup mengembangkan program komputer untuk menghasilkan rupa cangkang, dan saya membuat program serupa untuk menghasilkan ilustrasi di bab ini walaupun – seperti bisa diduga – saya memadukan program itu ke dalam sebuah program seleksi buatan ala Blind Watchmaker.

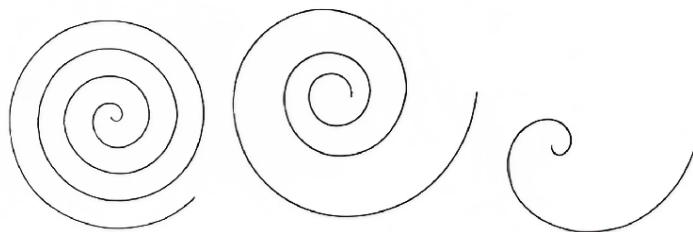
Cangkang siput dan hewan moluska lainnya, serta cangkang makhluk yang disebut brakiopoda, yang tidak berkaitan tetapi sepintas mirip dengan moluska, semuanya tumbuh dengan cara yang sama, yang berbeda dari cara tumbuh kita. Kita bermula dari kecil lalu tumbuh menyeluruh (dengan beberapa bagian tubuh tumbuh lebih cepat dari yang lain). Kita tidak bisa membedah manusia dan mengambil bagian tubuhnya yang masih sama seperti saat ia bayi dulu. Terhadap cangkang moluska, kita bisa melakukan itu. Cangkang moluska bermula dari kecil dan tumbuh pada tepi-tepiinya. Jadi, bagian paling dalam dari lilitan yang sudah dewasa adalah cangkang bayinya. Tiap hewan moluska membawa rupa cangkang bayinya sendiri, yang merupakan bagian tersempit dari cangkang dewasanya. Cangkang *Nautilus* (yang mata lubang jarumnya telah kita bahas) terbagi ke dalam beberapa bilik apung berisi udara, semuanya kecuali bilik terbesar dan terbaru pada margin pertumbuhannya, bilik yang ditinggali hewan itu sendiri (Gambar 6.1).

Karena metode ekspansi dari garis tepi ini, semua cangkang memiliki bentuk umum yang sama, yaitu versi padat dari spiral yang disebut spiral logaritmik atau ekuiangular (sama sudut).



Gambar 6.1 Irisan lintang cangkang *Nautilus*. Hewannya sendiri tinggal di bilik terbesar dan terbaru.

Spiral logaritmik berbeda dari spiral Archimedes, yang biasa dibuat seorang kelasi saat melilit tali di dek kapal. Berapa kali pun tali diputar, tiap putaran beruntunnya memiliki lebar yang sama – sesuai ketebalan talinya. Spiral logaritmik, bedanya,



a. Spiral archimedes

b. Spiral logaritmik.  
Membuka perlahan

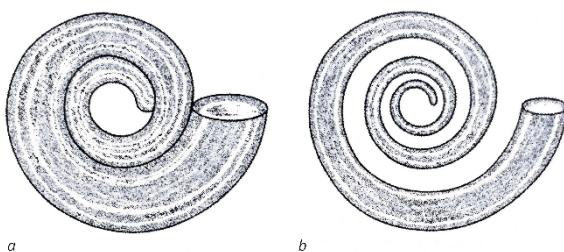
c. Spiral logaritmik.  
Membuka cepat

Gambar 6.2 Jenis-jenis spiral: (a) spiral Archimedes; (b) spiral logaritmik dengan laju bukaan lambat; (c) spiral logaritmik dengan laju bukaan cepat.



melebar seiring menjauh dari pusat. Beda spiral beda pula laju bukaannya, tetapi laju untuk tiap spiral tertentu selalu sama. Gambar 6.2 menunjukkan, selain spiral tali terlilit Archimedes, dua spiral logaritmik yang berbeda laju bukaannya.

Cangkang tumbuh tidak dalam bentuk garis, tetapi tabung. Tabung ini tidak harus sirkular jika dilihat dari perspektif tampang lintang – seperti trompet *French horn*. Namun, sementara ini kita akan asumsikan saja tabungnya sirkular. Kita juga akan mengasumsikan bahwa spiral yang tergambar nanti mewakili margin luar tabungnya. Diameter tabungnya bisa saja membesar dengan laju yang tepat sehingga margin dalamnya menempel pas ke dinding ulir yang sebelumnya, seperti pada Gambar 6.3a. Tetapi tidak harus begitu. Jika diameter tabung membesar lebih lambat dari margin luar spiralnya, akan tercipta jarak yang makin lama yang makin lebar di antara tiap ulir beruntunnya, seperti pada Gambar 6.3b. Makin ‘renggang’ cangkangnya, makin tampak lebih cocok untuk cacing daripada untuk siput.



Gambar 6.3 Dua tabung dengan spiral yang sama tetapi berbeda ukuran tabung: (a) tabung yang cukup besar untuk mengisi celah di antara tiap ulir beruntun spiralnya; (b) tabung yang cukup kecil untuk meninggalkan celah sempit (zona terbuka) di antara tiap ulir beruntun spiralnya.

Raup mendeskripsikan spiral-spiral cangkang menggunakan tiga bilangan, yang ia sebut *W*, *D*, dan *T*. Semoga saya tidak disangka terlalu kuno karena menamai ulang label-label tersebut jadi *flare* ('rentang'), *verm* ('busung'), dan *spire* ('rabung'). Daripada menggunakan huruf-huruf matematika, lebih mudah mengingat mana yang mana dengan nama-nama itu. *Rentang* adalah ukuran laju ekspansi spiral. Jika nilai *rentang* 2, itu berarti untuk setiap putaran genapnya, spiral membuka dua kali lebih lebar dari ukuran sebelumnya. Itulah yang terjadi pada Gambar 6.2b. Pada setiap putaran di Gambar 6.2b, lebar spiralnya dua kali lipat. Gambar 6.2c, yang menunjukkan cangkang yang jauh lebih terbuka, bernilai *rentang* 10. Untuk setiap putaran genap di spiral ini, lebarnya naik sepuluh kali (walau nyatanya spiral ini berakhir sebelum sempat membentuk satu putaran utuh). Hewan seperti remis, yang cangkangnya membuka begitu cepat sampai-sampai tidak kita sangka kalau ia mengumpar, memiliki nilai *rentang* hingga ribuan.

Saat menjelaskan nilai *rentang*, saya tadi berhati-hati agar tidak sampai mengatakan bahwa variabel ini mengukur laju pembesaran diameter tabung. Di titik inilah masuk bilangan kedua, *busung*. Kita butuh nilai *busung* karena tabungnya tidak selalu mengisi, dengan pas, ruang yang dibuka oleh spiral yang melebar itu. Cangkangnya bisa 'renggang', seperti pada Gambar 6.3b. Kata *busung* mengacu pada diameter badan tabung, yang bisa gempal bisa ceking. Gambar 6.3a dan Gambar 6.3b bernilai *rentang* identik (2) tetapi Gambar 6.3b bernilai *busung* lebih tinggi (0,7) dari Gambar 6.3a (0,5). Nilai *busung* 0,7 berarti jarak dari pusat spiral ke margin dalam tabungnya adalah 70 persen dari jarak dari pusat spiral ke

margin luar tabungnya. Mana pun bagian tabung yang dipakai untuk mengukur, skor *busung*-nya sama. (Memang tidak selalu benar secara logika tetapi tampaknya kerap benar pada cangkang-cangkang sungguhan. Maka, kita akan mengasumsikannya, kecuali dinyatakan lain.) Mudah dipahami bahwa nilai *busung* yang sangat tinggi, seperti 0,99, akan membuat tabung yang sangat ceking dan kerempeng, karena margin dalam tabung itu 99 persen dari jarak ke margin luarnya.

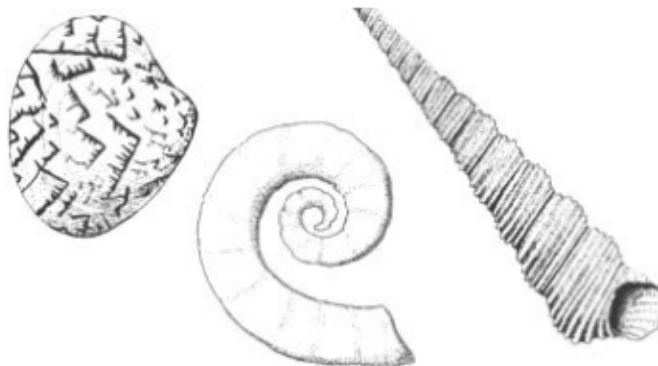
Berapa nilai *busung* yang dibutuhkan agar ekspansinya pas nyaman seperti Gambar 6.3a? Tergantung pada *rentangnya*. Lebih tepatnya, nilai *busung* kritis untuk kondisi pas adalah timbal-balik dari nilai *rentang* (yaitu, satu per nilai *rentang*). Nilai *rentang* kedua cangkang di Gambar 6.3 adalah 2. Maka, nilai kritis *busung* untuk kondisi pasnya adalah 0,5 (nilai *busung* untuk cangkang di Gambar 6.3a). Cangkang pada Gambar 6.3b bernilai *busung* yang lebih tinggi dari nilai 'kritis pas' – dan itulah alasan cangkangnya tampak rumpang. Jika cangkang seperti Gambar 6.2c diberi nilai *rentang* 10, skor kritis pas *busung*-nya adalah 0,1.

Bagaimana kalau nilai *busung* lebih kecil dari nilai kritis pas? Bisakah kita bayangkan tabung kegempalannya sampai melampaui titik pas dan melanggar batas teritori ulir sebelumnya – contoh, spiral seperti pada Gambar 6.3 tetapi dengan nilai *busung*, misalnya, 0,4? Ada dua cara untuk memecahkan masalah benturan ini. Cara pertama, biarkan tabung memagari ulir-ulirnya yang lebih dulu. *Nautilus* menggunakan cara ini. Artinya, bentuk tampang lintang dari tabung yang ada tak lagi bisa berupa lingkaran biasa, tetapi lingkaran yang sudah 'tercuil'. Tapi ini bukan bencana karena,

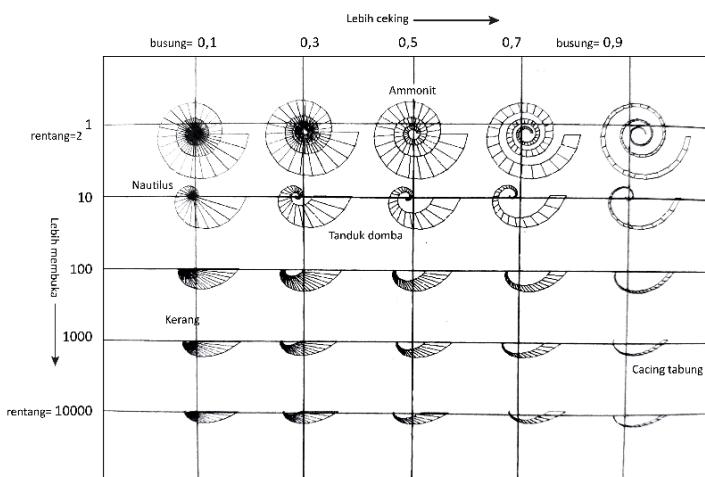
kalau masih ingat, asumsi bahwa tabungnya bertampang sirkular adalah asumsi yang manasuka. Banyak hewan moluska yang hidup bahagia di tabung dengan tampang yang jauh dari bentuk lingkaran, dan kita akan membahasnya nanti. Di beberapa kasus, cara terbaik menafsirkan bentuk nonsirkular dari tampang lintang tabung itu adalah sebagai cara mengakomodasi ulir-ulir tabung yang sebelumnya.

Cara lain untuk mengatasi potensi masalah pelanggaran batas teritori ulir tabung sebelumnya adalah dengan keluar dari bidang datarnya. Di titik inilah muncul bilangan khas ketiga kita, *rabung*. Bayangkan spiralnya meluas sambil bergeser ke samping, membuat bentuk kerucut seperti pucuk. Bilangan khas cangkang ketiga ini, *rabung*, adalah laju rangkak ulir-ulir beruntun螺旋nya menyusuri panjang kerucutnya. *Nautilus* kebetulan memiliki nilai *rabung* 0: Semua lilitan beruntunnya berada di satu bidang datar.

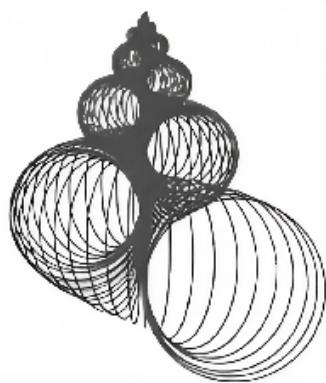
Nah, sudah ada tiga bilangan khas cangkang, *rentang*, *busung*, dan *rabung* (Gambar 6.4). Jika kita abaikan salah satunya, misalnya *rabung*, kita dapat menyusun bagan dari dua lainnya di atas sehelai kertas. Tiap titik pada bagan tersebut memiliki kombinasi nilai *rentang* dan *busung* yang unik, dan kita dapat memprogram komputer untuk menggambar, di titik itu, cangkang yang akan dihasilkan. Gambar 6.5 menunjukkan dua puluh lima titik yang ditempatkan dengan jarak beraturan pada bagannya. Bergerak dari kiri ke kanan bagan, cangkang-cangkang komputernya akan makin ‘ceking’ seiring meningkatnya nilai *busung*. Bergeser dari atas ke bawah, nilai *rentang* meningkat. Spiral-spiralnya pun jadi makin terbuka hingga tidak kelihatan seperti spiral sama sekali. Untuk mendapatkan sebaran yang baik saat kita bergerak turun, kita



Gambar 6.4 Cangkang untuk mengilustrasikan skor *rentang*, *busung*, dan *rabung*: (a) *rentang* tinggi: *Liconcha castrensis*, moluska bivalvia; (b) skor *busung* tinggi: *Spirula*; (c) skor *rabung* tinggi: *Turritella terebra*.



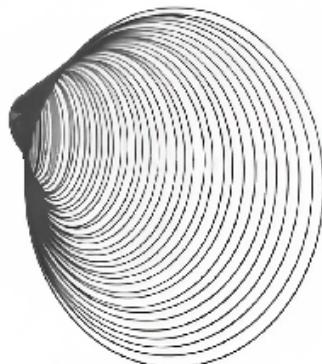
Gambar 6.5 Tabel cangkang-cangkang buatan komputer dengan variasi *busung* dan *rentang* yang sistematis. Perubahan di dimensi ketiga, *rabung*, tidak tampak di sini. Sumbu *rentang* (vertikal) bersifat logaritmik – tiap satu langkah turun sama dengan nilai *rentang* dikali sepuluh. Pada sumbu *busung* (horizontal), tiap langkah ke samping kanan mewakili skor ‘kecekingan’ dengan faktor penambah tetap. Beberapa nama hewan sungguhan dicantumkan di tempat yang kira-kira tepat pada bagannya.



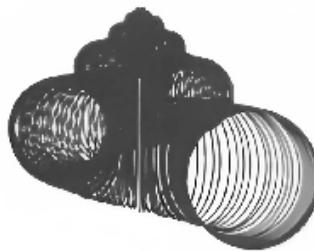
rentang=2, busung=0, rabung=3



rentang=1,3, busung=0, rabung=8,2



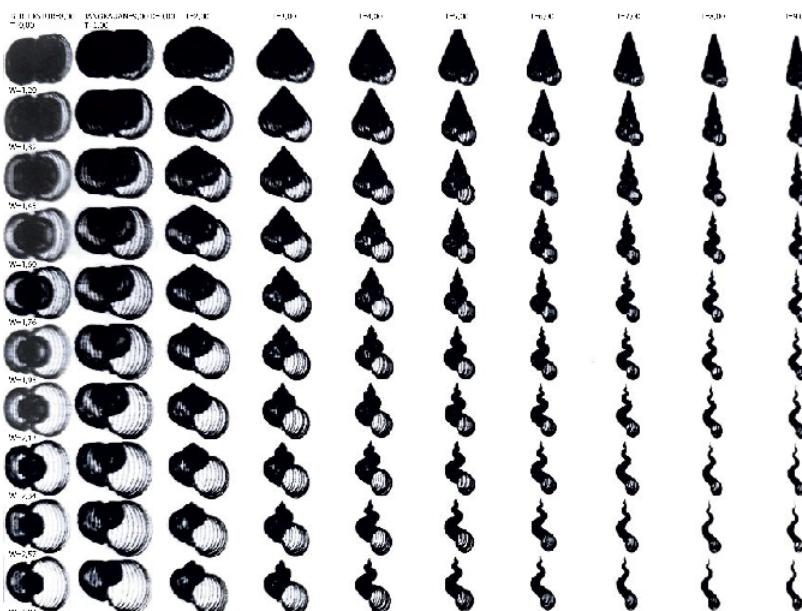
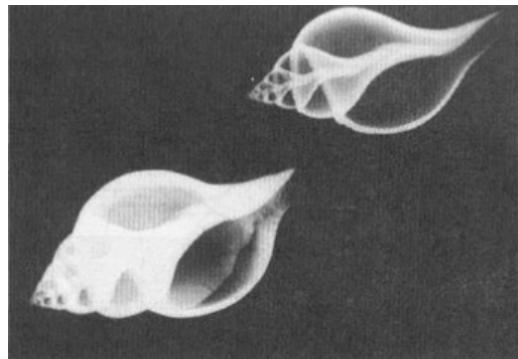
rentang=1000, busung=0, rabung=0,5



rentang=2, busung=0,25, rabung=1,5

Gambar 6.6 Empat cangkang komputer dalam tampilan 'sinar X', untuk menunjukkan nilai *rentang*, *busung*, dan *rabung* yang berbeda-beda.

Gambar 6.7  
Foto cangkang  
sungguhan  
dalam tampilan  
sinar X.



Gambar 6.8 Bagan cangkang komputer (tampilan sinar X) dengan sumbu *rentang* (berlabel W, menurun) dan sumbu *rabung* (berlabel T, mendatar).

Seperti Gambar 6.5, skala *rentang*-nya logaritmik, tetapi di sini *rentang* dibatasi dengan nilai-nilai rendah – semua cangkangnya tidak membuka amat lebar.

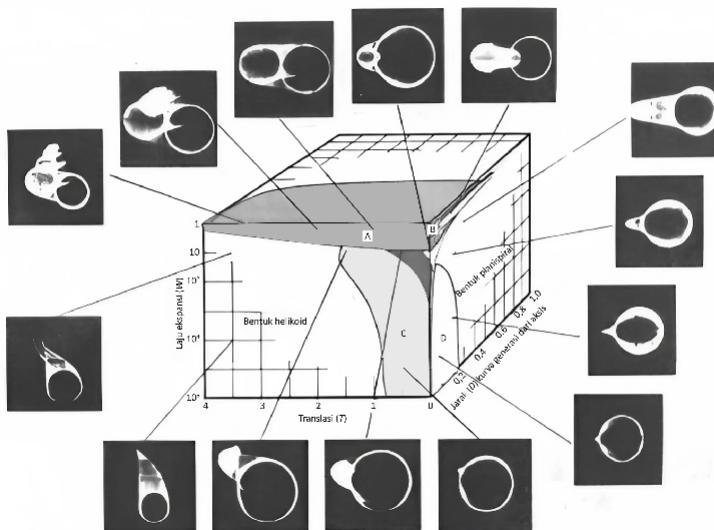
naikkan nilai *rentang* secara logaritmik. Artinya, tiap turun selangkah nilainya adalah hasil perkalian bilangan *rentang* dengan bilangan tertentu (dalam contoh ini, sepuluh) – bukan, seperti halnya bagan biasa dan seperti dalam gerak maju skor *busung* ke samping, dengan menambahkan bilangan baru. Skema ini perlu agar kita bisa mengakomodasi cangkang seperti remis dan kerang di bagian kiri bawah gambar (yang nilai *rentang*-nya hingga ribuan – artinya, perubahan kecil tak berpengaruh signifikan) sebagian dengan ammonit dan siput (yang biasanya memiliki skor *rentang* rendah dan satu digit – artinya, perubahan kecil berpengaruh signifikan). Di berbagai bagian bagan tersebut, kita dapat melihat bentuk-bentuk yang menyerupai ammonit, *Nautilus*, kerang, tanduk domba, dan cacing tabung. Saya pun telah menuliskan label-labelnya di tempat yang kira-kira tepat.

Program komputer saya dapat menggambar cangkang dalam dua tampilan. Gambar 6.5 menunjukkan tampilan yang satu, yang menekankan bentuk spiralnya itu sendiri. Gambar 6.6 menunjukkan tampilan yang lain, tampang lintang ‘sinar X’ yang memberi kesan bentuk padat cangkang-cangkangnya. Gambar 6.7 adalah foto sinar X dari cangkang-cangkang sungguhan untuk menjelaskan sifat tampilan ini. Keempat cangkang pada Gambar 6.6 adalah cangkang-cangkang komputer yang dipilih, seperti cangkang sungguhan Gambar 6.4, untuk mengilustrasikan nilai *rentang*, *busung*, dan *rabung* yang berbeda-beda.

Gambar 6.8 adalah bagan yang mirip dengan Gambar 6.5. Bedanya hanya bahwa cangkang-cangkang komputer itu ditunjukkan dalam tampilan sinar X, dan sumbu-sumbunya *rentang* dan *rabung*, bukan *rentang* dan *busung*.

Bagan dengan sumbu *busung* dan *rabung* tentu juga dapat dibuat, tetapi saya tidak akan melakukannya di sini. Saya justru akan langsung menghadirkan kubus terkenal Raup (Gambar 6.9). Karena cukup tiga bilangan untuk mendefinisikan sebuah cangkang (dengan mengesampingkan persoalan bentuk tampang lintang tabungnya), tiap cangkang dapat ditaruh pada tempat uniknya sendiri di sebuah kotak tiga dimensi. Museum Cangkang Segala Rupa, tidak seperti, misalnya, Museum Tulang Panggul Segala Rupa, adalah blok menara yang sederhana. Satu dimensi berkaitan dengan tiap-tiap dari ketiga bilangan khas cangkang. Berdirilah di Museum Cangkang Segala Rupa dan berjalanlah, misalnya, ke utara, yang akan kita jadikan dimensi *busung*. Berjalan menyusuri galeri itu, cangkang-cangkang yang kita lewati, dengan pelan tapi pasti, menjadi kian ‘ceking’, sementara semua ciri lainnya tetap. Jika, di titik mana pun, kita belok kiri dan berjalan ke barat, cangkang-cangkang yang kita lewati makin lama makin kerucut (nilai *rabung*-nya meningkat), sementara semua ciri lainnya tetap. Akhirnya, jika, di titik mana pun, kita berhenti bergerak entah ke barat/timur entah ke utara/selatan dan turun – ke dimensi *rentang* – kita akan menjumpai cangkang-cangkang yang membuka makin lebar. Kita dapat beralih dari satu cangkang ke cangkang lain mana pun dengan menyusuri liang-liang di kubus itu pada sudut tertentu, dan kita akan melewati serangkaian sinambung cangkang-cangkang perantara di sepanjang liangnya. Gambar 6.5 dan 6.8 dapat dibayangkan sebagai dua sisi luar kubus Raup. Di atas kertas dua dimensi kita dapat mencetak irisan mana pun, pada sudut mana pun, melalui kubusnya.

Raup mengembangkan program asli yang menginspirasi pro-



Gambar 6.9 Kubus Raup. David M. Raup menggambar sebuah bagan tiga dimensi nilai rentang (yang disebutnya W, menurun dari atas ke bawah), terhadap *rabung* (yang disebutnya T, mendatar dari kanan ke kiri), terhadap *busung* (yang disebutnya D, menyerong dari depan ke belakang). 'Tampilan-tampilan sinar X' dari sampel-sampel cangkang komputer ditempatkan di titik-titik strategis kubus itu. Area kubus tempat cangkang sungguhan dapat ditemukan adalah area yang diarsir. Area yang tidak diarsir mewadahi cangkang-cangkang yang secara teoretis bisa mengada, tetapi tidak benar-benar ada.

gram komputer asli yang menginspirasi program saya. Pada diagram yang diterbitkannya, alih-alih berusaha menggambar semua cangkang di dalam kubusnya – tugas yang tidak praktis – Raup mengambil sampel untuk titik-titik tertentu. Gambar-gambar di sekeliling tepi Gambar 6.9 mewakili cangkang-cangkang teoretis yang dapat ditemukan pada titik-titik yang ditentukan di ruang tersebut. Sebagian tampak seperti cangkang sungguhan yang dapat dijumpai di pantai. Sebagian lagi tampak sangat asing, tetapi tetap merupakan bagian dari

ruang cangkang komputer segala rupa. Di gambar tersebut, Raup mengarsir area-area tempat cangkang sungguhan dapat ditemukan.

Ammonit, hewan kerabat *Nautilus* yang pernah meramaikan dunia satwa tetapi agaknya menemui akhir nahas yang sama (apa pun itu bentuknya) seperti dinosaurus, memiliki cangkang yang mengumpar tetapi, berbeda dari siput, kumparannya hampir selalu terbatas pada satu bidang datar saja. Nilai *rabung*-nya nol. Demikianlah setidaknya untuk ammonit biasa. Akan tetapi, beberapa di antaranya, seperti genus *Turrilites* dari Zaman Kapur, mengevolusikan nilai *rabung* yang tinggi dan, maka dari itu, menciptakan bentuk siputnya secara mandiri. Mengesampingkan kasus-kasus pengecualian seperti itu, ammonit ditempatkan di sepanjang dinding timur Museum Cangkang (nama-nama seperti timur dan selatan, tentu saja, merupakan label manasuka untuk diagram ini). Lemari-lembari untuk ammonit tipikal tidak menghuni lebih dari paruh selatan dinding timur, dan hanya beberapa lantai tingginya. Siput dan sebangsanya tumpang tindih dengan Koridor Ammonit, tetapi mereka juga menyebar jauh ke barat (dimensi *rabung*) dan membentang sedikit lebih jauh ke arah lantai-lantai bawah blok menara kita. Tetapi sebagian besar lantai bawah – yang laju *rentang*-nya tinggi dan cangkangnya membuka dengan cepat – dikuasai dua kelompok besar makhluk bercangkang ganda. Moluska bivalvia berjejer sedikit ke barat – cangkangnya memuntir sedikit seperti siput tetapi tabungnya membuka dengan sangat cepat sehingga tidak tampak seperti siput. Brakiopoda atau ‘kerang lentera’, yang, seperti telah kita lihat, sama sekali bukan moluska tetapi perawakannya mirip moluska bivalvia,

memiliki ‘kumparan’ yang sepenuhnya berada di satu bidang datar, seperti ammonit. Seperti pada kerang-kerangan bivalvia, tabung-tabung brakiopoda biasanya membuka lebar sebelum sempat membentuk ‘kumparan’ yang layak.

Setiap garis sejarah evolusi melintas melalui Museum Cangkang Segala Rupa dan saya telah merepresentasikan ini dengan memadukan prosedur komputer penggambaran cangkang saya ke program lengkap seleksi buatan Blind Watchmaker.

Saya hanya menghapus embriologi penumbuh pohon dari program Blind Watchmaker dan mengunggah embriologi penumbuh cangkang sebagai gantinya. Program paduan ini disebut Blind Snailmaker (Pembuat Siput yang Buta). Mutasi sepadan dengan perpindahan kecil di museum – ingat bahwa semua cangkang dikelilingi tetangga-tetangga termiripnya. Di program tersebut, tiga bilangan khas cangkang masing-masing diwakili satu lokus gen yang nilai numeriknya dapat bervariasi. Maka, ada tiga golongan mutasi: perubahan kecil pada *rentang*, perubahan kecil pada *busung*, dan perubahan kecil pada *rabung*. Perubahan-perubahan mutasional ini bisa positif atau negatif, dalam batas-batasnya. Gen *rentang* memiliki nilai minimum 1 (nilai yang lebih kecil dari itu menandakan proses pengerdilan bukan pertumbuhan) tanpa nilai maksimum baku. Nilai gen *busung* merupakan sebuah proporsi, bervariasi dari 0 hingga persis di bawah 1 (nilai *busung* 1 mengindikasikan tabung yang amat kurus dan ceking sehingga dapat dianggap tidak ada). Sementara itu, tidak ada batas untuk nilai *rabung*: nilai-nilai negatif sekadar menandakan cangkangnya terbalik. Seperti program Blind Watchmaker yang asli, Blind Snailmaker menyajikan cangkang

induk di tengah layar komputer, dikelilingi kerumunan keturunan aseksualnya – tetangga-tetangga dekatnya yang bermutasi dengan acak di Museum Semesta Cangkang. Pemilih mengeklik *mouse* untuk memilih salah satu cangkang untuk dibiakkan. Cangkang pilihan itu bergeser ke posisi induk di titik tengah, dan layar kembali dikerumuni keturunan-keturunannya. Proses ini berputar terus sepanjang kesabaran pemilihnya. Perlahan-lahan, kita seolah merangkak melalui Museum Cangkang Segala Rupa. Terkadang kita berjalan di tengah-tengah cangkang yang akrab di mata, jenis-jenis yang biasa kita pungut di pantai. Ada kalanya juga, kita tersasar ke luar batas-batas realitas, ke ruang-ruang matematis tempat cangkang yang nyata tak pernah menjelma.

Tadi saya sempat menjelaskan bahwa, kendati segala rupa cangkang dapat digambarkan hanya dengan tiga bilangan, hal itu dilakukan atas dasar sebuah asumsi yang sebetulnya keliru: asumsi simplistik bahwa bentuk tampang lintang tabungnya selalu lingkaran. Tampaknya secara umum benar bahwa, saat tabung merentang, bentuknya tetap sama. Namun, tidak lantas benar bahwa bentuk tersebut selalu lingkaran. Bentuknya bisa oval, dan model komputer saya menyertakan ‘gen’ keempat, yaitu bentuk, yang nilainya adalah tinggi tabung oval dibagi lebarnya. Lingkaran adalah kasus khusus sebuah bentuk dengan skor 1. Penyertaan gen ini ternyata menambah daya model tersebut dalam merepresentasikan cangkang sungguhan. Tetapi masih belum cukup. Banyak cangkang sungguhan memiliki berbagai bentuk tampang lintang yang lebih rumit, tidak melingkar tidak pula oval, dan tidak mendukung deskripsi matematis yang sederhana. Gambar 6.10 menunjukkan berbagai cangkang yang, selain

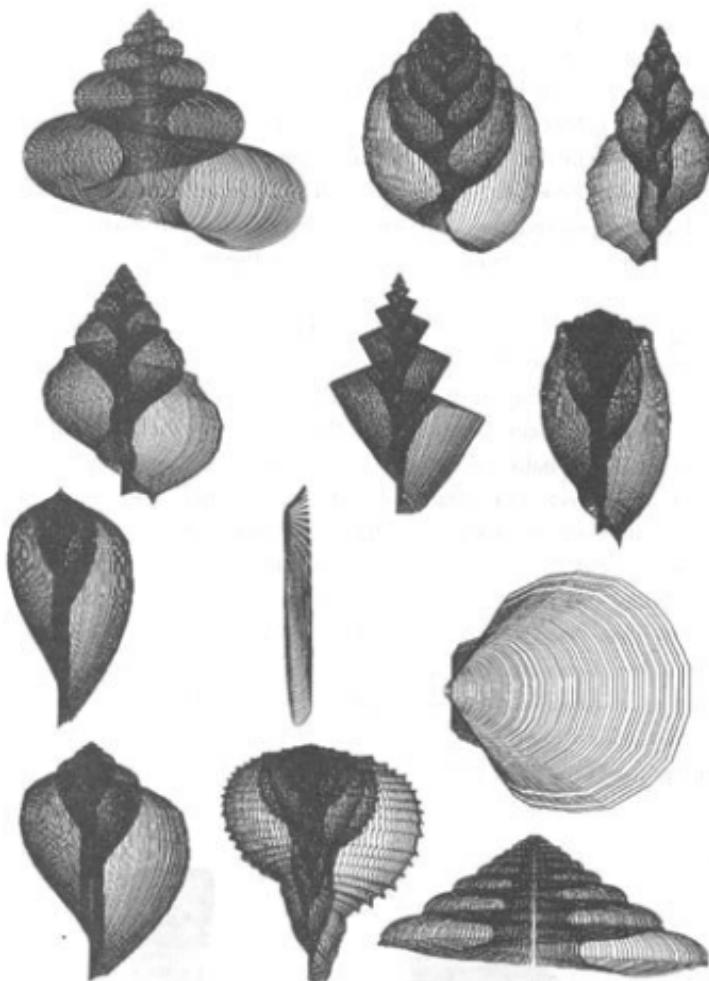


Gambar 6.10 Cangkang-cangkang sungguhan dengan beragam bentuk tampang lintang: (searah jarum jam dari kiri bawah): siput berbintik, *Cominella adspersa*; siput laut kidal, *Neptunia contraria*; kerang ajaib Jepang, *Thatcheria mirabilis*, siput Pulau Masirah, *Acteon eloisae*; siput Rapa, *Rapa rapa*; simping besar, *Pecten maximus*; siput ara, *Ficus gracilis*.

berasal dari berbagai bagian museum kubus kita, tabung dasarnya juga memiliki bentuk tampang lintang yang rumit dan nonsirkular.

Program Blind Snailmaker saya menyertakan variasi tambahan ini dengan kebijakan yang agak kasar: penyediaan repertoar kerangka tampang lintang yang telah digambar sebelumnya. Tiap-tiap kerangka ini kemudian dialihrupakan (dipipihkan secara vertikal atau horizontal) dengan nilai *bentuk* gen yang kiwari (dan dapat bermutasi). Program tersebut lalu menghasilkan sebuah tabung dari kerangka yang dialihrupakan, meluaskannya seolah-olah tabung sirkular. Cara yang lebih baik untuk menangani masalah ini – dan yang agaknya akan saya coba suatu hari nanti – adalah dengan memprogram komputer untuk menyimulasikan proses pertumbuhan aktual yang memvariasikan tepi depan tabung dan, dengan begitu, membentuk tampang lintang hiasan. Akan tetapi, walau masih seadanya, lihatlah ‘kebun binatang’ cangkang komputer yang dihasilkan program yang sekarang, melalui seleksi buatan menggunakan mata manusia (Gambar 6.11). Cangkang-cangkang tersebut dibiakkan berdasarkan kemiripannya dengan cangkang akrab di mata kita. Sebagian di antaranya sekiranya mirip dengan yang ada di Gambar 6.10, sebagian lagi mirip dengan cangkang yang bisa kita temukan saat berjalan-jalan di pantai atau saat menyelam.

Bentuk tampang lintang dari tabungnya dapat dianggap sebagai dimensi (atau seperangkat dimensi) tambahan di Museum Semesta Cangkang. Mengesampingkan hal itu dan kembali ke asumsi simplistik kita tentang tampang lintang sirkular, salah satu keindahan cangkang adalah kemudahan untuk menempatkannya di Museum Segala Rupa yang dapat

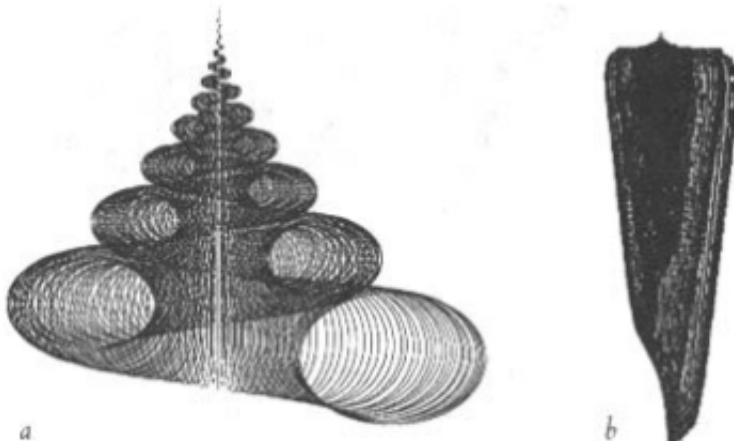


Gambar 6.11 'Kebun binatang' cangkang-cangkang komputer dengan berbagai bentuk tampang lintang yang dibiakkan menggunakan program Blind Snailmaker. Cangkang-cangkang ini dibiakkan melalui seleksi buatan; mata manusia memilihnya atas dasar kemiripan dengan cangkang sungguhan, termasuk beberapa anggota dari ragam yang dilukiskan di Gambar 6.10.

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

kita gambarkan dalam tiga dimensi. Tapi ini tidak berarti bahwa semua wilayah teoretis dari museum itu memang dihuni oleh makhluk hidup sungguhan. Di kehidupan nyata, seperti telah kita lihat, sebagian besar isi blok menara museumnya kosong. Raup mengarsir area-area yang dihuni makhluk hidup sungguhan (Gambar 6.9), dan luasan area itu jauh dari setengah isi kubus. Merentang jauh ke utara dan barat, galeri demi galeri mewadahi cangkang-cangkang khayali yang, menurut model matematis, bisa saja ada tetapi yang sebenarnya tidak pernah dilihat di planet ini. Mengapa tidak? Dan – kepala tanggung – kalau begitu, buat apa cangkang-cangkang yang tak pernah benar-benar ada diwadahi di gedung kubus ini?

Seperti apa kiranya tampilan cangkang kalau tidak pas ditempatkan di blok menara matematis kita? Gambar 6.12a

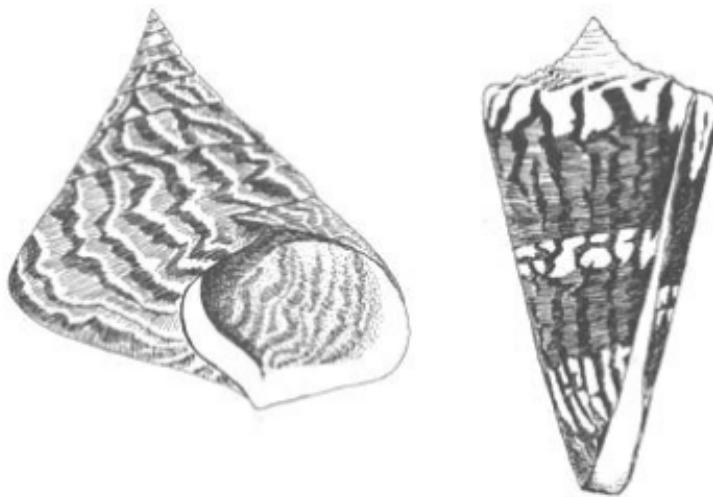


Gambar 6.12 (a) siput komputer dan (b) cangkang kerucut komputer dengan *rabung* runcing yang dihasilkan dengan ‘gradien’ pada gen *rabung*-nya.



menunjukkan siput buatan komputer yang tidak pas. Alih-alih tetap dan baku, nilai *rabung*-nya berubah seiring bertambahnya usia. Bagian-bagian cangkang yang lebih belakangan dan lebar tumbuh dengan nilai *rabung* lebih rendah dari bagian-bagian cangkang yang – dalam proses perkembangannya – lebih dini dan sempit. Itulah mengapa cangkang ini memiliki pucuk lancip yang ‘tidak alami’ dan kemungkinan rapuh. Siput ini siput khayali. Hanya ada di komputer. Cangkang ‘kerucut’ komputer di Gambar 6.12b juga memiliki pucuk yang lancipnya tidak lumrah. Cangkang ini juga digambar oleh program Blind Snailmaker, tetapi dengan nilai *rabung* yang diprogram untuk berkurang, alih-alih tetap, seiring laju perkembangan.

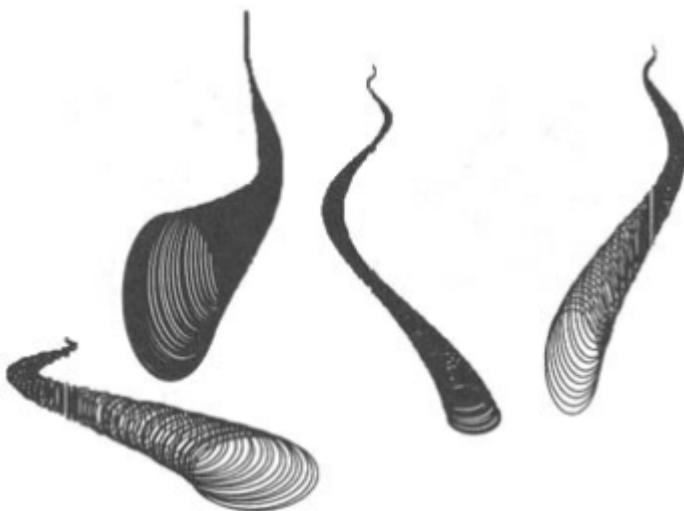
Cangkang-cangkang pada Gambar 6.13 adalah cangkang sungguhan, dan saya menduga mereka pun memiliki gradien *rabung*, yang berarti bahwa mereka mengawali hidup dengan nilai *rabung* tinggi, yang turun perlahan-lahan seiring bertambahnya usia. Menurut Raup, pernah ada beberapa ammonit sungguhan yang mengubah bilangan-bilangan khas cangkangnya seiring usia menua. Boleh dikata, seiring bertambahnya usia, cangkang-cangkang ganjil ini berpindah dari satu bagian museum ke bagian lainnya di dalam gedung museum yang sama. Tetapi juga benar jika dikatakan bahwa, karena tubuh yang remaja adalah bagian dari tubuh yang dewasa, tubuh utuhnya memang tidak dapat diwadahi di satu kabinet saja. Kita boleh bersilang pendapat soal perlu tidaknya menganggap hewan-hewan di Gambar 6.13 benar-benar terbatas pada tiga dimensi dari kotak itu. Geerat Vermeij, salah seorang pakar terkemuka zoologi hewan-hewan bercangkang, yakin bahwa kecenderungan untuk berganti bi-



Gambar 6.13 Cangkang-cangkang sungguhan yang kemiripannya dengan cangkang-cangkang komputer dari gambar sebelumnya menandakan bahwa mereka pun berkembang dengan gradien-gradien *rabung*. Kiri: siput laut *Maurea tigris*; kanan: siput laut *Conus generalis*.

langan khas seiring bertambahnya usia boleh jadi sebetulnya norma, bukan pengecualian. Dengan kata lain, ia yakin bahwa sebagian besar moluska menggeser posisi mereka di museum matematis ini, minimal sedikit, seiring hewan-hewan ini bertambah dewasa.

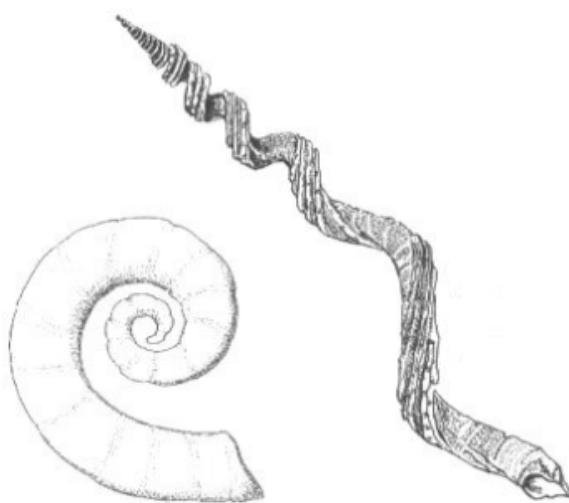
Mari beralih ke pertanyaan yang satu lagi: Mengapa banyak area di museum itu tidak dihuni cangkang sungguhan? Gambar 6.14 menunjukkan sampel cangkang buatan komputer dari pedalaman wilayah ‘terlarang’ museum kita. Beberapa di antaranya mungkin cocok kalau berada di kepala seekor antelop atau bison, tetapi sebagai cangkang moluska, mereka tak pernah ada. Dengan pertanyaan mengapa tak ada



Gambar 6.14 'Cangkang-cangkang' teoretis yang tidak ada – kecuali, mungkin, sebagai tanduk antelop.

cangkang seperti ini, kita kembali ke kontroversi yang mengawali bab ini. Apakah evolusi dibatasi oleh kurangnya variasi yang tersedia, ataukah karena seleksi alam bahkan tidak 'mau' mengunjungi area-area tertentu di museum kita? Raup sendiri menafsirkan area-area kosong ini – zona-zona tidak berarsir dari kubusnya – dengan perspektif pro seleksi. Tidak ada tekanan seleksi terhadap kerang-kerangan untuk berpindah ke area-area yang diwakili oleh celah-celahnya. Atau dengan kata lain, cangkang-cangkang dengan bentuk yang secara teoretis mungkin ini, pada praktiknya, telah menjadi cangkang yang tidak layak huni: mungkin karena lemah dan gampang remuk, atau rapuh, atau boros bahan cangkang.

Ahli-ahli biologi yang lain berpikir bahwa mutasi yang dibutuh-

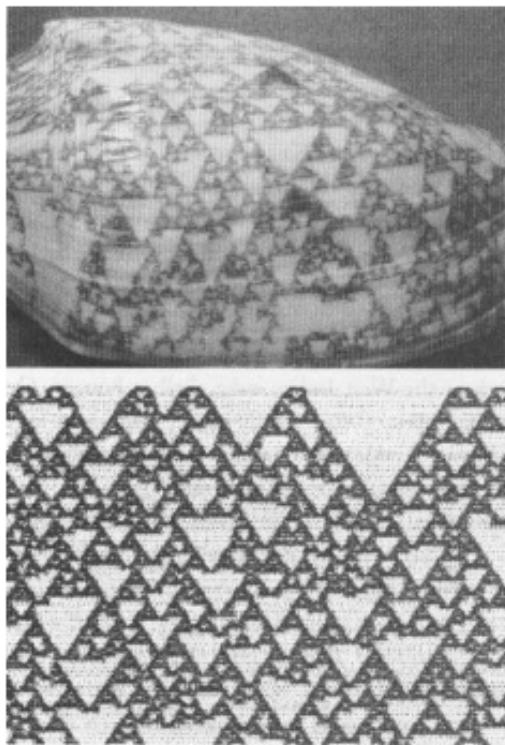


Gambar 6.15 Cangkang-cangkang sungguhan yang keluar dari zona aman, pada area-area tak berpenghuni di Museum Segala Cangkang. Spirula, *Spirula spirula*, dan siput tabung Hindia Barat, *Vermicularia spirata*.

kan untuk berpindah ke area-area museum ini memang tidak pernah ada. Dengan kata lain, pandangan ini menyatakan bahwa blok menara cangkang segala rupa yang telah kita gambar, ternyata, bukan representasi sejati dari ruang segala cangkang yang mungkin ada. Menurut pandangan ini, area-area luas di blok menara tersebut mustahil ada sekalipun didambakan, dari perspektif ketahanan hidup. Naluri saya pribadi mendukung interpretasi pro seleksi Raup, tetapi saya belum ingin menyelidiki lebih jauh perkara ini karena, pada dasarnya, saya mengetengahkan cangkang semata-mata sebagai ilustrasi atas ruang matematis segala hewan yang mungkin ada.

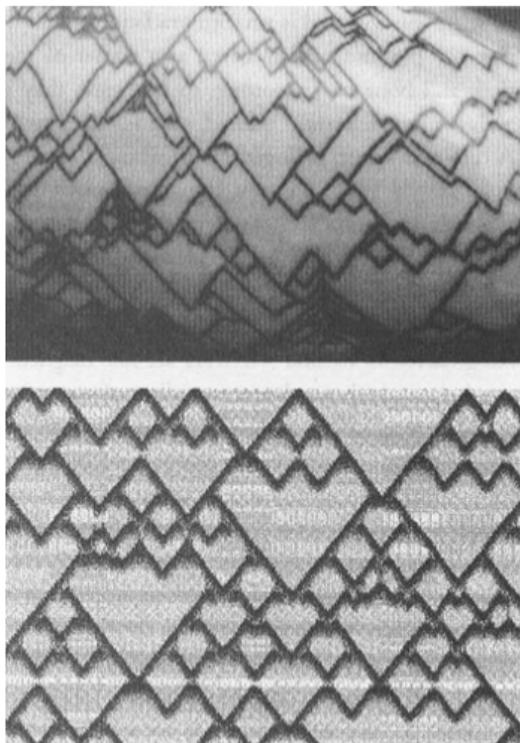
Begitupun, saya tidak boleh meninggalkan area-area ‘terlara-

ng' ini tanpa melihat sejenak beberapa keganjilan yang memang ada di dunia ini. *Spirula* adalah moluska sefalopoda (kelompok hewan yang mencakup cumi-cumi dan ammonit) yang berukuran kecil, hidup berenang, dan berkerabat dengan *Nautilus*. Bentuk membuka lebar dari cangkangnya menandakan nilai *busung* yang tinggi (lebih besar dari  $1/rentang$ ), dan kita telah berjumpa dengan *Spirula* terkait cirinya ini di Gambar 6.4. Jika disarankan bahwa cangkang bernilai *busung* tinggi seperti ini biasanya tidak bertahan hidup karena lemah secara struktur, *Spirula* cukup sesuai dengan saran itu. Hewan ini tidak tinggal di dalam cangkang-



nya. Ia menggunakan cangkang sebagai organ apung internal. Dan karena cangkang tidak berfungsi sebagai proteksi, alam membiarkannya mengikuti lintasan evolusi ke area yang biasanya terlarang di Museum Cangkang Segala Rupa. Tapi ia masih berada di dalam kubus museum itu. Hal ini mungkin juga benar untuk siput tabung Hindia Barat pada Gambar 6.15, yang telah mengambil cara hidup – dan bentuk – cacing tabung. Lihat kembali Gambar 6.8. Di bagian kanan bawah, kita akan melihat area sekitaran museum tempat siput tabung

Gambar 6.16 Pola-pola permukaan cangkang dan padanan buatan komputernya.



Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

Hindia Barat berada. Di lain pihak, kerabat dekat dari makhluk ini (serta beberapa ammonit yang telah punah) memiliki bentuk yang jauh lebih ganjil dan tidak biasa dan pasti tidak dapat ditempatkan di bagian mana pun di museum itu.

Museum tiga dimensi kita tidak hanya mengabaikan fakta bahwa tampang lintang tabung tidak harus berbentuk lingkaran. Tetapi juga mengabaikan khazanah pola di permukaan cangkang: loreng harimau dan totol macan tutul pada Gambar 6.10, kaligrafi bentuk V pada Gambar 6.4a, dan aneka ragam bentuk alur dan gigir yang didapati terpahat dan terlukis pada cangkang-cangkang yang lain. Sebagian dari pola-pola ini dapat diakomodasi di model kita dengan menginstruksikan komputer sebagaimana berikut ini: Saat meluas berputar-putar, membangun tabung yang melebar dalam rangkaian cincin, buat cincin ke- $n$  lebih tebal dari semua cincin yang lain. Berdasarkan nilai  $n$ , aturan ini dapat memunculkan garis-garis vertikal pada jarak tertentu di atas permukaan cangkangnya. Dengan aturan-aturan yang lebih rumit, komputer dapat menghasilkan pola-pola yang lebih rumit pula. Seorang ilmuwan Jerman, Hans Meinhardt, telah mengadakan penelitian khusus untuk aturan-aturan semacam itu. Bagian atas Gambar 6.16 menunjukkan pola-pola permukaan pada dua cangkang sungguhan: cangkang siput zaitun (*olive snail*) dan siput laut *Volutidae*. Di bawahnya adalah pola-pola amat mirip yang dibuat dengan aturan-aturan komputer yang diterapkan oleh program komputer Meinhardt. Tampak bahwa aturan-aturannya memproduksi hasil-hasil yang mirip dengan yang menumbuhkan biomorf-biomorf bak-pohon, tetapi ia memandangnya bukan dari perspektif ranting yang tumbuh, melainkan gelombang

aktivitas yang mengeluarkan dan menghambat pigmen di atas sel-sel. Perinciannya dapat dibaca di bukunya, *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*, tetapi saya terpaksa harus beralih dari pokok ini dan kembali ke tema utama saya: Museum Segala Cangkang.

Saya mengetengahkan konsep museum karena fakta bahwa – mengabaikan kerumitan tampang lintang tabung, ornamen, dan aneka ciri khas lainnya – sebagian besar varian di antara semua cangkang yang kita kenal dapat dihampirkan hanya dengan menyematkan tiga bilangan ke dalam sebuah aturan penggambaran. Untuk mengakomodasi rupa-rupa hewan selain cangkang, kita biasanya harus membayangkan sebuah museum yang dibangun dengan jumlah dimensi yang lebih besar dari yang dapat kita gambar. Meski sukar membayangkan Museum Hewan Segala Rupa berdimensi ramai, mudah untuk mengingat wacana sederhana bahwa hewan ditempatkan di dekat hewan-hewan yang paling mirip dengannya, dan pengunjung dapat berjalan ke arah mana pun, tidak hanya lurus di sepanjang lorong-lorongnya saja. Sejarah evolusi adalah lintasan yang berliku-liku melalui sebagian museum itu. Karena evolusi terjadi secara mandiri di semua bagian kerajaan hewan dan tumbuhan yang beraneka ragam, kita dapat membayangkan ribuan lintasan, meliuk-liuk ke berbagai arah melalui berbagai kawasan di sebuah museum multidimensional (perhatikan betapa jauhnya kita sudah beralih dari metafora Gunung Kemuskilan).

Sekarang, kontroversi yang mengawali uraian ini dapat diungkapkan kembali sebagai berikut. Sebagian ahli biologi merasa bahwa, saat berjalan di koridor-koridor panjang museumnya, yang kita temukan adalah gradasi-gradasi mulus

ke semua penjuru. Sebagian besar wilayah museum itu, nyatanya, tidak pernah dikunjungi oleh makhluk hidup sungguhan. Tetapi, menurut pandangan ini, wilayah-wilayah itu akan dikunjungi hanya jika seleksi alam ‘mau’ bertandang ke sana. Ada juga kalangan ahli biologi – kubu ini tak begitu saya dukung tetapi mereka boleh jadi benar – yang merasa bahwa sebagian besar wilayah museum itu selamanya terlarang bagi seleksi alam; bahwa seleksi alam mungkin menggedor-gedor pintu-pintu koridor tertentu tetapi tak kunjung bisa masuk karena mutasi yang dibutuhkan memang tidak dapat muncul. Menurut ragam imajinatif dari pendapat ini, ada pula bagian-bagian lain dari museumnya yang, jauh dari kata terlarang bagi seleksi alam, justru bertingkah layaknya magnet atau wastafel, mengisap hewan-hewan ke sana, hampir-hampir terlepas dari upaya terbaik seleksi alam. Menurut cara pandang ini, Museum Hewan Segala Rupa bukanlah griya dengan tata letak merata berisi galeri-galeri panjang dan koridor-koridor megah dengan ciri-ciri yang halus berubah, melainkan deretan magnet yang disusun dengan jarak lebar-lebar, dan masing-masing meremang dengan berkas-berkas besi. Berkas besi melambangkan hewan, dan jarak di antara magnet-magnet itu melambangkan rupa-rupa perantara yang mungkin atau mungkin tidak bertahan hidup jika menjelma ada, tetapi yang pada dasarnya tidak ada. Cara lain, dan barangkali lebih baik, untuk mengungkapkan pandangan ini adalah bahwa persepsi kita atas hal yang merupakan ‘perantara’ atau ‘tetangga’ di ruang satwa keliru. Tetangga yang sebenarnya adalah rupa-rupa yang, kenyataannya, dapat diraih dengan satu langkah mutasi. Kita mungkin atau mungkin tidak memandangnya sebagai tetangga.

Pikiran saya tetap terbuka soal kontroversi ini, meski saya condong ke arah yang satu. Namun, untuk pokok yang satu ini, saya bersikukuh. Bawa di alam ini, di mana ada ilusi yang cukup kuat atas desain baik untuk tujuan tertentu, di situ seleksi alam menjadi satu-satunya mekanisme yang kita kenal, yang mampu mempertanggungjawabkan hal tersebut. Saya tidak bersikukuh bahwa seleksi alam memiliki kunci ke setiap koridor Museum Hewan Segala Rupa, dan saya tentu tidak berpikir bahwa seluruh bagian museum dapat dicapai dari semua bagian lainnya. Seleksi alam kemungkinan besar tidak bebas berkelana sekehendak hatinya. Boleh jadi sebagian kolega saya benar, dan kebebasan gerak seleksi alam, saat merambat atau bahkan melompat, di sekeliling ruang museum amat sangat terbatas. Tapi jika terhadap seekor hewan atau organ, seorang insinyur menilai bahwa desainnya baik untuk tugas tertentu, maka saya akan berdiri dan bersaksi bahwa seleksi alamlah yang bertanggung jawab atas kebaikan desain yang semu itu. ‘Magnet’ atau ‘penarik’ di Ruang Satwa tidak dapat, tanpa bantuan seleksi, mencapai desain fungsional yang baik. Namun sekarang, izinkan saya sedikit melemaskan kuda-kuda, dengan mengajukan wacana embriologi ‘kaleidoskopis’.

## BAB 7

### EMBRIOSkopis

TUBUH DIBANGUN DENGAN PROSES PERTUMBUHAN, YANG sebagian besar terjadi di embrio. Jadi, mutasi, jika akan mengubah bentuk sebuah tubuh, biasanya akan melakukannya dengan menyesuaikan proses-proses pertumbuhan embrionik. Mutasi dapat, misalnya, mempercepat pertumbuhan sepotong jaringan tertentu di kepala embrionik, yang akhirnya menghasilkan tubuh dewasa dengan rahang bawah maju. Perubahan yang terjadi sejak dini dalam perkembangan fetus dapat menimbulkan efek-efek dramatis kemudian – mungkin dua kepala, mungkin sepasang sayap tambahan. Mutasi-mutasi dramatis tersebut, karena sebab-sebab yang kita paparkan di Bab 3, kemungkinan besar tidak diloloskan oleh seleksi alam. Di bab ini, saya mengajukan pokok yang berbeda. Yakni, bahwa jenis mutasi-mutasi yang tersedia untuk digarap oleh seleksi alam akan bergantung pada jenis embriologi yang dimiliki spesiesnya. Embriologi mamalia berfungsi dengan cara yang sangat berbeda dari embriologi serangga. Boleh jadi memang ada perbedaan-perbedaan yang sepadan, meski lebih kecil, di dalam tipe-tipe embriologi yang diterapkan berbagai ordo mamalia. Dan pokok yang ingin saya ketengahkan adalah bahwa beberapa tipe embriologi, dalam arti tertentu, lebih ‘pandai’ berevolusi dibanding tipe yang lain. Maksudnya bukan lebih mungkin bermutasi, ihwal yang berbeda sama sekali. Melainkan bahwa jenis-jenis variasi yang dimunculkan beberapa tipe embriologi boleh jadi lebih menjanjikan secara evolusi ketimbang jenis-

jenis variasi yang dimunculkan tipe-tipe embriologi yang lain. Selain itu, semacam seleksi tingkat tinggi – yang sebelumnya saya istilahkan ‘evolusi evolvabilitas’ – dapat membuat dunia ini dihuni oleh tipe-tipe makhluk yang embriologinya membuat mereka pandai berevolusi.

Keluar dari mulut seorang Darwinis militan seperti saya, hal ini mungkin terdengar tak ubahnya bidah tercela. Seleksi alam tidak semestinya, dalam lingkaran-lingkaran neo-Darwinian yang baik, memilih di antara kelompok-kelompok besar. Dan bukankah kita sudah sepakat di Bab 3 bahwa seleksi alam lebih memilih laju mutasi nol (yang, untungnya, demi masa depan kehidupan ini, tidak kunjung dicapainya)? Kok bisa sekarang kita mengklaim bahwa embriologi jenis tertentu kiranya ‘pandai’ bermutasi? Ya, mungkin dalam pengertian berikut ini. Jenis-jenis embriologi tertentu mungkin cenderung bervariasi dengan cara tertentu; jenis-jenis embriologi yang lain cenderung bervariasi dengan cara yang lain. Dan sebagian dari cara-cara ini mungkin, dalam arti tertentu, lebih berkhasiat untuk tujuan evolusi dibanding yang lain; barangkali, lebih berpotensi menyebarluaskan rupa-rupa anyar, seperti yang terjadi pada mamalia setelah dinosaurus punah. Inilah yang saya maksud saat tadi saya mengemukakan prasaran yang agak ganjil, bahwa sebagian embriologi lebih ‘pandai berevolusi’ dari yang lain.

Meski lebih berkenaan dengan keindahan visual, bukan desain berfaedah, kaleidoskop kiranya layak kita jadikan analogi di sini. Keping-keping warna-warni di dalam keker kaleidoskop terkumpul menjadi satu tumpukan acak. Namun, karena cermin-cermin di dalam instrumen itu ditata cerdik dengan sudut-sudut tertentu, yang tampak melalui kanta matanya

adalah bentuk simetris yang elok dipandang, seperti kepingan salju. Tutukan acak ('mutasi') pada larasnya menimbulkan gerakan kecil pada tumpukan keping-keping itu. Tetapi kita, yang melihat melalui kata mata, memandangnya sebagai perubahan-perubahan yang diulang secara simetris di semua sudut kepingan saljunya. Kita menutuk larasnya berkali-kali dan merasa seolah berkelana menyusuri gua kecil Aladin berisi bentuk-bentuk meriah bergelimang permata.

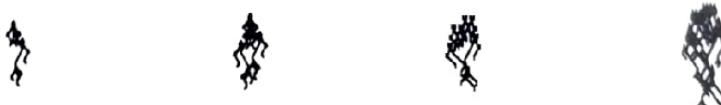
Efek utama kaleidoskop tercipta karena repetisi spasial. Perubahan-perubahan acak diulang di keempat penjurunya. Atau mungkin bukan empat, melainkan jumlah lain sesuai jumlah cerminnya. Mutasi pun, walau berupa perubahan-perubahan tunggal pada dirinya sendiri, efeknya dapat diulang di berbagai bagian tubuh. Hal ini bisa kita anggap sebagai jenis lain ketakacakan mutasi, selain yang telah kita bahas di Bab 3. Jumlah repetisi bergantung pada tipe embriologinya. Saya akan membahas berbagai jenis embriologi kaleidoskopis. Pengalaman membiakkan biomorf, dan khususnya pengalaman menyematkan 'cermin-cermin' perangkat lunak (lihat di bawah) ke dalam program Blind Watchmaker, telah menggiring saya untuk menerima arti penting embriologi kaleidoskopis. Maka dari itu, bukan kebetulan bahwa, untuk tujuan-tujuan ilustrasi di bab ini, saya akan sangat mengandalkan biomorf-biomorf dan satwa-satwa komputer lainnya.

Pertama, simetri – dan kita mulai dari ketiadaannya. Pranata tubuh manusia itu simetris (meski tidak sepenuhnya). Demikian pula sebagian besar hewan lain yang kita jumpai. Karena itulah, kita gampang lupa bahwa simetri bukanlah sifat gamblang yang pasti dimiliki setiap makhluk. Beberapa

kelompok Protozoa (hewan-hewan bersel tunggal) asimetris: Mau diiris bagaimana pun, dua potong tubuhnya takkan identik atau mencerminkan satu sama lain. Apa kiranya dampak mutasi terhadap hewan yang murni asimetris? Untuk menjelaskan ini, kita beralih ke biomorf-biomorf komputer.

Keempat biomorf di Gambar 7.1a semuanya varian mutan dari rupa yang sama, dan keempatnya dihasilkan oleh sebuah embriologi yang tidak memiliki kekang-kekang simetri. Bentuk-bentuk simetri tidak dilarang, tetapi kecenderungan khusus untuk menghasilkannya tidak ada. Mutasi semata-mata mengubah bentuknya, dan itu saja: Efek 'kaleidoskopis' atau 'cermin' tidak terbukti ada. Tapi lihatlah beberapa biomorf lainnya (Gambar 7.1b). Biomorf-biomorf ini, lagi-lagi, adalah rupa-rupa mutan dari satu sama lain, tetapi embriologinya memuat aturan simetri: Programnya telah dimodifikasi, disemati sebuah 'cermin perangkat lunak' di tengah-tengahnya. Mutasi dapat mengubah pelbagai hal, termasuk pada biomorf-biomorf asimetris, tetapi perubahan acak apa pun di sisi kiri akan tercermin pula pada sisi kanannya. Rupa-rupa ini tampak lebih 'biologis' dari rupa-rupa asimetris di gambar sebelumnya.

Aturan simetri di dalam embriologi dapat dibayangkan sebagai sebuah batasan atau 'kekang'. Memang begitulah, dalam pengertian ketat bahwa embriologi yang tidak dikekang secara teoretis mampu memproduksi rupa-rupa simetris sekaligus asimetris dan, karenanya, lebih produktif dalam menelurkan rupa. Tapi di bab ini, akan kita lihat bahwa kekang simetri ternyata dapat menjadi pengaya: kebalikan persis dari batasan. Embriologi yang tanpa kekang, masalahnya, perlu melalui sekian banyak rupa sebelum, kebetulan saja, bentuk



a. Biomorf asimetrис



b. Biomorf simetris



c. Biomorf simetris Utara-Selatan



d. Biomorf simetris berjari-jari



e. Biomorf simetris Pulau Man

Gambar 7.1 Biomorf-biomorf yang dikekang dengan berbagai jumlah 'cermin kaleidoskopis' dan, karenanya, menunjukkan berbagai jenis simetri.

yang simetris muncul. Sudah begitu pun, simetri yang dinantianti ini akan terus diancam oleh generasi-generasi mutan masa depan. Apabila, terlepas dari semua faktor lain yang mungkin berubah, simetri hampir selalu diinginkan, embriologi berkekang akan jauh lebih ‘produktif’ dan lebih indah dipandang. Lain dari embriologi tanpa kekang, ia takkan buang-buang waktu melahirkan rupa-rupa asimetris yang memang tidak diinginkan.

Kenyataannya, mayoritas besar hewan, termasuk kita, secara signifikan, meski tidak sepenuhnya, simetris pada bidang sanding kiri dan kanan. Keindahan tidak penting di sini; maka, kita harus bertanya mengapa, dalam konteks kefaedahan, simetri kiri-kanan mesti menjadi ciri yang diinginkan. Ada beberapa ahli zoologi yang setia pada wacana abad ke-18 bahwa, sehubungan dengan fitur-fitur arsitektural utama seperti simetri, hewan menjadi sedemikian rupa karena semacam kesetiaan yang hampir-hampir mistis pada suatu ‘denah tubuh fundamental’, atau *Bauplan*. (*Bauplan* adalah kata bahasa Jerman untuk cetak biru. Biasanya, untuk menunjukkan kedalaman, orang berganti bahasa – ‘nada-nada tuba dari kedalaman Sungai Rhine’, seperti diistilahkan Sir Peter Medawar dengan sarkastis. Tapi sebetulnya, kalau boleh saya mengimbuhinya dengan guyongan orang dalam, ada ironi pada kata ‘cetak biru’ karena mengesankan relasi ‘reduksionistik’ satu-lawan-satu antara denah dan bangunan yang, dalam konteks genetika, akan menyenggung kepekaan ideologis dari orang-orang yang gandrung dengan kata *Bauplan*.) Saya lebih suka kesederhanaan ungkapan Anglo-Saxon dari kolega saya Dr. Henry Bennet Clark, yang telah menjadi teman diskusi saya untuk persoalan ini: ‘Semua

pertanyaan tentang (makhluk) hidup punya satu jawaban, meski mungkin tidak selalu menolong pemahaman: seleksi alam.' Barang tentu, manfaat-manfaat terperinci dari simetri kanan-kiri berbeda-beda untuk tiap jenis binatang, tetapi ia membuat prasaran yang bersifat umum juga, sebagaimana berikut ini.

Sebagian besar hewan itu bak-cacing, atau berasal dari leluhur bak-cacing. Jika kita bayangkan rasanya hidup seperti seekor cacing, lumrah bila mulut di ujung yang satu – yang membentur makanan terlebih dahulu – dan dubur di ujung yang lain, supaya kotoran dapat ditinggalkan, bukan tak sengaja termakan. Inilah yang menentukan depan dan belakang. Kemudian, dunia ini biasanya menekankan perbedaan signifikan antara atas dan bawah. Alasan umumnya adalah gravitasi. Namun khususnya, banyak hewan berkecimpung di atas permukaan seperti tanah atau dasar laut. Maka wajarlah bila, karena bermacam-macam alasan detailnya, sisi tubuh yang terdekat dengan tanah mestilah berbeda dari sisi yang terdekat dengan langit. Inilah yang menentukan sisi dorsal (punggung) dan ventral (perut). Maka, karena sudah ada ujung depan dan ujung belakang, sekarang kita juga punya sisi kiri dan sisi kanan. Tapi mengapa sisi kiri dan sisi kanan mencerminkan satu sama lain? Jawaban pendeknya, mengapa tidak? Berbeda dari asimetri depan/belakang dan asimetri atas/bawah, yang disertai justifikasi yang kuat, tidak ada alasan umum untuk mengandaikan bahwa bentuk terbaik sisi kiri akan berbeda dari bentuk terbaik sisi kanan. Justru, kalaualah memang ada bentuk terbaik untuk sisi kiri, wajar bila kita mengasumsikan bahwa sisi kanan terbaik pun akan memiliki kualitas-kualitas

setara. Lebih spesifik lagi, bila melenceng jauh dari simetri cermin kiri/kanan, struktur tubuh akan timpang, dan kemampuan hewan berpindah tempat dengan efisien pun menurun signifikan.

Mengingat bahwa, karena alasan apa pun, alangkah baiknya sisi kiri dan sisi kanan berevolusi bersama seperti gambar-gambar cermin yang seiring-sejalan, embriologi yang bersifat ‘kaleidoskopis’ dengan ‘cermin’ tersemat di tengah-tengahnya akan berfaedah. Mutasi-mutasi baru yang berguna lantas akan secara otomatis dicerminkan di kedua sisinya. Apa alternatif nonkaleidoskopisnya? Suatu silsilah yang sedang berevolusi boleh jadi mencapai perubahan bermanfaat yang pertama di sisi, misalnya, kiri tubuhnya. Kemudian, silsilah ini harus menunggu sekian banyak generasi asimetri hingga muncul mutasi yang sejodoh di sisi kanan. Tampak jelas bahwa embriologi kaleidoskopis kiranya lebih menguntungkan. Maka dari itu, barangkali ada semacam seleksi alam yang lebih memilih embriologi-embriologi kaleidoskopis dengan watak yang makin restriktif, tetapi sekaligus makin produktif.

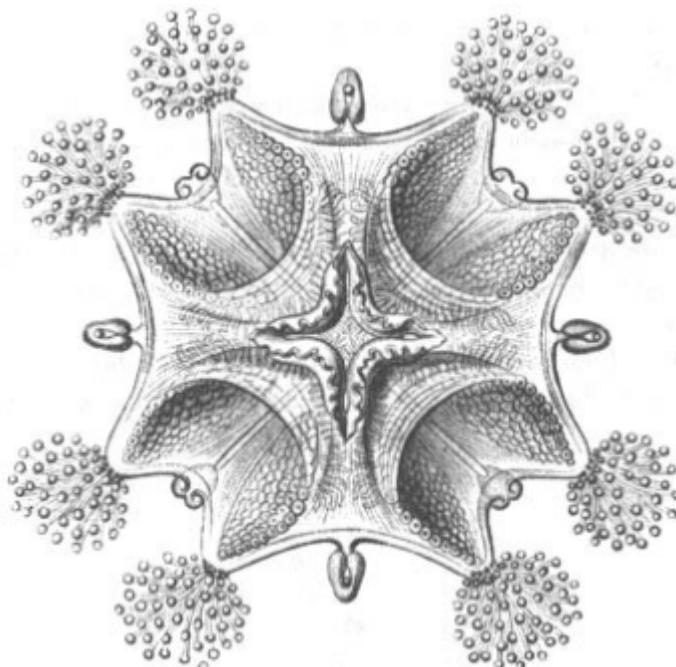
Bukan berarti asimetri kiri-kanan takkan pernah berevolusi. Kadang-kadang memang terjadi: Mutasi yang memengaruhi satu sisi lebih kuat dari sisi yang lain. Ada alasan-alasan khusus mengapa mutasi-mutasi asimetris terkadang diinginkan – untuk mengepaskan perut kelomang ke kumparan cangkang, misalnya – dan seleksi alam memang lantas memilih mutasi-mutasi semacam ini. Sudah kita singgung ikan pipih seperti ikan sebelah, ikan lidah, dan ikan piring, di Bab 4 (lihat Gambar 4.7). Ikan sebelah merebah ke bagian tubuh yang awalnya merupakan sisi kiri, dan mata kirinya telah bermigrasi ke sisi yang dahulunya kanan tetapi sekarang atas. Ikan lidah

melakukan hal serupa; bedanya, hewan ini berbaring ke sisi kanannya yang mungkin, meski belum pasti, menandakan bahwa mereka mengevolusikan kebiasaan itu secara terpisah. Permukaan yang dahulu di sisi kiri pada ikan sebelah kini menjadi sisi fungsional yang berada di bawah, menempel ke dasar laut, dan karenanya memipih dan mengilap. Permukaan yang dahulu di sisi kanan kini menjadi sisi fungsional yang berada di atas, menengadah ke langit, serta kemudian melengkung bentuk dan menyamar warna. Sisi-sisi yang dahulu dorsal (punggung) dan ventral (perut) kini menjadi sisi fungsional kiri dan kanan. Sirip-siripnya – sirip dorsal dan sirip anal, yang biasanya amat berbeda – kini menjadi gambar cermin yang hampir sama persis, sebagai sirip fungsional kiri dan kanan. Simetri kiri-kanan yang ditemukan pada ikan sebelah dan ikan lidah ini justru menjadi bukti kuat akan adanya daya dan pengaruh seleksi alam, bukan denah-denah tubuh yang telah ditentukan sebelumnya berdasarkan lokasi geografis. Akan menarik (dan bisa dilakukan) untuk menyingkap apakah mutasi pada ikan sebelah dicerminkan secara otomatis pada sisi kiri dan kanan yang sekarang (yakni, sisi-sisi yang dahulu dorsal dan ventral). Ataukah tetap, seturut pola leluhurnya, secara otomatis dicerminkan pada sisi-sisi yang dahulu kiri dan kanan (yakni, sisi-sisi yang sekarang bawah dan atas)? Apakah perbedaan antara sisi mengilap dan menyamar dari ikan sebelah dimenangkan dalam bentrokan sengit dengan embriologi kaleidoskopis lama yang berseteru atau dengan bantuan embriologi kaleidoskopis baru yang ramah? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini, apa pun itu, akan menunjukkan bahwa kata-kata ‘berseteru’ dan ‘ramah’ layak digunakan untuk mencirikan embriologi. Sekali lagi, mungkinkah disarankan

bawa semacam seleksi alam tingkat tinggi kiranya bertindak untuk meningkatkan keramahan embriologi terhadap jenis-jenis evolusi tertentu?

Dari perspektif bab ini, hal penting mengenai simetri kiri-kanan adalah bahwa sebuah mutasi akan mengerakkan efek-efeknya secara serempak pada tubuh hewan di dua tempat, bukan satu. Inilah yang saya maksud dengan embriologi kaleidoskopis: seolah mutasinya dicerminkan. Namun, simetri kiri-kanan bukanlah jenis satu-satunya. Ada bidang sanding lain tempat cermin-cermin mutasi dapat dipasang. Biomorf-biomorf di Gambar 7.1c simetris tidak hanya di bidang kiri-kanan, tetapi juga bidang haluan-buritan. Seolah-olah, ada dua cermin yang dipasang dengan sudut yang tepat. Makhluk hidup sungguhan dengan ‘embriologi dua cermin’ ini lebih sulit ditemukan dari yang simetris di sisi kanan dan kiri. *Cestum veneris*, hewan berbentuk pita yang hidup berenang di laut dan tergolong ke dalam filum ctenophora atau ubur-ubur sisir, adalah contoh yang kemolekannya membuat kita berdecak kagum. Lebih umum lagi ditemukan: embriologi kaleidoskopis yang mengambil rupa simetri empat penjuru, seperti biomorf-biomorf di Gambar 7.1d. Ubur-ubur banyak menunjukkan pola simetri ini. Para anggota filum mereka hidup berenang di laut (seperti ubur-ubur itu sendiri) atau tertambat di dasar (seperti anemon laut) sehingga tidak tunduk pada tekanan-tekanan haluan/buritan yang kita bahas pada hewan-hewan melata seperti cacing. Mereka memang wajib memiliki sisi atas dan bawah, tetapi sama sekali tidak ditekan oleh seleksi untuk memiliki sisi depan/belakang, atau kanan/kiri. Oleh karena itu, jika dilihat dari atas, tidak ada alasan tertentu untuk lebih memilih penjuru yang satu ketimbang yang lain dan mereka

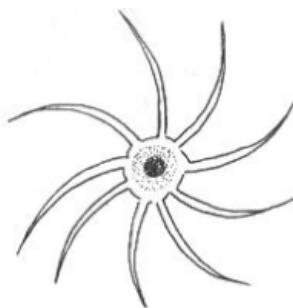
memang ‘simetris berjari-jari’. Ubur-ubur pada Gambar 7.2 kebetulan simetris berjari empat, tetapi jumlah jari yang lain juga lumrah, sebagaimana akan kita lihat nanti. Gambar tersebut, seperti banyak gambar lain di bab ini, dibuat oleh ahli zoologi Jerman abad ke-19 yang sangat dihormati, Ernst Haeckel, yang kebetulan juga merupakan ilustrator cemerlang.



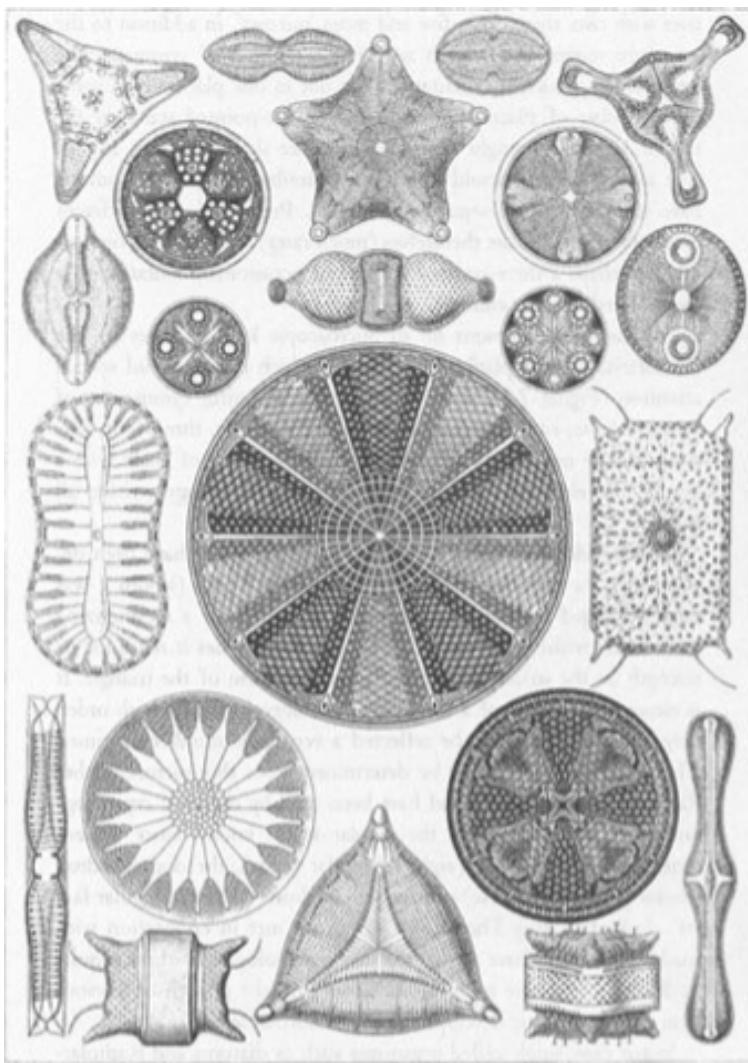
Gambar 7.2 Hewan simetris empat sudut: seekor ubur-ubur bertangkai. Perhatikan bahwa tiap-tiap dari keempat sumbunya juga simetris kiri-kanan terhadap dirinya sendiri; maka variasi yang terjadi sebetulnya dicerminkan delapan kali.

Hewan dengan simetri seperti ini mampu menghasilkan aneka ragam rupa, tetapi dengan keterbatasan yang, sekali lagi saya katakan, boleh jadi ternyata bukan keterbatasan, melainkan pengayaan ‘kaleidoskopis’. Perubahan-perubahan acak memengaruhi keempat penjurunya sekaligus. Karena, pada saat yang sama, unit-unit yang diulang empat kali juga dicerminkan, tiap mutasi sebenarnya diulang delapan kali. Hal ini tampak jelas pada contoh ubur-ubur bertangkai di Gambar 7.2 yang memiliki delapan lempeng kecil, dua per penjuru. Agaknya mutasi dalam bentuk berumbai akan menjelaskan dirinya delapan kali. Untuk melihat penampakan simetri berjari-jari tanpa penggandaan tambahan ini, tengok biomorf-biomorf pada Gambar 7.1e. Agak sulit menemukan hewan-hewan sungguhan dengan simetri ‘swastika’ atau ‘Pulau Man’ seperti ini, tetapi Gambar 7.3 menunjukkan hal yang kita cari itu. Gambar itu gambar spermatozoa seekor udang karang.

Sebagian besar hewan yang simetris berjari-jari, berapa pun jumlah jari yang dimiliki, menambahkan simetri cermin kiri-kanan dalam tiap jarinya. Oleh karena itu, untuk menghitung



Gambar 7.3 ‘simetri Pulau Man’: spermatozoa seekor udang karang.



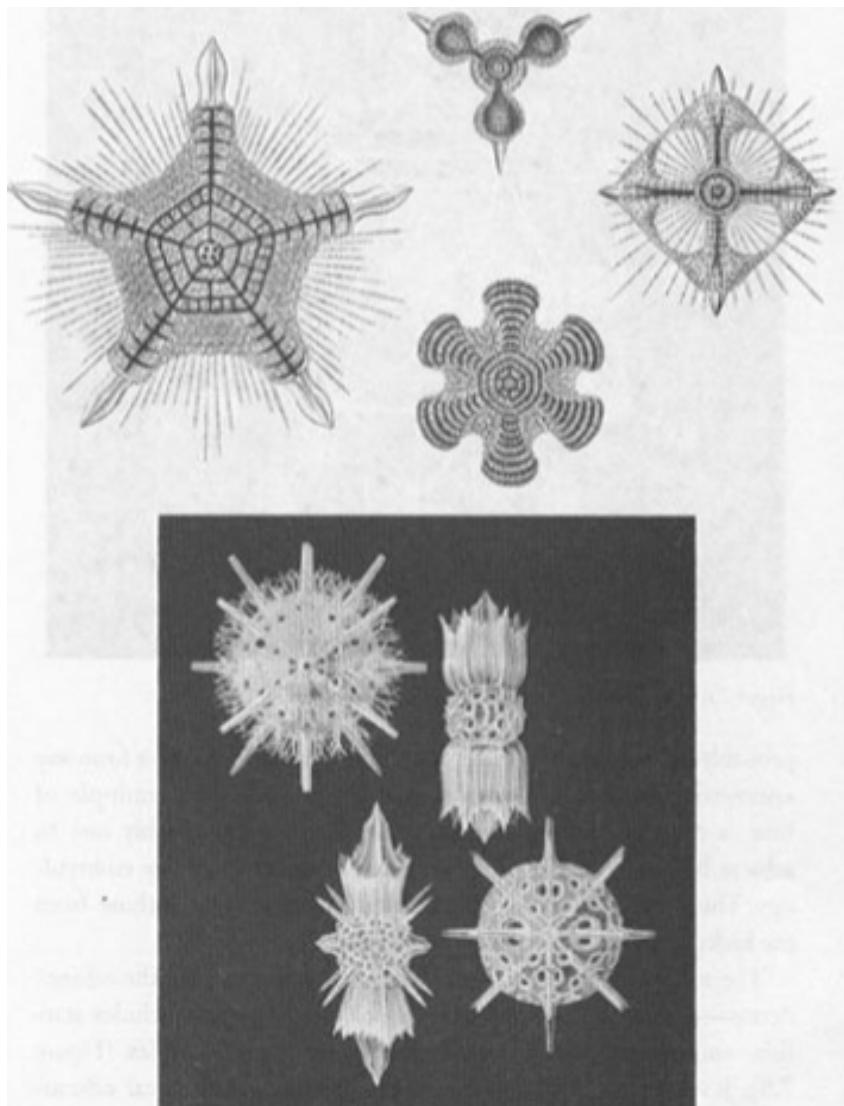
Gambar 7.4 Diatom – tumbuhan bersel tunggal mikroskopis – menunjukkan aneka jumlah cermin kaleidoskopis di dalam satu kelompok organisme.

berapa kali suatu mutasi ‘dicerminkan’: Hitung dahulu jumlah jarinya, lalu gandakan. Bintang laut biasa, karena tiap-tiap dari kelima lengannya simetris kiri-kanan, boleh dibilang ‘mencerminkan tiap mutasi sepuluh kali’.

Haeckel gemar menggambar organisme bersel tunggal, seperti diatom pada Gambar 7.4. Di sini kita melihat simetri kaleidoskopis dengan dua, tiga, empat, dan lima atau lebih cermin, selain cermin kiri-kanan di dalam tiap lengannya. Untuk tiap jenis simetri, embriologinya mengatur agar mutasi bertindak bukan di satu tempat, melainkan di sejumlah baku tempat. Contohnya, bintang lima sudut di dekat bagian paling atas Gambar 7.4 mungkin bermutasi untuk menghasilkan sudut-sudut yang lebih runcing. Di kasus ini, kelima sudut itu akan meruncing serentak. Tidak harus menunggu lima mutasi terpisah. Agaknya, sekian cermin itu sendiri merupakan mutasi (yang terjadi lauh lebih langka) dari satu sama lain. Mungkin sebuah bintang tiga sudut terkadang bermutasi menjadi bintang lima sudut, contohnya.

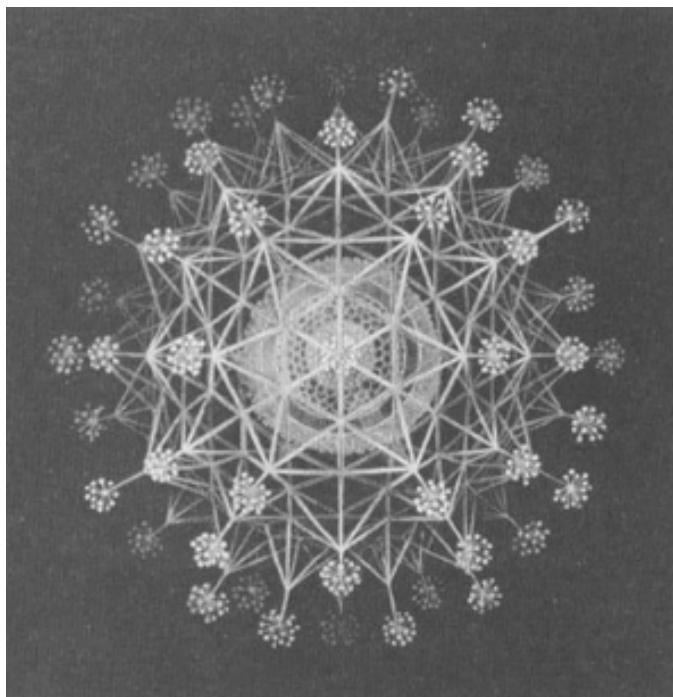
Bagi saya, juara semua kaleidoskop mikroskopis adalah Radiolaria, kelompok jasad renik lain yang mendapat perhatian khusus Haeckel (Gambar 7.5). Mereka juga menunjukkan simetri yang indah dari berbagai tatanan, yang sepadan dengan kaleidoskop dengan dua, tiga, empat, lima, dan enam atau lebih cermin. Mereka memiliki kerangka-kerangka renik yang terbuat dari kapur dengan keindahan dan keanggunan yang dengan jelas memperlihatkan embriologi kaleidoskopis.

Mahakarya kaleidoskopis pada Gambar 7.6 mungkin tak ubahnya rancangan arsitek visioner Buckminster Fuller (saya



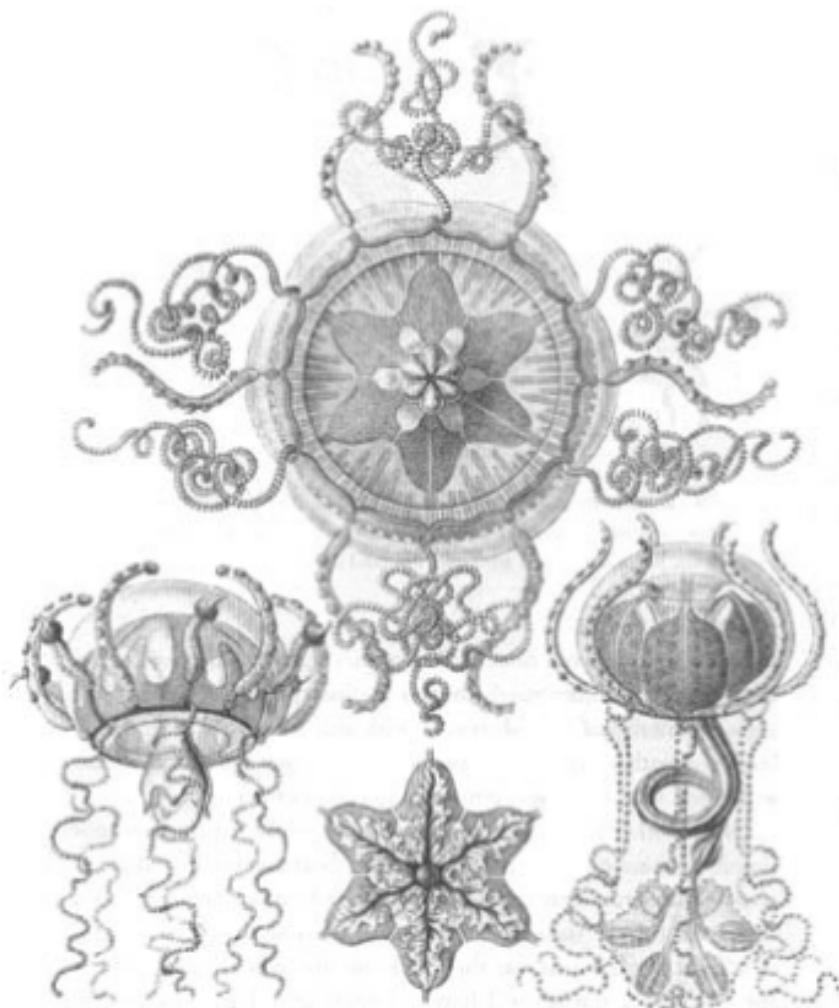
Gambar 7.5 Radiolaria. Contoh-contoh lain aneka jumlah cermin simetri kaleidoskopis dalam kelompok organisme bersel tunggal mikroskopis.

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



Gambar 7.6 Rangka Radiolaria yang besar dan menakjubkan.

beruntung pernah mendengar ceramahnya yang mencerahkan selama tiga jam tanpa jeda – padahal usianya saat itu sembilan puluhan tahun). Seperti kubah-kubah geodesi Fuller, kekuatan pranata itu bertumpu pada bentuk segitiganya yang geometris dan kokoh secara struktural. Jelaslah bahwa struktur ini buah dari embriologi kaleidoskopis tingkat tinggi. Setiap satu mutasi akan dicerminkan berkali-kali. Jumlah pastinya tidak dapat ditentukan dari gambar ini. Gambar Radiolaria lain karya Haeckel telah digunakan oleh kristalografer kimia sebagai ilustrasi benda-benda padat beraturan yang dikenal sejak zaman kuno sebagai oktaedron

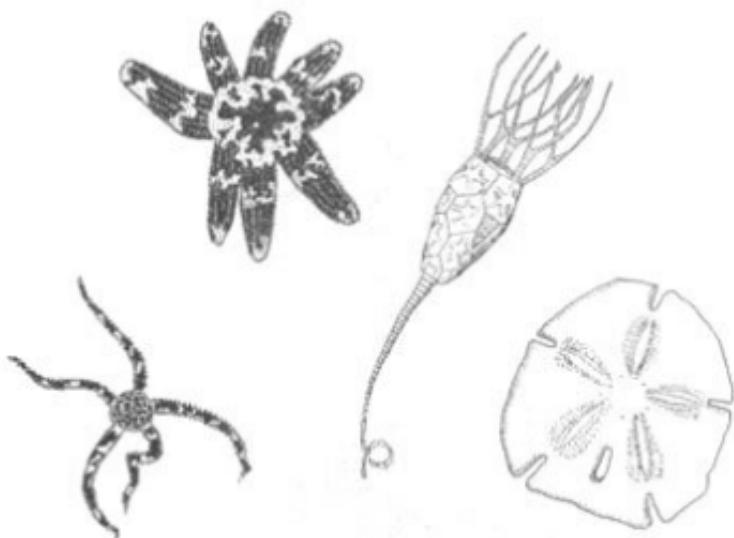


Gambar 7.7 Medusa simetris enam sudut.

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

(delapan muka segitiga), dodekahedron (dua belas muka segi lima) dan ikosahedron (dua puluh muka segitiga). D'Arcy Thompson sendiri, yang telah kita singgung saat membahas cangkang siput, akan berpendapat bahwa embriologi Radiolaria yang menawan ini lebih banyak samanya dengan pertumbuhan kristal daripada pertumbuhan embrionik dalam arti wajarnya.

Biarpun demikian, organisme bersel tunggal seperti diatom dan Radiolaria memang harus memiliki jenis embriologi yang amat berbeda dari organisme bersel banyak, dan kemiripan di antara kaleidoskop mereka agaknya kebetulan semata. Kita sudah melihat contoh hewan bersel banyak yang simetris empat sudut, yaitu ubur-ubur. Empat, atau bilangan yang habis dibagi empat, lazim terdapat pada kelompok medusa dan agaknya mudah untuk dicapai dengan duplikasi sederhana dari proses tertentu pada kurun embriologi dininya. Ada pula medusa simetris enam sudut seperti dari kelompok hidroid yang dikenal sebagai trachymedusae (Gambar 7.7). Peraga termasyhur simetri lima sudut adalah echinodermata – filum besar makhluk laut berduri yang meliputi bintang laut, bulu babi, bintang ular, teripang, dan lili laut (Gambar 7.8). Telah diketengahkan bahwa echinodermata simetris lima sudut berasal dari leluhur jauh simetris tiga sudut, tetapi kelompok ini sudah simetris lima sudut selama lebih dari setengah miliar tahun dan wajar jika simetri lima sudut dianggap bagian sentral dari salah satu *Baupläne* teramat lestari yang begitu digemari ahli-ahli zoologi berpandangan kontinental. Malangnya pandangan idealistik ini, ternyata ada sekian spesies bintang laut dengan jumlah lengan lebih dari lima. Bahkan, di dalam spesies lima sudut yang disegani itu sendiri,



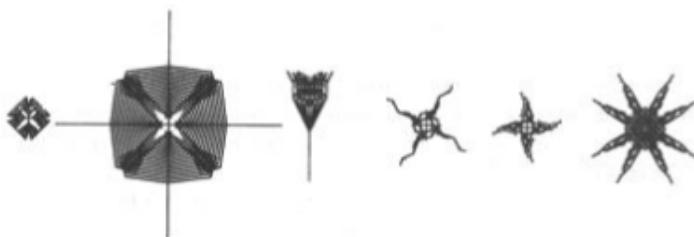
Gambar 7.8 Echinodermata dari berbagai kelompok: (dari kiri ke kanan) bintang ular, bintang laut berlengan banyak (kemungkinan pernah mengalami kehilangan dan regenerasi lengan, maka itu jumlah lengannya ganjil), lili laut, dan *sand dollar*.

individu-individu mutan dengan simetri tiga, empat, atau enam sudut pun kadang muncul.

Di lain pihak, berlawanan dengan sangkaan kita dari analisis sederhana mengenai kehidupan hewan melata penghuni dasar laut, hewan-hewan echinodermata yang melata pun biasanya simetris berjari-jari. Dan mereka tampak bersungguh-sungguh dengan simetri berjari-jarinya – dalam arti, ke mana pun langkah mengarah, tak ada jari yang diistimewakan. Ada kalanya seekor bintang laut punya ‘lengan pandu’, tetapi dari waktu ke waktu ia berganti lengan pemandu jalan. Echinodermata seperti ini telah menemukan

kembali simetri kiri-kanan pada kurun waktu evolusinya. *Echinocardium australe* dan *sand dollar*, dua tipe landak laut penggali liang yang bentuk tubuhnya meramping karena dipaksa beradaptasi dengan habitatnya (lingkungan berpasir), telah menjadikan struktur depan-belakang tubuhnya asimetris. Selain itu, hewan-hewan ini juga menatah corak asimetri kiri-kanan pada permukaan (kulit luar) sisi atas tubuhnya, yang tampak jelas menyerupai tata tubuh landak laut lima jari.

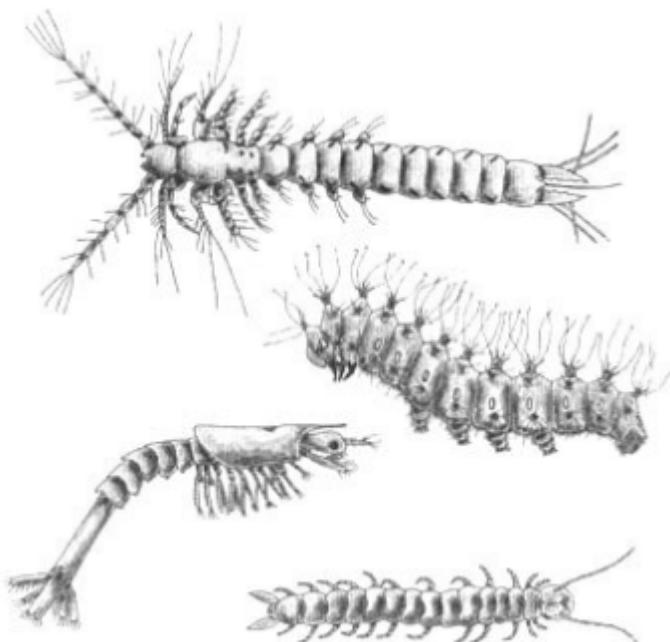
Echinodermata adalah makhluk yang begitu permai; sampai-sampai, waktu mencoba membiakkan biomorf-biomorf hidup dengan program Blind Watchmaker, saya tanpa sadar berupaya mencari kemiripan dengan kelompok hewan ini. Semua usaha membiakkan simetri lima sudut pupus. Embriologi Blind Watchmaker kurang kaleidoskopis. Jumlah ‘cermin’ yang diperlukan masih kurang. Kenyataan di lapangan, seperti telah kita lihat, beberapa echinodermata mutan keluar dari jalur simetri lima jari dan saya ‘curang’ karena menyimulasikan bintang laut, bintang ular, dan landak laut dengan jumlah jari genap (Gambar 7.9).



Gambar 7.9 Biomorf-biomorf komputer sekilas bisa tampak mirip echinodermata, tetapi tidak benar-benar menyamai simetri lima sudut yang licin seperti belut. Agar dapat mencapai simetri lima sudut, programnya perlu ditulis ulang.

Tetapi ini semua tidak lepas dari fakta – dan justru menunjukkan pokok utama bab ini – bahwa versi program komputer Blind Watchmaker yang sekarang memang tidak mampu memunculkan biomorf simetris lima sudut. Untuk mengatasi masalah ini, saya harus mengadakan perubahan pada programnya ('cermin' yang baru, bukan sekadar mutasi kuantitatif terhadap gen yang sudah ada) agar golongan baru mutasi kaleidoskopis dapat muncul. Jika ini dilakukan, saya merasa yakin bahwa proses mutasi acak dan seleksi yang biasa – walau agak makan waktu – akan menghasilkan kemiripan yang lebih baik dengan sebagian besar kelompok utama echinodermata. Versi awal program ini, sebagaimana digambarkan di buku *Pembuat Arloji yang Buta*, hanya mampu menghasilkan mutasi simetris kiri-kanan. Kemampuan program versi mutakhir – yang tersedia secara komersial – dalam menghasilkan biomorf-biomorf simetris empat sudut, dan biomorf-biomorf 'Pulau Man' atau 'swastika', adalah buah dari keputusan, dari pihak saya, untuk menulisnya ulang dan menempatkan repertoar 'cermin-cermin perangkat lunak' yang dikendalikan oleh gen.

Sejauh ini saya telah membahas berbagai jenis simetri sebagai contoh embriologi kaleidoskopis. Meski kalah spektakuler dari segi geometri, fenomena segmentasi tak kalah penting dari simetri di dunia hewan-hewan nyata. Segmentasi berarti repetisi serial dari sisi tubuh depan ke belakang, biasanya, pada hewan dengan tubuh panjang wajar dan simetris kiri-kanan. Contoh paling kentara hewan-hewan tersegmentasi adalah annelida (cacing tanah, cacing laut, cacing perca, dan cacing tabung) serta artropoda (insekta, krustasea, kaki seribu, trilobit, dll.), tetapi kita vertebrata pun tersegmentasi juga,



Gambar 7.10 Arthropoda dibangun dari segmen-segmen yang diulang, sering kali dengan variasi, dari depan ke belakang (dari atas) krustasea mystacocarida, *Derocheilocaris*; ulat ngengat merak raksasa, *Saturnia pyri*; udang dendrobranchiata, *Penaeus*; Symphyla (mirip dengan lipan), *Scutigarella*.

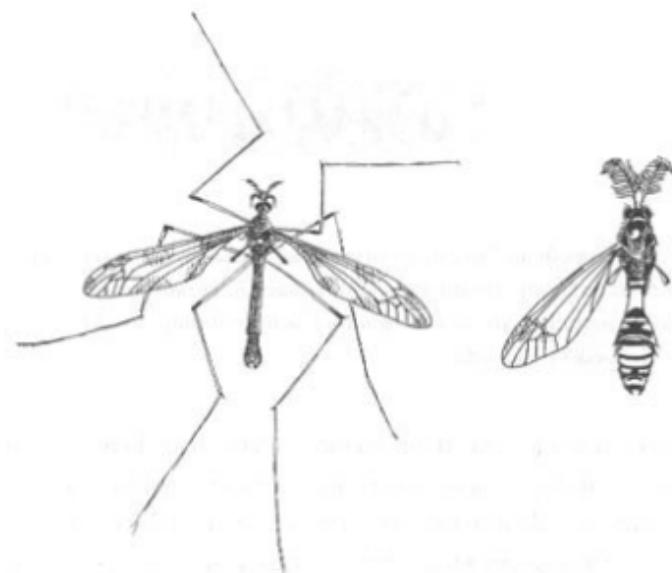
walau dengan cara yang agak berbeda. Jika kereta merupakan rangkaian gerbong, yang pada dasarnya mirip satu sama lain tetapi berbeda pada detailnya, seekor artropoda merupakan rangkaian segmen yang boleh jadi saling berbeda di tataran detail. Seekor lipan ibarat kereta barang, dengan gerbong-gerbong yang serupa. Hewan-hewan artropoda lain dapat kita bayangkan layaknya lipan yang *di-upgrade* habis-habisan: kereta dengan gerbong barang khusus dan gerbong penumpang aneka kelas (Gambar 7.10).

Cara lipan menata tubuhnya repetitif dalam arti yang sederhana. Terdapat repetisi spasial di sepanjang keretanya serta pencerminan kiri-kanan di dalam tiap segmennya. Namun, di luar lipan dan sebangsanya, ada kecenderungan yang terus-menerus terjadi di dalam evolusi: makin lama, segmen-segmennya makin berbeda satu dengan yang lain (tidak semua mutasi diulang di tiap segmen). Serangga, misalnya, ibarat lipan yang telah kehilangan kaki-kakinya, kecuali pada tiga segmen, yaitu segmen ketujuh, kedelapan, dan kesembilan dari depan. Laba-laba telah mempertahankan kakinya di empat segmen. Sebenarnya, pada laba-laba dan serangga, jumlah ‘tungkai’ primitif yang dipertahankan lebih dari itu. Hanya saja, tungkai-tungkai itu telah dialihkan ke fungsi lain, seperti antena atau rahang. Dan terkait diferensiasi tan-kaleidoskopis pada segmen-semen tubuh ini, lobster dan, lebih-lebih, kepiting telah melakukannya lebih jauh lagi.

Ulat bulu memiliki tiga ‘kaki serangga selazimnya’ di dekat ujung depan tubuhnya, tetapi hewan ini juga telah menciptakan kembali kaki jauh di ujung belakang. Kaki-kaki ciptaan ulangnya ini lebih lembek dan juga agak berbeda dari tipikal kaki-kaki tameng bersendi yang bertunas dari tiga segmen dadanya. Serangga juga biasanya memiliki sayap pada segmen ketujuh dan kedelapan. Beberapa serangga tidak memiliki sayap, dan leluhur mereka pun tidak pernah bersayap. Serangga yang lain, kutu dan semut pekerja misalnya, selama kurun evolusi telah kehilangan sayap yang pernah dimiliki para leluhurnya. Semut pekerja memiliki perlengkapan genetik untuk menumbuhkan sayap: Setiap pekerja bisa menjadi ratu jika dibesarkan dengan cara berbeda, dan ratu punya sayap. Menariknya, seekor semut

ratu biasanya kehilangan sayap saat masih hidup, kadang dengan menggigitnya hingga putus, setelah menyelesaikan misi penerbangan (kawin) dan siap untuk bermukim tetap di bawah tanah. Sayap mengganggu keleluasaan gerak sang ratu di bawah tanah. Demikian pula halnya kutu, yang hidup di hutan rambut atau bulu lebat inangnya.

Bila kutu telah kehilangan kedua pasang sayap mereka, lalat (ada banyak sekali jumlah anggota famili besar lalat, termasuk nyamuk) telah kehilangan sepasang sayap dan mempertahankan sepasang yang lain. Sepasang sayap kedua-



Gambar 7.11 Seluruh anggota famili lalat memiliki 'tongkat' penyeimbang (haltere) sebagai pengganti sepasang sayap kedua. Tampak jelas pada tubuh lalat besar seperti dua lalat ayak-ayak ini: (kiri) *Tipula maxima*; (kanan) *Ctenophora ornata* (kaki-kaki dan sayap kanan tidak ditunjukkan).

nya kini tinggal tonjolan-tonjolan kerdil, terletak persis di belakang sayap-sayap fungsionalnya (Gambar 7.11). Tidak perlu belajar ilmu teknik untuk tahu bahwa kedua tonjolan kecil itu bukan sayap. Namun perlu jadi insinyur terampil untuk memahami fungsi yang sesungguhnya. Kedua tonjolan itu agaknya berfungsi sebagai stabilisator, instrumen mungil di tubuh serangga yang tugasnya mirip dengan giroskop pada pesawat terbang atau roket. Kedua tongkat penyeimbang itu bergetar sesuai frekuensi kepakan sayap. Sensor-sensor renik di dasarnya mendeteksi gaya putar ke tiga arah yang, oleh pilot pesawat, dikenal dengan istilah *pitch*, *roll*, dan *yaw*. Sudah biasa bila evolusi bersifat oportunistis dan memanfaatkan hal yang sudah ada. Seorang insinyur perancang pesawat udara akan mendesain instrumen penstabil dari nol di papan gambarnya. Evolusi mencapai hasil yang sama dengan memodifikasi hal yang sudah ada, dalam hal ini, sayap.

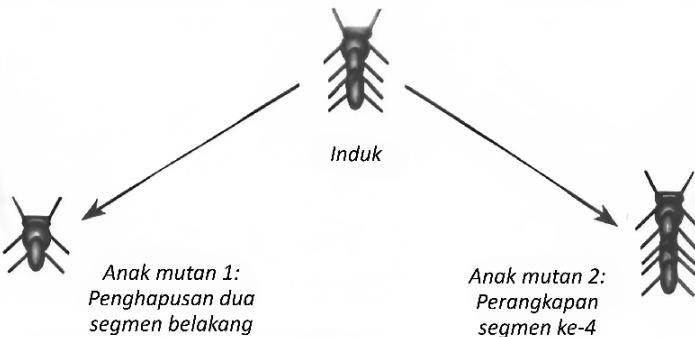
Evolusi kaleidoskopis bukan sekadar evolusi segmen tubuh hingga menjadi berbeda satu dengan yang lain. Justru sebaliknya. Tetapi ada mode-mode perubahan lain yang bisa kita anggap kaleidoskopis, dalam arti yang lebih rumit dari yang sejauh ini telah kita singgung. Seringnya, tubuh-tubuh artropoda memiliki struktur ibarat kalimat yang diapit tanda kurung. (Jika kalimat dibuka dengan tanda kurung [kurung sisisan <seperti ini> wajib digenapi dengan benar] dan tanda kurung buka yang pertama tadi akhirnya harus ditutup.) Kata-kata di dalam tanda kurung bisa dipanjangkan atau disingkat, tetapi sepanjang apa pun kata-kata pengisinya, setiap ‘(’ wajib digenapi dengan ‘)’. Kaidah ‘penggenapan yang benar’ ini juga berlaku untuk tanda kutip. Menariknya lagi, kaidah itu juga berlaku saat kita mengimbuahkan klausa terikat di dalam

kalimat. ‘Lelaki yang duduk di tiang’ ibarat kurung buka, yang menuntut untuk digenapi dengan kata kerja utama. Kita boleh berkata, ‘Lelaki itu melompat’, dan boleh berkata, ‘Lelaki yang duduk di tiang itu melompat’, tetapi kita tidak boleh berhenti di ‘Lelaki yang duduk di tiang’ kecuali ekspresi tersebut digunakan sebagai jawaban atas sebuah pertanyaan atau judul sebuah gambar, yang berarti pelengkapan kalimatnya tersirat. Kalimat-kalimat gramatikal menuntut penggenapan yang benar. Demikian pula, udang kecil (*shrimp*), udang besar (*prawn*), lobster, dan udang karang memiliki enam segmen kepala yang kesemuanya tersimpul di ujung depan, dan di ujung belakang ada segmen khusus yang disebut telson. Yang terjadi di antara kedua ujung itu lebih bervariasi.

Kita sudah menyinggung satu jenis mutasi kaleidoskopis, mutasi cermin yang dipantulkan ke berbagai bidang simetri. Mutasi ‘gramatikal’ dapat bersifat kaleidoskopis dalam arti yang lain. Sekali lagi, variasi yang diizinkan tetap dibatasi, tetapi kali ini bukan oleh simetri, melainkan oleh kaidah seperti: ‘Terlepas dari sevariatif apa jumlah sendi yang diizinkan di bagian tengah kaki, kaki wajib diakhiri dengan cakar’. Saya dan Ted Kaehler, dari Apple Computer Company, berkolaborasi untuk mengembangkan program komputer yang mengejawantahkan aturan-aturan seperti ini. Seperti program Blind Watchmaker, tetapi ‘hewan-hewan’ yang dihasilkannya disebut artromorf dan embriologinya memuat aturan-aturan yang tidak ada pada biomorf. Artromorf komputer adalah rangkaian tubuh-tubuh tersegmentasi layaknya artropoda sungguhan. Tiap segmen memiliki bagian tubuh yang agak bundar – bentuk dan ukuran persisnya dikontrol oleh ‘gen-gen’ seperti gen-gen biomorf. Tiap segmen

boleh jadi memiliki kaki bersendi yang mencuat di tiap sisi, boleh jadi tidak. Itu pun dikontrol oleh gen-gen; demikian pula dengan ketebalan kaki, jumlah sendi, panjang tiap sendi, dan sudut tiap sendinya. Boleh jadi ada cakar di ujung sebuah kaki, boleh jadi tidak. Dan itu pun, beserta bentuknya, dikontrol oleh gen-gen.

Jikalau artromorf memiliki embriologi yang sejenis dengan biomorf, akan ada sebuah gen yang disebut *NSeg* yang menentukan jumlah segmen. *NSeg* cukup diberi nilai, yang dapat bermutasi. Jika *NSeg* bernilai sebelas, hewannya akan memiliki sebelas segmen. Akan ada lagi gen yang disebut *NJoint* yang mengontrol jumlah sendi pada tiap tungkai. Sevariatif apa pun kelihatannya – dan variasi tersebut merupakan kebanggaan dan kebahagiaan saya – semua biomorf di ‘taman safari’ Gambar 1.16 memiliki jumlah gen yang sama persis, yaitu enam belas. Biomorf-biomorf asli di buku *Pembuat Arloji yang Buta* hanya memiliki sembilan gen. Biomorf-biomorf berwarna memiliki lebih banyak gen (tiga puluh enam) dan programnya harus ditulis ulang total untuk dapat mengakomodasi jumlah gen tersebut. Ketiganya program yang berbeda-beda. Namun, bukan seperti itu cara kerja artromorf. Mereka tidak memiliki repertoar gen dalam jumlah baku. Sistem genetik mereka lebih fleksibel (hanya pembaca dari kalangan pencinta dunia pemrogramanlah yang ingin tahu bahwa gen-gen artromorf disimpan dalam format *Linked List* dengan *Pointer*, sementara gen-gen biomorf disimpan dalam format *Pascal Record* yang baku). Gen-gen baru dapat muncul secara semerta dalam evolusi artromorf dengan duplikasi gen-gen lama. Terkadang, gen diduplikasi satu kali setiap waktu. Terkadang, diduplikasi dalam klaster-

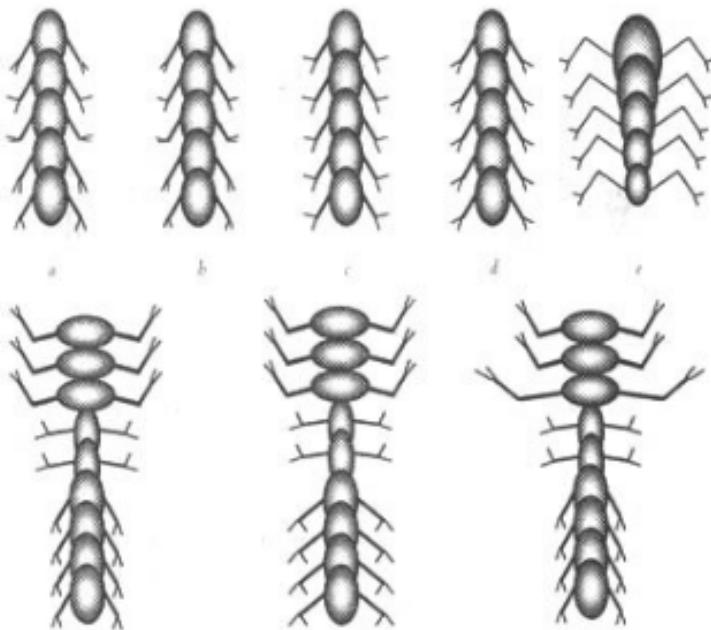


Gambar 7.12 Artromorf dengan jumlah segmen yang berbeda-beda. Induk di bagian atas memiliki dua keturunan mutan.

klaster yang disusun secara hierarkis. Artinya, secara teoretis, anak mutan dapat memiliki gen-gen dua kali lipat dari induknya. Bila sebuah atau sekelompok gen baru muncul melalui proses perangkapan, gen-gen baru tersebut akan mulai dengan nilai yang sama seperti nilai gen sumber perangkapannya. Penghapusan adalah jenis mutasi yang dimungkinkan, demikian pula perangkapan, sehingga jumlah gen dapat mengecil, dapat pula membesar. Perangkapan dan penghapusan menjelma sebagai perubahan pada rupa tubuh dan, oleh karenanya, terpajan seleksi (untuk kasus biomorf, seleksi buatan melalui mata manusia). Kerap kali, perubahan jumlah gen termanifestasi sebagai perubahan jumlah segmen (Gambar 7.12). Dapat pula termanifestasi sebagai perubahan jumlah sendi pada sebatang tungkai. Pada kedua kasus tersebut, fenomena yang muncul adalah kecenderungan ‘gramatikal’ di mana segmen-segmen tengah berubah-ubah, sementara segmen depan dan belakang utuh.

Perangkapan atau penghapusan segmen dapat terjadi di tengah-tengah tubuh seekor binatang, tidak cuma diujungnya. Dan perangkapan atau penghapusan sendi dapat terjadi di tengah-tengah tungkai, tidak cuma diujungnya. Inilah watak ‘gramatikal’ pada embriologi artromorf: kemampuannya untuk menghapus, atau menggabung, hal yang sepadan dengan klausa adjektival atau klausa preposisional, di tengah-tengah ‘kalimat’ yang panjang. Terlepas dari sifat penggenapan ‘gramatikalnya’, artromorf juga memiliki gelagat embriologi kaleidoskopis yang lain. Tiap detail kuantitatif dari tubuh artromorf (contohnya, sudut dari sebuah kuku cakar, atau lebar dari sebuah segmen) dipengaruhi oleh tiga gen yang melipatgandakan nilai-nilai numeriknya dengan cara yang akan saya jelaskan sekarang ini. Ada satu gen khusus untuk segmen terkait, satu gen yang berlaku untuk seluruh tubuh hewannya, dan satu gen yang berlaku untuk subrangkaian segmen, yang diistilahkan tagma. Tagma adalah istilah yang berasal dari ilmu biologi. Contoh-contoh tagma pada hewan sungguhan adalah toraks dan abdomen serangga.

Untuk tiap detail tertentu, seperti sudut cakar, ketiga gen yang berpadu untuk memengaruhinya adalah sebagai berikut. Pertama, gen yang dikhususkan untuk tiap-tiap segmen. Gen ini sama sekali tidak kaleidoskopis karena, ketika bermutasi, ia hanya memengaruhi segmen yang terkait. Gambar 7.13a menunjukkan artromorf yang tiap segmennya memiliki nilai gen tataran-semen yang berbeda untuk sudut cakar. Hasilnya adalah tiap segmen memiliki sudut cakar yang berbeda. Sambil lalu, semua artromorf memiliki simetri kiri-kanan yang sederhana.



Gambar 7.13 Artromorf yang dipilih untuk menunjukkan beragam jenis efek genetik: (a) artromorf dengan aneka gen sudut cakar untuk tiap segmen; (b) mutasi gen seluruh tubuh untuk sudut cakar; (c) artromorf tanpa variasi di antara segmen-segmennya; (d) sama dengan (c) tetapi dengan satu buah mutasi yang memengaruhi gen seluruh tubuh untuk sudut cakar; (e) gradien ukuran segmen, yang tidak memengaruhi tungkai; (f) artromorf dengan tiga tagma, berbeda-beda untuk beberapa fiturnya tetapi seragam di dalam tiap tagma; (g) sama dengan (f) tetapi dengan sebuah mutasi yang memengaruhi tungkai di tataran tagma (ketiga); (h) mutasi dari (f) yang memengaruhi tungkai pada satu segmen saja.

Beralih ke gen kedua dari tiga gen yang memengaruhi, misalnya, sudut cakar. Gen ini adalah gen yang memengaruhi seluruh segmen pada tubuh hewannya. Bila gen ini bermutasi, cakar di semua segmen serentak berubah, di sepanjang tubuh si hewan. Gambar 7.13b menunjukkan artromorf yang sama

dengan Gambar 7.13a kecuali bahwa cakar-cakarnya sedikit ditarik – dipendekkan. Gen yang memengaruhi ukuran cakar pada tataran seluruh tubuh hewannya telah bermutasi ke nilai yang lebih kecil. Alhasil, tiap-tiap cakarnya mengerdil, sembari tetap mempertahankan keunikan-keunikan di segmennya masing-masing. Seperti tadi saya katakan, secara matematis efek ini dicapai dengan mengalikan nilai numerik tiap gen level-semen untuk sudut cakar dengan nilai numerik gen level-tubuh untuk sudut cakar. Tentu saja, sudut cakar hanyalah satu dari banyak detail kuantitatif yang secara serentak ditentukan oleh perkalian serupa di sepanjang ‘kereta’. Ada gen-gen seluruh tubuh yang memengaruhi, misalnya, panjang kaki, dan gen-gen ini mengalikan nilai-nilainya dengan gen-gen pada tataran segmen untuk panjang kaki. Gambar 7.13c dan d menunjukkan artromorf yang tidak memiliki variasi di antara segmen-segmennya, tetapi berbeda-beda pada tataran gen organisme utuhnya untuk sudut cakar.

Golongan gen yang ketiga memengaruhi wilayah terbatas pada tubuh, sebuah tagma seperti toraks pada serangga. Bila serangga memiliki tiga tagma, artromorf berevolusi untuk jumlah apa pun, dan tiap tagma dapat memiliki berapa segmen pun: perubahan pada jumlah segmen dan jumlah tagma itu sendiri dipengaruhi oleh mutasi secara ‘gramatikal’ yang telah kita bahas tadi. Tiap tagma memiliki sepaket gen yang memengaruhi bentuk tubuh dan tungkai dan cakar di dalam tagma tersebut. Contohnya, tiap tagma memiliki gen yang memengaruhi sudut dari semua cakar di dalam tagma itu. Gambar 7.13f menunjukkan artromorf dengan tiga tagma. Sebagian besar detailnya berbeda-beda dari tagma ke tagma, lebih dari di dalam tiap tagma itu sendiri. Efeknya dicapai

dengan perkalian nilai-nilai gen, dengan cara yang sama seperti yang telah kita lihat untuk gen-gen seluruh tubuh.

Ringkasnya, ukuran akhir tiap atribut, misalnya sudut cakar, didapatkan dengan mengalikan nilai-nilai numerik ketiga gen itu: gen segmen untuk sudut cakar, gen tagma untuk sudut cakar, dan gen organisme utuh untuk sudut cakar. Karena bilangan yang dikali dengan nol sama dengan nol, apabila, misalnya, nilai sebuah gen untuk ukuran tungkai pada sebuah tagma adalah nol, segmen-semen tagma tersebut tidak akan memiliki tungkai sama sekali, seperti segmen abdominal tawon, terlepas dari nilai-nilai gen pada dua tataran lainnya. Gambar 7.13g menunjukkan entitas anak artromorf pada Gambar 7.13f, yang telah memutasikan sebuah gen untuk ukuran tungkai di tataran tagma ketiga. Gambar 7.13h adalah entitas anak lain dari artromorf pada Gambar 7.13f, tetapi kali ini sebuah gen yang berkenaan dengan hanya satu segmen telah bermutasi.

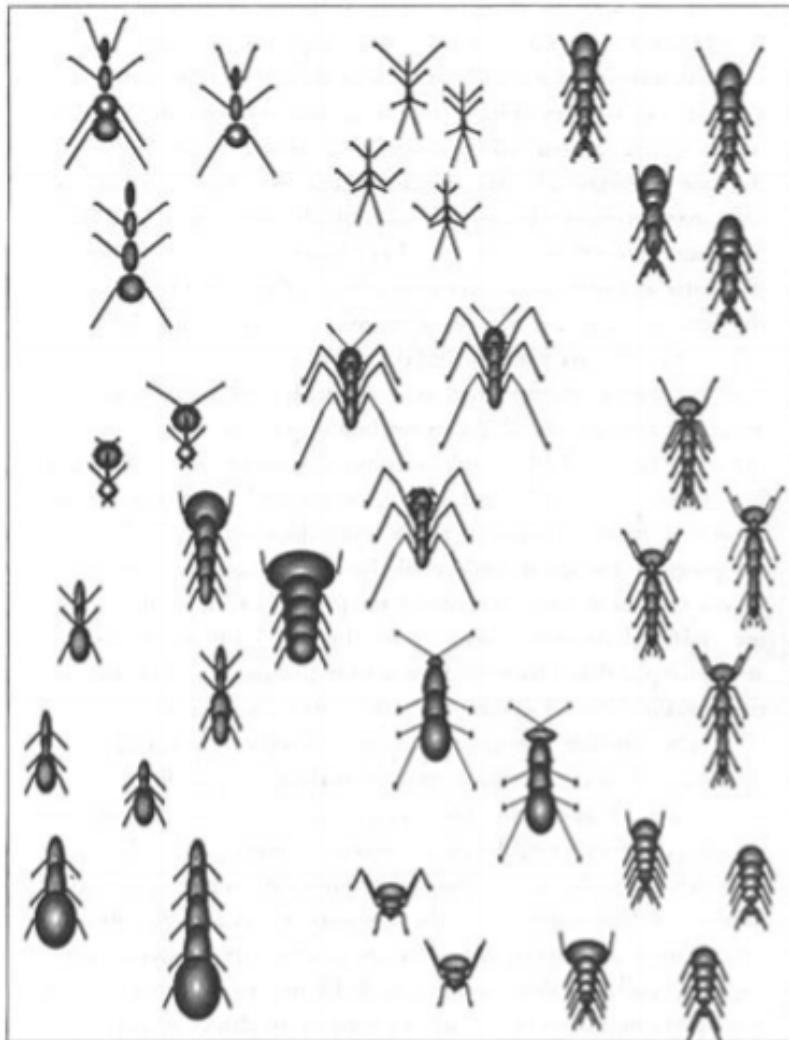
Maka dari itu, artromorf memiliki embriologi kaleidoskopis tiga jenjang. Artromorf dapat bermutasi di satu segmen dan, dalam hal itu, perubahannya dicerminkan hanya sekali, di sisi seberang tubuhnya. Embriologinya juga kaleidoskopis di level 'lipan' atau organisme utuhnya: Mutasi di level ini diulang secara spasial hingga ke sekujur tubuh (dan dicerminkan kiri-kanan juga). Dan kaleidoskopis di level antara, 'serangga', atau tagma: Mutasi di level ini memengaruhi seluruh segmen pada satu klaster segmen lokal, tetapi tidak hingga ke sekujur tubuh. Saya menduga bahwa, jika artromorf hidup di dunia nyata, mutasi-mutasi kaleidoskopis tiga jenjangnya ini mungkin akan mendatangkan manfaat, karena sebab-sebab sejenis yang ada dalam ekonomi evolusi, sebagaimana telah

kita bahas untuk kasus cermin-cermin simetri. Jika, katakanlah, tungkai-tungkai tagma tengah pada tubuh berfungsi sebagai kaki-kaki jalan, sementara tungkai-tungkai tagma belakang pada tubuh berfungsi sebagai insang, masuk akal bila peningkatan evolusinya mesti diulang secara serial di sepanjang segmen-segmen di satu tagma, tetapi tidak di tagma yang lain: peningkatan untuk apendase (embelan) jalan kemungkinan besar tidak bermanfaat bagi embelan napas. Maka, boleh jadi ada untungnya punya golongan mutasi yang, ketika muncul pertama kali, sudah dicerminkan di semua segmen sebuah tagma. Di lain pihak, boleh jadi ada untung yang lebih spesifik jika penyesuaian mendetail dan khusus dilakukan pada tungkai di segmen-segmen tertentu. Dalam hal ini, embriologi yang memiliki kecenderungan tambahan untuk memunculkan mutasi yang hanya dicerminkan kiri-kanan boleh jadi dipilih. Terakhir, ada kalanya, ada untungnya bila mutasi muncul serentak di seluruh segmen tubuh, tidak sepenuhnya mengesampingkan variasi yang sudah ada di antara semua segmen dan di antara semua tagma, tetapi justru memberinya bobot, contohnya dengan perkalian.

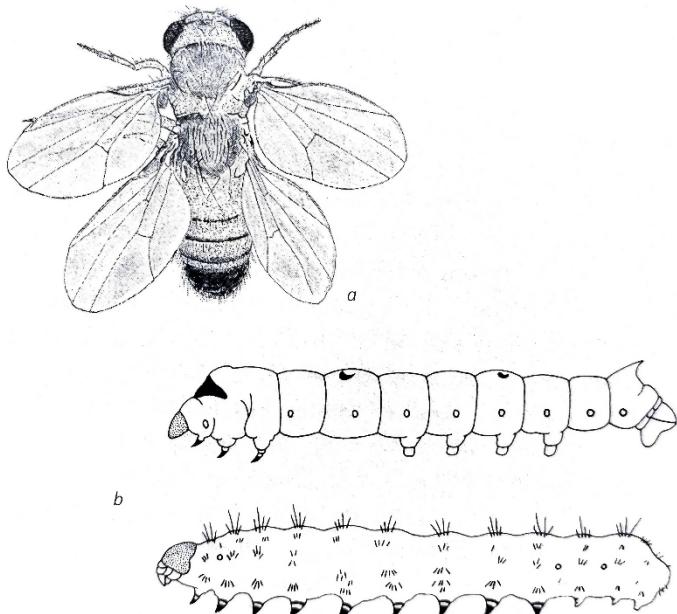
Terinspirasi dari kenyataan biologis di dunia hayati, saya dan Ted Kaehler memasukkan gen-gen ‘gradien’ ke dalam program artromorf kami. Gen gradien memastikan bahwa satu kualitas tertentu dari artromorf, seperti sudut cakar, tidak baku dari depan ke belakang tubuh, tetapi meningkat (atau menurun) secara progresif. Gambar 7.13e menunjukkan artromorf tanpa variasi di antara segmen-segmennya selain gradien ukuran yang mengecil dari segmen ke segmen. Tubuhnya melancip dari depan ke belakang.

Artromof berkembang biak, dan berevolusi, melalui seleksi buatan, dengan mekanisme yang sejenis dengan biomorf. Artromorf induk ada di tengah layar, dikelilingi keturunannya yang bermutasi secara acak. Seperti halnya biomorf, pemilih tidak melihat gen, hanya konsekuensinya saja – bentuk tubuh – dan memilih yang ingin dibiakkan (dan, sekali lagi, secara aseksual). Artromorf terpilih beranjak ke tengah layar dan dikelilingi dengan kerumunan keturunan mutannya. Seiring generasi berganti generasi, perubahan jumlah gen, dan perubahan nilai gen, terjadi di balik layar melalui mutasi acak. Yang tampak di mata pemilih adalah rangkaian artromorf yang berevolusi secara gradual. Bila semua biomorf komputer boleh dikata telah dibiakkan dari  , semua artromorf boleh dikata telah dibiakkan dari  . Arsiran rapi segmen-semen tubuh untuk membuatnya tampak padat adalah sentuhan untuk mempercantik saja dan tidak bervariasi di program yang sekarang, meski dapat dengan mudah dibuat agar berada dalam kendali genetik (tiga jenjang) di versi-versi program mendatang. Sebanding dengan taman safari biomorf Gambar 1.16, Gambar 7.14 adalah kebun binatang artromorf yang telah dibiakkan dari waktu ke waktu melalui seleksi buatan, biasanya dengan memilih bentuk yang agak-agak mirip dengan makhluk biologis sungguhan.

Kebun binatang ini memuat rupa-rupa yang bervariasi di semua level embriologi kaleidoskopisnya. Kita dapat mengenali makhluk-makhluk dengan tubuh melancip sebagai tubuh yang memiliki sedikitnya satu gen gradien. Kita dapat mengenali pembagian jelas menjadi tagma-tagma: kelompok-kelompok segmen yang bersebelahan lebih mirip ketimbang dengan segmen-semen lainnya. Tetapi kita tetap dapat me-



Gambar 7.14 Kebun binatang artromorf. Koleksi artromorf yang dibiakkan melalui seleksi buatan pandangan mata yang untuk mencari kemiripan, sesamar apa pun, dengan artropoda sungguhan.



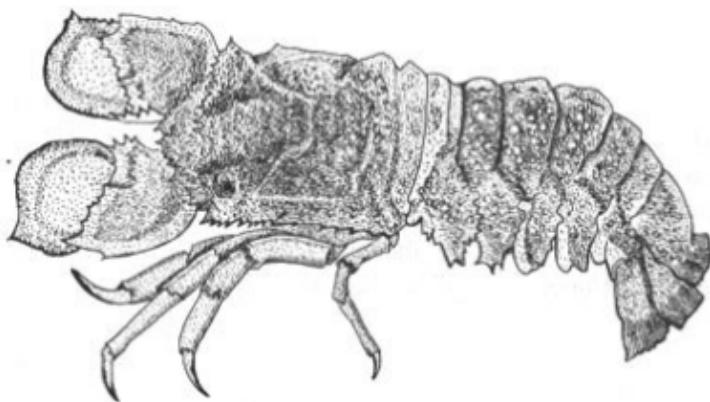
Gambar 7.15 Mutasi homeotis: (a) *Drosophila* bersayap empat. Pada *Drosophila* yang normal, sepasang sayap kedua digantikan oleh tongkat-tongkat penyeimbang, sebagaimana di Gambar 7.11; (b) ulat sutra normal (atas) dan mutan (bawah). Biasanya, kaki-kaki serangganya hanya terdapat pada tiga segmen toraks. Hewan mutan ini memiliki sembilan segmen 'toraks'.

ngenali variasi rupa di antara segmen-segmen dalam satu tagma sekalipun. Hewan insekta, krustasea, dan laba-laba sungguhan bervariasi dengan cara kaleidoskopis berjenjang yang serupa. Contoh paling jelasnya adalah mutasi homeotis artropoda sungguhan, mutasi yang menyebabkan satu segmen berubah dan mengikuti pola perkembangan yang normal pada segmen yang lain.

Gambar 7.15 menunjukkan contoh mutasi homeotis pada lalat buat *Drosophila* dan ulat sutra. *Drosophila* normal, seperti semua lalat lainnya, hanya memiliki sepasang sayap. Sepasang sayap kedua digantikan oleh tongkat penyeimbang, sebagaimana telah dijelaskan di atas. Gambar ini menunjukkan seekor *Drosophila* mutan yang, tidak hanya memiliki sepasang sayap kedua (alih-alih sepasang tongkat penyeimbang), tetapi segmen toraks keduanya direduplikasi untuk menggantikan segmen toraks ketiga. Pada artromorf, efek ini akan dicapai dengan perangkapan ‘gramatikal’ yang diikuti dengan penghapusan. Gambar 7.15b menunjukkan seekor ulat sutra mutan. Ulat sutra normal memiliki tiga kaki bersendi ‘wajar’ seperti serangga lainnya meskipun, seperti telah saya utarakan, segmen-segmen belakang memiliki kaki ‘gubahan’ yang lebih lunak. Namun, ulat mutan di bagian bawah Gambar 7.15 memiliki sembilan pasang kaki bersendi yang ‘wajar’. Ini dikarenakan segmen-segmen tagma toraksnya telah dirangkap, persis seperti artromorf di sisi kanan Gambar 7.12. Mutasi homeotis paling terkenal adalah ‘antennapedia’ pada lalat buah *Drosophila*. Pada tubuh lalat dengan mutasi ini, mencuat kaki yang tampak normal dari soket tempat antena seharusnya berada. Mesin pembuat kakinya telah dinyalakan di segmen yang keliru.

Mutan-mutan seperti ini cukup ganjil dan kemungkinan besar tidak dapat bertahan hidup di alam liar – dengan kata lain, evolusi agaknya tidak akan membawa serta mutasi homeotis. Itulah mengapa saya sampai harus melihat dua kali saat sedang berjalan (agak tergesa, karena saya gampang mual) melewati sebuah meja dengan setumpuk tinggi hidangan sari laut berkaki di sebuah acara jamuan makan di Australia.

Hewan yang menarik perhatian saya, di tata boga Australia, dikenal dengan nama *deepwater bug*. Hewan ini sejenis lobster, anggota kelompok hewan yang dikenal dengan bermacam nama di seluruh dunia: lobster sandal, lobster Spanyol, dan lobster hidung sekop. Gambar 7.16 menunjukkan spesimen tipikal, yang dipinjam dari Museum Oxford, dari genus *Scyllarus*. Yang mencolok dari hewan ini adalah tubuhnya yang tampak memiliki dua ujung belakang. Ilusi ini timbul karena antena-antena di depan (persisnya, sepasang antena kedua) tampak seperti embelan yang disebut uropoda, yang merupakan ciri paling kentara dari ujung belakang semua lobster. Saya tidak tahu alasan antenanya berbentuk seperti itu. Mungkin karena dipakai sebagai sekop, atau mungkin untuk mengecoh pemangsa dengan ilusi yang juga mengesankan saya. Lobster punya refleks mundur yang amat cepat, menggunakan sel saraf raksasa yang dikhususkan



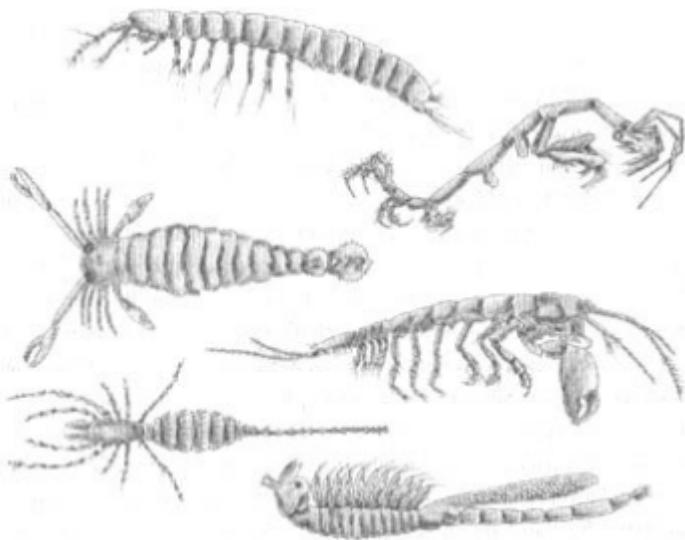
Gambar 7.16 Mungkinkah ini mewakili mutan homeotis yang telah sukses secara evolusi di alam liar? *Scyllarus*, lobster hidung sekop.

untuk tujuan itu. Hewan ini memelesat mundur dengan kecepatan yang mengherankan saat merasa terancam. Pemangsa dapat mengantisipasi refleks ini dengan membidik gerak ke belakang posisi terakhir lobster. Siasat itu mungkin ampuh untuk lobster biasa, tetapi untuk *Scyllarus*, yang tampak seperti bagian ‘belakang’ ternyata bagian depan, dan pemangsa yang hendak mencegat bisa menerkam ke arah yang salah. Terlepas dari benar tidaknya spekulasi ini, lobster-lobster ini agaknya memetik manfaat dari antena-antena berbentuk ganjilnya itu. Apa pun manfaatnya itu, saya akan mendorong hewan-hewan ini ke spekulasi yang lebih membabi buta lagi. Prasaran saya adalah bahwa *Scyllarus* boleh jadi merupakan contoh mutasi homeotis di alam liar, yang sepadan dengan antennapedia pada *Drosophila* di laboratorium. Berbeda dari antennapedia, mutasi ini telah diikutsertakan ke dalam perubahan evolusi nyata di alam. Sementara ini saya menduga bahwa seekor Scyllarid leluhur bermutasi secara homeotis, menyisipkan subrutin perkembangan organ uropoda ke dalam segmen tempat antena biasa berada, dan bahwa perubahannya mendatangkan semacam manfaat. Jika saya benar, ini akan menjadi contoh langka dipilihnya makromutasi oleh seleksi alam: pembuktian langka atas teori ‘monster harapan’ yang kita singgung di Bab 3.

Itu semua sangat spekulatif. Mutasi homeotis tentu terjadi di laboratorium, dan para ahli embriologi menggunakannya sebagai inspirasi untuk membangun gambaran mendetail mekanika perkembangan denah tubuh segmental artropoda. Meski sangat menarik, semua perincian ini berada di luar lingkup bab ini. Saya akan simpulkan dengan mengajak

pembaca untuk mencermati beberapa artropoda sungguhan dengan menimbang artromorf komputer dan mutasi kaleidoskopis tiga jenjangnya.

Lihatlah hewan-hewan artropoda sungguhan di Gambar 7.17 dan bayangkan proses evolusi rupa mereka melalui gen-gen kaleidoskopis ala artromorf. Apakah ada di antara mereka yang, misalnya, memiliki pola melancip yang kita lihat di Gambar 7.13e? Sekarang, kembali melihat hewan-hewan artropoda sungguhan, bayangkan mutasi yang mengubah detail kecil pada ujung-ujung tungkai, atau detail bentuk area batang tubuh segmen-segmennya. Pertama, bayangkan mutasi imajinatif itu berlaku hanya pada satu segmen saja. Dugaan saya, Anda secara otomatis membayangkannya dicerminkan di sisi kiri dan kanan, tetapi ini tidak tak terelakkan. Itulah contoh embriologi kaleidoskopis. Sekarang, bayangkan mutasi yang memengaruhi ujung-ujung tungkai, tetapi kali ini tungkai-tungkai dari serangkaian segmen yang bersebelahan. Hewan-hewan pada Gambar 7.17 menunjukkan beberapa contoh rangkaian segmen-semen bersebelahan yang mirip satu dengan yang lain. Ketiga, bayangkan mutasi yang serupa, tetapi yang memengaruhi ujung-ujung kaki di semua segmen tubuhnya (yakni, semua segmen yang memiliki tungkai). Saya merasa, pengalaman membayangkan artromorf dan embriologi kaleidoskopis tiga jenjangnya membuat saya melihat artropoda nyata, seperti individu-individu pada Gambar 7.17, seolah melalui sudut pandang baru. Selain itu, seperti pada kasus cermin-cermin simetri, mudah membayangkan bahwa embriologi dengan ‘batasan-batasan’ kaleidoskopis ala artromorf boleh jadi terbukti lebih kaya akan potensi evolusi ketimbang embriologi



Gambar 7.17 Yang bisa dilakukan dengan segmen: contoh hewan artropoda. Searah jarum jam dari kiri atas: empat krustasea, kalajengking mini (berkerabat jauh dengan laba-laba dan kalajengking), dan eurypterida ('kalajengking laut' raksasa yang sudah punah, dan mampu mencapai panjang tubuh hampir tiga meter).

yang lebih longgar dan leluasa. Bentuk-bentuk di Gambar 7.17, dan bentuk-bentuk sekian banyak artropoda lain yang tidak diilustrasikan di sini, tampak bagi saya jadi lebih masuk akal jika ditimbang dengan cara pikir ini.

Pesan inti dari bab ini adalah bahwa embriologi kaleidoskopis, entah yang berlaku melalui segmen-semen dan klaster segmen-semen yang disusun berbaris dari depan ke belakang seperti pada seekor serangga, entah melalui 'cermin-cermin' simetri seperti pada seekor ubur-ubur, merupakan batasan sekaligus peningkatan. Kedua embriologi ini mengekang

evolusi dengan membatasi kisaran variasi yang dapat digarap oleh seleksi alam. Keduanya pun memajukan evolusi dengan – dalam bahasa yang memersonifikasi seleksi – mencegah seleksi alam untuk buang-buang waktu menjelajahi kawasan luas di ruang penelusuran yang memang takkan baik jadinya. Dunia ini dihuni kelompok-kelompok besar hewan – artropoda, moluska, echinodermata, vertebrata – yang masing-masing memiliki sebentuk embriologi yang dibatasi secara kaleidoskopis, yang terbukti subur dengan hasil evolusi. Embriologi kaleidoskopis memenuhi syarat untuk mewarisi bumi. Bilamana perubahan besar dalam mode atau ‘cermin’ kaleidoskopis telah melahirkan persebaran evolusi yang berhasil, cermin atau mode yang baru itu akan diwarisi oleh silsilah-silsilah dalam persebaran tersebut. Ini bukan seleksi Darwinian biasa, melainkan sejenis analogi tingkat tinggi atas seleksi Darwinian. Maka tak terlalu berlebihan jika disarankan bahwa, sebagai konsekuensinya, telah terjadi evolusi evolvabilitas yang meningkat.

## BAB 8

### SERBUK SARI DAN PELURU AJAIB

SAYA SEDANG BERKENDARA MENYUSURI DAERAH PEDESAAN Inggris dengan putri saya Juliet, yang saat itu berusia enam tahun, waktu ia menunjuk ke arah bunga-bunga di tepi jalan. Saya bertanya kepadanya untuk apa kiranya bunga-bunga liar itu. Jawaban Juliet cukup bijak. ‘Dua hal,’ katanya. ‘Untuk mempercantik dunia dan membantu lebah membuat madu untuk kita’. Saya terharu dan menyesal karena harus memberitahunya bahwa itu keliru.

Jawaban putri cilik saya itu tak jauh berbeda dari jawaban yang dilontarkan rata-rata orang dewasa, di sepanjang sejarah. Dari dahulu, telah luas diyakini bahwa makhluk-makhluk hidup diciptakan untuk kebaikan kita. Kitab Kejadian I dengan gamblang menyatakan itu. Manusia ‘berkuasa’ atas semua benda yang hidup, dan binatang serta tumbuhan ada untuk kita nikmati dan gunakan. Seperti ditulis oleh sejarawan Sir Keith Thomas dalam bukunya *Man and the Natural World*, sikap ini merasuki seluruh umat Kristen abad pertengahan dan bertahan hingga sekarang. Pada abad ke-19, Pendeta William Kirby mengira kutu adalah rangsangan yang sangat diperlukan untuk menggalakkan kebersihan. Binatang-binatang buas, menurut uskup era Elizabeth, James Pilkington, menempa keberanian manusia dan menjadi lawan latih tempur yang berguna. Langau, bagi seorang penulis abad ke-18, diciptakan agar ‘manusia mengamalkan kepandaian dan keuletannya untuk menghalau hewan-hewan itu.’ Lobster dilengkapi

cangkang keras supaya, sebelum memakannya, kita memetik manfaat dari olahraga meretakkan cakar-cakarnya. Seorang penulis saleh abad pertengahan yang lain berpikir bahwa rumput liar ada untuk kebaikan kita: Kerja keras menyianginya baik untuk jiwa kita.

Binatang telah dianggap beruntung karena ikut menanggung hukuman kita atas dosa Adam. Keith Thomas mengutip seorang uskup abad ke-17 berkenaan dengan hal ini: 'Segala cobaan yang datang menimpa mereka bukanlah hukuman bagi mereka, melainkan bagian dari hukuman kita.' Ah, rasarasanya, sungguh penghiburan dahsyat bagi bangsa hewan. Henry More, pada 1653, percaya bahwa lembu dan domba terlebih dahulu diberi nyawa agar dagingnya tetap segar 'hingga kita perlu memakan mereka'. Kesimpulan logis dari adicita abad ke-17 ini adalah bahwa binatang memang gandrung untuk dimakan.

Pegar, ayam, dan burung dara  
Terbang ke baitmu, bak ke Bahtera.  
Lembu jantan dan domba rela datang  
Minta disembelih di dalam kandang;  
Dan setiap binatang beranjak ke lapangan  
Menawarkan diri jadi kurban persesembahan.

Douglas Adams melukiskan kecanggukan ini dalam sebuah simpulan yang gaib bin garib di novel futuristiknya *The Restaurant at the End of the Universe*, bagian dari saga *Hitchhiker's Guide to the Galaxy* yang cemerlang itu. Saat tokoh utama dan para karibnya duduk di restoran, seekor kaki empat mendekati meja mereka dengan penuh hormat dan, dengan tutur kata yang halus berbudaya, menawarkan diri untuk menjadi santapan. Ia menjelaskan bahwa bangsanya

telah dibiakkan untuk ingin dimakan dan untuk mampu mengutarakannya dengan jelas dan lugas. ‘Barangkali Tuan-Tuan ingin daging dari bagian dekat bahu?... Disemur dengan saus anggur putih?...Atau, maaf, bagian bokong jugalezat... Sengaja saya latih khusus, dan saya banyak makan gandum, jadi dagingnya tebal dan lemak.’ Arthur Dent, tamu dengan jam terbang antargalaksi paling minim, bergidik ngeri sementara rombongan sisanya memesan bistik porsi besar dan makhluk lemah lembut itu, penuh syukur, menderap langkahnya ke dapur, untuk menembak dirinya sendiri (dengan cara yang manusiawi, imbuhnya, sambil melempar kerling untuk menenangkan Arthur).

Cerita Douglas Adam jelas-jelas komedi, tetapi saya yakin betul, uraian tentang pisang berikut ini, yang dikutip tanpa perubahan dari sebuah terbitan modern yang dikirim oleh salah seorang dari banyak sahabat pena kreasionis saya, disusun dengan niat yang sungguh-sungguh.

Perhatikan bahwa pisang:

1. Dibentuk pas dengan tangan manusia
2. Permukaannya antiselip
3. Punya penanda luar mengenai isinya: Hijau – terlalu dini; Kuning – pas; Hitam – sudah terlambat
4. Punya punca untuk membuka bungkusnya
5. Bungkusnya berpori-pori
6. Bungkusnya mengurai alami
7. Dibentuk sesuai mulut
8. Ujungnya lancip sehingga mudah masuk
9. Terasa nikmat di lidah
10. Melengkung ke arah wajah sehingga proses memakannya mudah.



Sikap bahwa benda-benda hidup ada di dunia demi kebaikan kita masih mendominasi kebudayaan manusia, sekalipun dasar-dasar pikirnya sudah sirna. Untuk tujuan pemahaman ilmiah, kita perlu mencari cara pandang yang tidak homosentris atas dunia hayati. Kalaupun hewan dan tumbuhan liar dapat dikatakan ada di dunia untuk tujuan tertentu – dan ada majas yang baik untuk mengutarakan hal itu – sudah pasti tujuan itu bukan demi kebaikan manusia. Kita harus belajar melihat dunia dengan mata tan-manusia. Pada contoh bunga-bunga, yang menjadi pembuka bahasan kita, setidaknya lebih masuk akal untuk mencermatinya dengan mata lebah dan makhluk lain yang menyerbuki mereka.

Lebah, segenap hidupnya berkitar di seputar puspa loka yang warna-warni, harum raksi, dan bergelimang madu. Bukan hanya lebah madu, karena spesies lebah ada ribuan jumlahnya dan semuanya bergantung penuh pada bunga. Larva mereka diberi makan serbuk sari, sementara bahan bakar khusus untuk mesin terbang lebah dewasa adalah nektar, yang sepenuhnya juga disediakan untuk mereka oleh bunga. Bila saya katakan ‘disediakan untuk mereka’, maksud saya bukan berarti lebah tinggal berleha-leha. Serbuk sari, bedanya dari nektar, tidak semata-mata ada untuk lebah karena tumbuhan membuatnya terutama untuk kepentingan mereka sendiri. Lebah boleh memakan sebagian daripadanya karena mereka memberikan jasa yang berharga, mengangkut serbuk sari dari bunga ke bunga. Tetapi nektar adalah perkara yang lebih ekstrem. Tak ada alasan dan tujuan selain untuk memberi makan lebah. Nektar diproduksi, dalam jumlah besar, semata-mata untuk menyuap lebah dan hewan penyerbuk lainnya. Lebah bekerja keras untuk imbalan nektar mereka. Untuk

membuat sekitar 450 gram madu, lebah harus melawat ke sekitar sepuluh juta bunga mekar.

‘Bunga,’ kata lebah andai ia bisa bicara, ‘ada untuk memberikan serbuk sari dan nektar bagi kami-kami, bangsa lebah ini’. Bahkan lebah pun tak sepenuhnya benar. Tapi lebih banyak benarnya ketimbang kita manusia jika menyangka bunga ada untuk kebaikan kita. Kita bahkan mungkin boleh berkata bahwa bunga, setidaknya yang elok dan pus�ita, menjadi elok dan pus�ita karena ‘dibudidayakan’ oleh lebah, kupu-kupu, kolibri, dan hewan penyerbuk lainnya. Ceramah saya yang menjadi dasar dari bab ini berjudul *‘The Ultraviolet Garden’* (‘Kebun Ultraviolet’). Judul ini perumpamaan. Sinar



Gambar 8.1 (a) bunga mawar malam (*evening primrose*), *Oenothera*, difoto dengan cahaya yang dapat dilihat (oleh manusia); (b) sama, difoto dengan sinar ultraviolet (yang dapat dilihat serangga, tetapi tidak oleh kita) untuk menunjukkan corak berbentuk bintang di tengah-tengahnya. Agaknya, corak ini menjadi rambu pandu bagi serangga ke nektar dan serbuk sarinya.

ultraviolet adalah sejenis sinar yang tak dapat kita lihat. Tapi lebah bisa, dan mereka melihatnya sebagai warna khas, yang kadang diistilahkan ungu lebah. Bunga mestilah tampak jauh berbeda jika dilihat dengan mata lebah (Gambar 8.1). Oleh karena itu, pertanyaan ‘Bunga baik untuk tujuan apa?’ adalah pertanyaan yang baiknya kita tilik melalui mata lebah, bukan mata manusia.

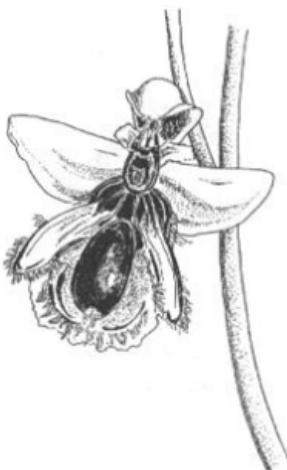
‘Kebun Ultraviolet’ memainkan keganjilan indra penglihatan lebah sekadar sebagai perumpamaan untuk mengubah perspektif kita tentang untuk siapa atau apa bunga dan semua makhluk hidup lainnya itu baik. Andai bunga punya mata, cara pandang mereka terhadap dunia kiranya tampak bagi kita lebih garib dari penglihatan ultraviolet lebah yang sudah aneh itu. Bagaimana kelihatannya lebah di mata sayur-sayuran? Lebah itu baik untuk apa, dari sudut pandang bunga-bunga? Mereka adalah peluru kendali untuk menembakkan serbuk sari dari satu bunga ke bunga yang lain. Latar belakang untuk hal ini perlu dijelaskan.

Pertama, ada alasan genetik yang umum dan kuat untuk lebih memilih pembuahan silang dengan serbuk sari dari tumbuhan lain. Pembuahan inses akan mengakibatkan hilangnya manfaat-manfaat reproduksi seksual (apa pun bentuknya, dan itu saja sudah jadi pertanyaan menarik). Pohon yang menyerbuki bunga-bunga betinanya dengan serbuk sari dari bunga-bunga jantannya sendiri – kepala tanggung, lebih baik sekalian saja tak perlu ada penyerbukan. Akan lebih efisien jika pohon itu menghasilkan klona vegetatif dari dirinya sendiri. Tentu, banyak tumbuhan yang melakukannya, dan memang ada manfaatnya. Namun, seperti telah kita lihat, pada kondisi dan situasi yang lain, pencampuran gen-gen satu

individu dengan gen-gen individu yang lain lebih bermanfaat. Penjelasan argumen-argumen mendetailnya akan membawa kita melenceng jauh dari duduk perkara bab ini, tetapi pastilah *roulette seksual* ini ada manfaat besarnya; kalau tidak, seleksi alam tidak akan mengizinkannya menjadi obsesi penggerak yang giat di antara hampir semua hewan dan tumbuhan. Apa pun itu, manfaat-manfaat tersebut akan banyak hilang jika, alih-alih mencampur gen dengan gen individu lain, yang terjadi justru mencampur gen dengan paket kedua dan identik dari gen-gen diri sendiri.

Peran bunga dalam kehidupan tumbuhannya hanyalah untuk bertukar gen dengan tumbuhan lain yang memiliki sekumpulan gen yang berbeda. Ada yang melakukan pertukaran itu dengan bantuan angin, rerumputan misalnya. Udara sarat akan serbuk sari, yang segelintir di antaranya cukup beruntung bisa mendarat di bagian-bagian betina sekuntum bunga dari spesies yang sama (sebagian lain terbawa masuk ke hidung dan mata orang yang alergi serbuk sari). Metode penyerbukan ini serampangan dan, dari sudut pandang tertentu, boros. Seringnya, lebih efisien kalau dilakukan dengan memanfaatkan sayap dan otot serangga (atau perantara lain seperti kelelawar atau kolibri). Teknik ini membidikkan serbuk sari jauh lebih jitu ke sasarannya dan, karena itu, serbuk sari yang dibutuhkan sebagai ‘amunisi’ jauh lebih sedikit. Di lain pihak, mestilah ada pengeluaran untuk menyewa jasa serangga. Sebagian anggarannya dipakai untuk belanja iklan – kelopak warna-warni dan bau semerbak mewangi. Sebagian lain dipakai sebagai ‘uang pelicin’: nektar.

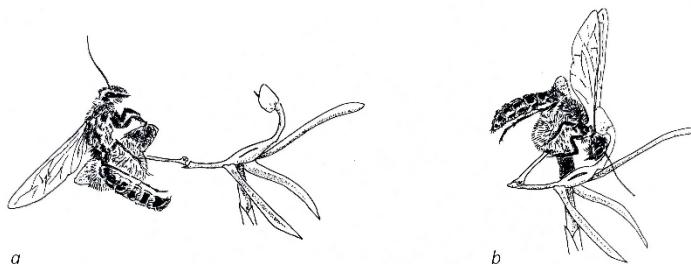
Nektar adalah bahan bakar aviasi berkualitas tinggi untuk serangga dan biaya pembuatannya mahal bagi tumbuhan. Se-



Gambar 8.2 Anggrek peniru rupa serangga, *Ophrys vernixia*.

bagian tumbuhan mengelak dari kewajiban bayar ini dan menggunakan reklame penuh tipu muslihat. Contoh paling kondangnya adalah anggrek yang bunga-bunganya tampak dan berbau seperti serangga betina. Serangga jantan mencoba (Gambar 8.2) kawin dengan bunga-bunganya dan tanpa sadar menjadi sarana angkut dan bongkar-muat serbuk sari. Ada anggrek lebah yang meniru rupa lebah betina. Ada pula anggrek yang berspesialisasi di rupa lalat dan tawon. Salah satu jenis anggrek peniru tawon (anggrek palu), sesuai namanya, memasang tiruan tawon betinanya di ujung sebatang tangkai yang berengsel dan berdaya pegas, dikokang pada jarak tertentu dari bagian bunga yang memuat serbuk sarinya (Gambar 8.3). Ketika tawon jantan mendarat di tiruan itu, pegasnya dipicu lepas. Tawon jantan terpelanting keras dan berulang kali ke landasan, tempat kantong serbuk sari disimpan. Begitu tawon jantan melepaskan diri, punggungnya sudah menggendong dua kantong serbuk sari.

Sama cerdiknya, anggrek ember, yang cara kerjanya mirip kan-



Gambar 8.3 Anggrek palu, *Drakaea fitzgeraldii*: (a) tawon hinggap di tubuh umpan; (b) engselnya lepas, membanting tawon berulang kali ke polinia.

tong semar tetapi dengan satu perbedaan penting. Bunganya mengandung kolam besar berisi cairan, dengan wangi menggoda seperti raksi pemikat berahi yang dikeluarkan para betina spesies lebah tertentu. Lebah jantan dari spesies ini tergoda dan mendekat ke cairan itu, jatuh dan hampir tenggelam. Satu-satunya jalan keluar adalah melalui sebuah terowongan sempit. Terowongan ini akhirnya ditemukan oleh lebah yang kepayahan itu, dan ia merangkak di situ untuk menyelamatkan diri. Di ujung jauh terowongan itu terdapat sebuah lubang keluar yang rumit dan ia terperangkap di sana selama beberapa menit, bergeliang-geliut, hingga akhirnya bisa terbebas. Selama perjuangan terakhir di gerbang keluar terowongan ini, dua kantong besar berisi serbuk sari dimuat rapi ke atas punggungnya. Lebah jantan itu pun terbang dan – malangnya, karena tidak belajar dari pengalaman – jatuh lagi ke anggrek ember yang lain. Ia lagi-lagi hampir tenggelam, lagi-lagi bersusah payah merangkak melalui terowongan, dan lagi-lagi tertahan sebentar di pintu keluar. Pada saat itulah, anggrek yang kedua ini melepaskan kantong-kantong serbuk sari dari punggungnya, dan penyerbukan pun usailah.

Abaikan ungkapan ‘malangnya, karena tidak belajar dari pengalaman’. Seperti biasa, jangan kita tergoda untuk menyangkakan adanya niat berkesadaran. Godaannya bahkan lebih kuat lagi kalau kita melihat perilaku tumbuhannya. Terhadap kedua pihak ini, cara tepat untuk memikirkan kejadiannya adalah dalam kerangka mekanisme yang dirancang secara tidak sadar. Serbuk sari yang mengandung gen-gen untuk membuat anggrek ember peniru lebah diangkut oleh lebah. Serbuk sari yang mengandung gen-gen untuk membangun anggrek yang kalah piawai dalam mengendalikan perilaku lebah kecil kemungkinannya diangkut oleh lebah. Maka, seiring generasi silih berganti, anggrek makin pandai memanipulasi lebah (meski, sebetulnya, harus diakui bahwa anggrek lebah nyatanya tidaklah sukses gemilang dalam mengecoh lebah untuk bersanggama dengannya).

Anggrek-anggrek menakjubkan ini melambangkan aspek penting dalam strategi penyerbukan. Banyak bunga kelihatannya bersusah payah untuk diserbuki oleh satu jenis hewan tertentu, tetapi tidak oleh jenis yang lain. Di wilayah tropis benua Amerika, bunga-bunga merah berbentuk tabung menunjukkan semua ciri penyerbukan oleh kolibri. Merah adalah warna cerah dan atraktif untuk memikat mata (serangga sama sekali tidak dapat melihat warna merah). Tabung yang panjang dan sempit menyusahkan semua hewan penyerbuk kecuali spesialis penyerbukan yang berparuh panjang dan kincup – kolibri. Bunga-bunga lain mengerahkan segala daya upayanya untuk diserbuki oleh lebah saja, dan telah kita amati bahwa kembang-kembangnya kerap berwarna dan bercorak pada bagian ultraviolet yang tak

kasatmata (bagi manusia) dari spektrumnya. Yang lain lagi diserbuki hanya oleh ngengat yang terbang malam. Biasanya berwarna putih, dan bunga-bunga ini lebih memilih pemikat yang merangsang indra penciuman daripada penglihatan. Mungkin, puncak dari perkembangan menuju penyerbukan dengan kemitraan eksklusif adalah duet maut pohon ara dan tawon aranya sendiri, contoh yang membuka dan akan pula mengakhiri buku ini. Tapi mengapa tumbuhan mesti rewel soal siapa yang menyerbukinya?

Agaknya keuntungan memiliki penyerbuk khusus sendiri adalah versi lebih ekstrem dari keuntungan memiliki penyerbuk berupa hewan, alih-alih angin. Sasarannya dipersempit. Penyerbukan dengan bantuan angin amat sangat lewah, menghambur-hamburkan serbuk sari dengan menghujani seluruh wilayah. Penyerbukan dengan bantuan hewan penerbang khusus lebih baik, meski tetap cukup mubazir. Lebah yang hinggap di sekuntum bunga bisa saja terbang ke bunga dari spesies yang agak berbeda dan serbuk sarinya pun jadi sia-sia. Serbuk sari yang dibawa oleh lebah biasa tidak diumbar ke seluruh wilayah seperti nasib rumput yang diserbuki angin, tetapi relatif tetap dipercik-percikkan tanpa pandang bulu. Bandingkan dengan spesies lebah pribadi si anggrek ember, atau tawon ara pribadi si pohon ara. Serangga itu terbang tanpa ragu, bagaikan peluru kendali mungil, atau ibarat ‘peluru ajaib’ (istilah para wartawan medis), persis ke sasaran yang tepat dari sudut pandang tumbuhan yang serbuk sarinya diangkut. Pada kasus tawon ara, ini berarti, seperti yang akan kita lihat nanti, bukan cuma pohon ara yang lain, melainkan pohon ara lain dari spesies yang tepat, dari 900 spesies ara yang ada. Pemanfaatan jasa

penyerbuk spesialis pastilah menghemat produksi serbuk sari secara besar-besaran. Di sisi lain, sebagaimana juga akan kita lihat nanti, timbul pula biaya-biaya lainnya, dan tidak heran kalau sebagian tumbuhan menjalani hidup dengan tetap menggunakan angin sebagai penyerbuk yang boros ria. Spesies-spesies tumbuhan yang lain ternyata lebih cocok dengan teknik yang ada di tengah-tengah spektrum antara senapan gentel dan peluru ajaib. Pohon ara barangkali tumbuhan yang paling bergantung pada peluru ajaib dari spesies penyerbuk tertentu dan kita simpan pembahasannya untuk klimaks buku ini, di bab terakhir.

Kembali ke lebah, jasa penyerbukan yang mereka tawarkan sungguh massal. Kalkulasinya pernah diupayakan dan, di Jerman saja, lebah madu menyerbuki sekitar sepuluh triliun bunga sepanjang satu hari di musim panas. Juga pernah dihitung: 30 persen dari makanan manusia diambil dari tumbuhan-tumbuhan yang diserbuki oleh lebah dan ekonomi Selandia Baru akan ambruk jika lebah sirna dari muka bumi. Lebah ada di dunia untuk mengangkut serbuk sari kami, mungkin begitu ucap bangsa bunga.

Maka, bunga-bunga yang berwarna-warni dan harum mewangi di dunia ini, meski kelihatan ada di sini untuk kepentingan kita, ternyata tidak demikian adanya. Bunga hidup di sebuah kebun serangga, kebun ultraviolet misterius yang, terlepas dari semua kenarsisan kita, di dalamnya kita tidak penting. Bunga sudah lama dibudidayakan dan didomestikasi oleh manusia. Namun, itu masih terbilang fakta yang terjadi baru-baru ini saja. Sebelum itu, tukang kebunnya adalah lebah dan kupu-kupu, bukan kita. Bunga menggunakan lebah, dan lebah menggunakan bunga. Kedua belah pihak

dalam kemitraan ini telah dibentuk oleh satu sama lain. Kedua belah pihak, dalam arti tertentu, telah saling menjinakkan, saling membudidayakan. Kebun ultraviolet adalah kebun dua arah. Lebah membudidayakan bunga untuk tujuannya. Dan bunga menjinakkan lebah untuk tujuannya.

Kemitraan semacam ini cukup lazim terjadi di dalam evolusi. Ada pula kebun-kebun semut berisikan epifit (benalu, yang tumbuh di permukaan tumbuhan lain), yang disemai oleh semut dengan membawa benih-benih yang tepat dan menanamnya di tanah tempat mereka bersarang. Tumbuhan ini tumbuh dari permukaan sarang dan daun-daunnya menjadi makanan untuk semut. Telah dibuktikan pula bahwa sebagian tumbuhan tumbuh lebih baik jika akar-akarnya berada di sarang semut. Spesies semut dan rayap yang lain berspesialisasi di bidang budi daya cendawan bawah tanah. Mereka menanam spora-sporanya, menyiangi kebun dengan menyingkirkan cendawan pengganggu, dan memupukinya dengan kompos yang disebar dari sisa-sisa kunyahan daun. Pada kasus semut-semut pemotong daun dari wilayah tropis benua Amerika yang terkenal itu, semua upaya meramban koloni-koloni berkekuatan delapan juta prajurit itu dikerahkan untuk memanen potongan daun-daun segar. Mereka bisa meluluhlantakkan suatu area dengan efisiensi tanpa ampun, yang mengingatkan kita pada tulah belalang. Namun, dedaunan yang mereka ambil bukan untuk dimakan sendiri atau oleh larvanya, melainkan dikumpulkan murni untuk tujuan memupuki kebun-kebun cendawan. Semut-semutnya sendiri memakan cendawan, dari spesies yang tidak tumbuh di tempat selain sarang-sarang jenis semut ini. Cendawan mungkin berkata bahwa semut ada semata-mata untuk

membudidayakan cendawan, dan semut mungkin berkata bahwa cendawan ada semata-mata untuk menjadi makanan semut.

Barangkali, yang paling menakjubkan dari semua tumbuhan pencinta semut adalah epifit Asia Tenggara yang menumbuhkan gembungan besar di batangnya, yang disebut



Gambar 8.4 Tumbuhan yang membuat akomodasi khusus untuk semut sebagai imbalan atas jasa pengamanan. Tampang lintang umbi palsu *Myrmecodia pentasperma*.



Gambar 8.5 Duri akasia. Contoh lain kerja sama antara semut dan tumbuhan. Duri-duri bak-umbi ini kopong sehingga nyaman bagi semut.

umbi palsu. Umbi palsu ini kopong, dengan labirin penuh rongga. Rongga-rongga ini begitu miripnya dengan yang biasa digali semut di tanah sampai-sampai orang bakal menyangka bahwa semutlah yang membuatnya. Namun, bukan begitu adanya. Rongga-rongga ini dibuat oleh tumbuhan itu dan semut tinggal di dalamnya (Gambar 8.4).

Lebih terkenal lagi spesies semut yang hanya hidup di duri-duri kopong pohon akasia yang istimewa (Gambar 8.5). Duri-duri ini tebal dan gembung, dan akasia membuatnya kopong, semata-mata untuk menampung semut. Yang diperoleh tumbuhan dari kerja sama ini adalah perlindungan, melalui sengat ganas semut-semut itu. Hal ini telah dibuktikan dengan berbagai eksperimen yang apik dan sederhana. Akasia yang semut-semutnya mati karena insektisida segera saja lebih cepat dibinasakan oleh herbivora. Semut, kalaupun mereka

berakal, berpikir bahwa duri-duri akasia ada demi kepentingan semut. Akasia berpikir bahwa semut ada untuk melindungi mereka dari hewan-hewan peramban. Kalau begitu, mestikah kita berpikir bahwa tiap pihak dalam kemitraan semacam itu bekerja untuk kepentingan pihak lainnya? Lebih baik jika berpikir bahwa tiap pihak menggunakan pihak lain demi kepentingannya sendiri. Relasi ini semacam hubungan saling mengeksplorasi, yang tiap pihaknya beroleh cukup manfaat dari pihak lain sehingga rela bayar harga untuk membantu pihak lain tersebut.

Ada godaan untuk melihat kehidupan sebagai semacam kelompok masyarakat gotong-royong (dan ahli ekologi sering terbujuk godaan ini). Tumbuhan adalah pemanen energi utama komunitas ini. Mereka menangkap sinar matahari dan membuat energinya tersedia bagi segenap isi komunitas. Dimakan adalah kontribusi mereka bagi komunitasnya. Herbivora, termasuk serangga herbivor yang berlimpah jumlahnya, adalah penghantar energi matahari dari produsen utamanya, tumbuhan, ke jenjang-jenjang lebih tinggi di rantai makanan, insektivora, karnivora kecil, dan karnivora besar. Saat hewan buang air besar atau mati, zat-zat kimia penting mereka didaur ulang oleh hewan-hewan pengurai seperti kumbang kotoran dan kumbang pengubur yang menyerahkannya bahan berharga itu ke bakteri tanah, yang pada akhirnya mengembalikannya pada tumbuhan.

Gambaran damai sentosa tentang sirkulasi energi dan sumber daya lainnya ini boleh-boleh saja jikalau dengan jelas dipahami bahwa para pesertanya *tidak* berbuat demikian untuk kebaikan lingkaran komunitas itu. Mereka ada di lingkaran itu demi kepentingannya sendiri. Kumbang kotoran memulung

dan mengubur tahi untuk makanan. Fakta bahwa, karena perbuatan itu, ia dan bangsanya melaksanakan jasa pembersihan dan daur ulang yang berfaedah bagi para penghuni lain wilayah tersebut hanyalah kebetulan semata.

Rumput menyediakan makanan pokok bagi hewan-hewan perumput, dan hewan-hewan ini menyuburkan rumput. Bahkan, jika hewan-hewan ini tidak ada, banyak rumput yang akan mati. Tetapi ini tidak berarti bahwa tumbuhan rumput ada untuk dimakan, atau diuntungkan karena dimakan. Tumbuhan rumput, andai bisa mengutarakan keinginannya, lebih memilih untuk tidak dimakan. Lantas bagaimana kita memecahkan paradoks bahwa, jika hewan pemakan rumput dihilangkan, rumput-rumput akan mati? Jawabannya adalah bahwa, kendati tak ada tumbuhan yang ingin dimakan, rumput dapat menoleransi hal ini lebih baik dari banyak tumbuhan lainnya (dan itu mengapa rumput ditanam di halaman yang memang nantinya akan disiangi). Selama suatu area itu dirumputi atau disiangi, tumbuhan lain yang dapat mengganggu rumput tak bisa tumbuh. Pohon-pohon tak dapat berkecambah karena bibit semaiannya hancur. Oleh karena itu, hewan perumput secara tidak langsung mendatangkan kebaikan bagi rumput sebagai sebuah golongan makhluk hidup. Tapi ini tidak berarti bahwa individu-individu tumbuhan rumput menuai manfaat dengan dimakan. Ia boleh jadi diuntungkan karena rumput-rumput lain dimakan, termasuk tumbuhan lain dari spesiesnya sendiri, karena ini akan mendatangkan kesuburan dan membantu menyingkirkan tumbuhan-tumbuhan pengganggu. Tapi jika setangkai rumput bisa hidup tanpa dimakan, akan lebih baik begitul baginya.

Pembahasan kita awali dengan menyindir sesat pikir bahwa

bunga dan hewan ada di dunia ini demi kepentingan manusia, ternak dengan jinaknya ingin dimakan, dan seterusnya. Sedikit lebih mendingan, gagasan bahwa mereka ada di dunia untuk kepentingan makhluk hidup yang lain, yang telah secara alami menjalin relasi mutualisme dengannya: bunga untuk kebaikan lebah, lebah untuk kebaikan bunga, duri umbi akasia untuk kebaikan semut, dan semut di dalamnya untuk kebaikan akasia. Tapi wacana bahwa makhluk hidup ada ‘untuk kebaikan’ makhluk hidup lain ini berisiko terjerumus ke *reductio ad absurdum* (pembuktian melalui kontradiksi). Jangan sampai kita terseret kereta sesat pikir kalangan ekologis populer, jagat adiluhung tempat semua individu berjuang demi kebaikan masyarakat, ekosistem, ‘Gaia’. Sekarang waktunya cerewet dan mengerucutkan maksud, setiap kali kita katakan makhluk hidup ada ‘untuk kepentingan’ apa pun. Apa sesungguhnya makna ‘untuk kebaikan’ itu? Untuk apa bunga dan lebah, tawon dan ara, gajah dan pinus *bristlecone* – untuk apa *sesungguhnya* makhluk hidup itu ada? Entitas macam apa yang ‘kepentingannya’ akan dipenuhi oleh tubuh yang hidup atau bagian dari tubuh yang hidup?

Jawabannya adalah DNA. Jawaban ini mendalam serta tepat jitu dan argumen pendukungnya pun tanpa cela, tetapi perlu dijelaskan. Penjelasan inilah yang akan saya uraikan sekarang dan di bab berikutnya. Saya awali dengan menjenguk putri saya lagi.

Dia pernah terkena demam tinggi dan saya ikut merasakan deritanya saat mendapat giliran menungguinya di samping tempat tidur, sambil mengompresnya dengan air dingin. Dokter modern dapat meyakinkan saya bahwa dia sama sekali

tidak terancam bahaya serius, tetapi akal seorang ayah penyayang yang kurang tidur tetap melantur ke entah berapa banyak kematian anak pada abad-abad sebelumnya dan nestapa yang menyerang bila ditinggal mati anak seorang. Charles Darwin sendiri tak pernah pulih dari kematian putri tercintanya, Annie, yang tak dapat dipahaminya. Rasa tak rela menyaksikan penyakit yang diderita putrinya ini, konon, telah ikut menggerus iman religius dari dirinya. Kalau Juliet berpaling kepada saya dan bertanya, dengan gaung pilu dari percakapan riang kami dulu, ‘Untuk apa virus ada?’, bagaimana saya mesti menjawabnya?

Untuk apa virus ada? Untuk membuat kita lebih baik dan kuat dengan mengatasi kesengsaraan? (Seperti manfaat Auschwitz sebagaimana dikemukakan oleh seorang profesor teologi yang pernah semimbar debat dengan saya di televisi Inggris.) Untuk membunuh cukup banyak manusia guna mencegah ledakan populasi? (Anugerah istimewa di negara-negara yang otoritas keagamaannya melarang kontrasepsi.) Untuk menghukum kita atas dosa-dosa kita? (Pada kasus virus AIDS, ada banyak yang setuju dengan tanggapan itu. Hampir-hampir kita kasihan dengan para teolog abad pertengahan karena patogen yang luar biasa moralistik ini tidak ada di masa mereka.) Sekali lagi, jawaban-jawaban ini terlalu homosentris, meski dengan nada yang negatif. Virus, seperti semua hal lain di alam ini, tidak punya minat apa pun pada manusia, positif atau negatif. Virus adalah instruksi program tersandi yang ditulis dalam bahasa DNA, dan mereka ada demi kepentingan instruksi itu sendiri. Instruksinya berbunyi ‘Salin dan Sebarkan Saya’ dan instruksi yang dipatuhi adalah instruksi yang kita jumpai. Itu saja. Sejauh itu sajalah batas jawaban kita atas



pertanyaan ‘Untuk apa virus ada?’ Jawaban yang tampak tak ada artinya, dan justru memang itulah yang sekarang ingin saya tekankan. Saya akan menekankannya dengan contoh yang sebanding, virus komputer. Analogi antara virus sejati dan virus komputer amat sangat kuat dan juga mencerahkan.

Virus komputer hanyalah program komputer, yang ditulis dengan bahasa yang sejenis dengan program komputer lain dan berpindah tempat melalui aneka media yang sama, misalnya disket, atau jaringan komputer, kawat telepon, modem, dan perangkat lunak yang disebut internet. Semua program komputer hanyalah seperangkat instruksi. Instruksi untuk melakukan apa? Ya, melakukan apa pun. Ada program yang merupakan paket instruksi untuk menghitung estimasi. Program pengolah kata adalah perangkat instruksi untuk menerima kata-kata yang diketik, memindah-mindahkannya di layar, dan akhirnya mencetaknya. Namun, program-program lain, seperti Genius 2 yang baru-baru ini mengalahkan Kasparov sang Grand Master itu, adalah instruksi untuk bermain catur dengan sangat baik. Virus komputer adalah program yang terdiri atas instruksi yang bunyinya kira-kira begini: ‘Setiap kali kamu singgah di sebuah cakram komputer baru, salin saya dan taruh di cakram itu.’ Itu namanya program ‘Gandakan Saya’. Bisa juga bunyi instruksinya, contoh, ‘Hapus semua isi *hard disk*-nya.’ Atau membuat komputernya melafalkan, dengan nada robotik yang nyaring, kata-kata ‘Jangan panik’. Tapi itu efek lanjutan saja. Penanda jelas sebuah virus komputer, ciri yang menjadi identitasnya, adalah instruksi ‘Gandakan Saya’, yang ditulis dalam bahasa yang akan dipatuhi komputer.

Manusia mungkin tak merasa perlu patuh pada perintah yang menuntut untuk ditaati seperti ini, tetapi komputer akan patuh pada apa pun selama ditulis dalam bahasa khasnya sendiri. 'Gandakan saya' akan dituruti setaat menuruti perintah 'Inversikan matriks ini' atau 'Cetak miring paragraf ini' atau 'Geser maju bidak catur ini dua kotak'. Lebih lagi, ada banyak kesempatan untuk infeksi silang. Para pengguna komputer kerap bertukar disket, untuk berbagi program gim dan program berguna lainnya ke teman-teman. Wajar saja, bila ada banyak disket yang ramai-ramai diedarkan keliling, sebuah program yang instruksinya berbunyi 'Salin saya ke setiap cakram yang kamu jumpai' akan menyebar ke seluruh dunia layaknya cacar air. Dalam sekejap, akan ada ratusan salinan, dan jumlahnya cenderung meningkat. Dewasa ini, dengan saluran informasi seling-silang di ruang siber, kesempatan untuk infeksi silang virus komputer dengan cepatnya menjadi makin besar.

Mudah kita berbantah tentang ketunagunaan program-program parasit semacam itu, seperti yang saya lakukan tadi saat membahas virus-virus penyakit. Apa guna sebuah program yang cuma bisa bilang 'Gandakan program ini'? Memang dia akan digandakan, tetapi tidakkah upaya yang egois ini ujung-ujungnya tak berguna? Tentu saja! Memang sia-sia. Tapi mau sia-sia dan tak berarti, tak ada pengaruhnya. Dia bisa tak berarti tapi tetap menyebar. Dia menyebar karena dia memang menyebar. Fakta bahwa dia, dalam prosesnya, tak mendatangkan manfaat – malah justru bisa mendatangkan mudarat – tidak relevan sama sekali. Di dunia komputer dan tukar-menukar disket, dia bertahan semata-mata karena dia bertahan.

Virus biologis pun begitu. Pada dasarnya, virus hanyalah sebuah program, ditulis dalam bahasa DNA, yang amat mirip dengan bahasa komputer, bahkan hingga ciri penulisannya dalam kode digital. Seperti virus komputer, virus biologis instruksinya berbunyi 'Salin dan sebar luaskan saya'. Seperti halnya virus komputer, bukan berarti DNA di dalam sebuah virus *ingin* dirinya disalin. Cuma, dari semua cara menyusun DNA, hanya susunan yang membunyikan instruksi 'Sebarkan saya' yang menyebar. Dunia ini pun, mau tak mau, jadi penuh dengan program-program itu. Sekali lagi, seperti virus komputer, mereka ada karena mereka memang ada. Kalau mereka tidak mengejawantahkan instruksi untuk memastikan mereka ada, mereka takkan ada.

Satu-satunya perbedaan penting di antara dua jenis virus ini adalah bahwa virus-virus komputer dirancang dengan upaya kreatif dari manusia nakal atau jahat, sementara virus biologis berevolusi melalui mutasi dan seleksi alam. Jika virus biologis menimbulkan efek buruk, seperti bersin-bersin atau kematian, efek buruk itu adalah akibat susulan atau gejala dari metode penyebarannya. Efek buruk virus komputer pun kadang sejenis dengan itu. Cacing internet (*Internet Worm*) yang terkenal itu, yang berseliweran jaringan-jaringan di Amerika Serikat pada 02 November 1988, semua efek buruknya bersifat akibat susulan yang tidak disengaja (*worm* komputer secara teknis berbeda dari virus komputer, tetapi perbedaannya tidak perlu kita hiraukan di sini). Salinan-salinan program itu mengambil alih ruang memori dan memakan waktu prosesor, mengakibatkan macetnya sekitar 6.000 unit komputer. Virus komputer, seperti telah kita lihat, kadang menimbulkan efek buruk yang bukan akibat susulan atau



gejala, melainkan penjelmaan serampangan dari niat yang murni jahat. Jauh dari kata membantu penyebaran parasitnya, efek-efek durjana ini justru memperlambatnya. Virus hayati takkan berbuat apa pun demi kepentingan manusia, kecuali memang dirancang di laboratorium senjata biologis. Virus-virus yang berevolusi secara alami tidak berjuang mati-matian untuk membunuh atau membuat kita menderita. Mereka tidak peduli kita menderita atau tidak. Kalaupun kita menderita, itu akibat susulan dari kegiatan-kegiatan penyebaran diri mereka.

Instruksi-instruksi ‘Gandakan saya’, seperti halnya semua instruksi lain, tidak berguna kecuali ada mekanisme yang dibuat untuk mematuhinya. Dunia komputer adalah tempat yang baik dan ramah bagi program ‘Gandakan saya’. Komputer, yang saling terhubung karena internet, ditambah lagi aktivitas pinjam-meminjam disket, merupakan semacam surga bagi program komputer swa-salin. Sudah terdapat mesin salin- dan patuh-instruksi yang siap pakai, berdengung dan menderu dan, seolah-olah, meminta untuk dieksloitasi oleh program dengan perintah ‘Gandakan saya’. Pada kasus virus-virus DNA, mesin salin- dan patuh-perintah yang siap pakai ini adalah mesin sel-sel, dengan seluruh perlengkapan rumit RNA Kurir, RNA Ribosom, dan berbagai RNA Transfer, yang masing-masing terkait dengan asam amino berkode kuncinya sendiri. Abaikan saja detailnya, atau coba telusuri di buku *Molecular Biology of the Gene* karya J. D. Watson, untuk referensi terang benderangnya. Untuk tujuan kita, cukuplah bila memahami bahwa, pertama-tama, setiap sel mengandung versi mini dari mesin patuh-instruksi sebuah komputer dan bahwa, kedua, kode mesin semua sel pada



semua makhluk di Bumi itu identik. (Omong-omong, virus komputer tidak mendapatkan kemewahan itu: Virus DOS tidak dapat menginfeksi perangkat bersistem operasi Mac, dan sebaliknya.) Instruksi virus komputer dan instruksi virus DNA dipatuhi karena ditulis dalam kode yang mentah-mentah ditaati dalam lingkungan-lingkungan yang dimasukinya masing-masing.

Tapi dari mana datangnya semua mesin penyalin dan pelaksana instruksi yang penurut ini? Bukan dari ruang hampa. Harus dibuat. Pada kasus virus komputer, mesinnya dibuat oleh manusia. Pada kasus virus DNA, mesinnya adalah sel-sel dari makhluk-makhluk lainnya. Dan siapa yang membuat makhluk-makhluk lain itu, manusia dan gajah dan kuda nil yang sel-selnya membuat hidup jadi begitu mudah bagi virus? Jawabannya: DNA swa-salin yang lainlah yang membuatnya. DNA ‘milik’ manusia dan gajah itu. Jadi, *apa* itu makhluk-makhluk besar seperti gajah, pohon ceri, dan tikus? (Saya bilang ‘besar’ karena tikus pun, di ‘mata’ virus tampak amat sangat besar.) Dan untuk kepentingan siapa tikus dan gajah dan bunga ada di dunia?

Kita sudah kian dekat dengan jawaban pasti atas semua pertanyaan semacam ini. Bunga dan gajah ada ‘untuk kepentingan’ yang sama dengan kepentingan semua yang lain di kerajaan makhluk hidup, kepentingan penyebaran program-program Gandakan Saya yang ditulis dalam bahasa DNA. Bunga ada untuk menyebarkan salinan-salinan instruksi untuk membuat lebih banyak bunga. Gajah ada untuk menyebarkan salinan-salinan instruksi untuk membuat lebih banyak gajah. Burung ada untuk menyebarkan salinan-salinan instruksi untuk membuat lebih banyak burung. Sel-sel seekor gajah

tidak tahu-menahu apakah instruksi yang mentah-mentah mereka patuhi itu instruksi virus atau instruksi gajah. Seperti dilukiskan penyair Tennyson dalam *The Charge of the Light Brigade*, kalaupun amanat berujung celaka, ‘Tugas mereka bukan menjawab, tugas mereka bukan menimbang alasan, tugas mereka hanya maju jalan’.

Anda mesti mengerti bahwa saya menggunakan ‘gajah’ untuk mewakili semua makhluk besar dan otonom, untuk bunga atau lebah, untuk manusia atau kaktus, bahkan untuk bakteri. Instruksi virus, seperti telah kita lihat, adalah ‘Gandakan saya’. Lalu apa bunyi instruksi gajah? Inilah wawasan utama yang ingin saya bekaskan di benak Anda pada akhir bab ini. Instruksi gajah juga berbunyi ‘Gandakan saya’, tapi cara menyatakannya jauh lebih tak langsung. DNA seekor gajah merupakan program raksasa, yang setara dengan program komputer. Seperti DNA virus, ia pada dasarnya juga merupakan program ‘Gandakan Saya’, tetapi pelaksanaan efisien atas pesan intinya harus melalui jalan yang memutar jauh sekali. Jalan memutar itu adalah seekor gajah. Program itu berbunyi: ‘Gandakan saya lewat rute memutar – bangun seekor gajah terlebih dahulu.’ Gajah makan supaya tumbuh; ia tumbuh supaya dewasa; ia dewasa supaya kawin dan menghasilkan gajah-gajah baru; ia menghasilkan gajah-gajah baru untuk menyebarkan salinan-salinan baru dari instruksi program awalnya.

Demikian pula dengan bagian-bagian tubuh makhluk hidup. Paruh merak, dengan memungut makanan yang membuat merak tetap hidup, adalah alat penyebaran tak langsung instruksi untuk membuat paruh merak. Ekor kipas merak jantan adalah alat penyebaran instruksi untuk membuat lebih

banyak ekor kipas merak. Caranya adalah dengan memikat perhatian merak betina. Ekoranya pandai memikat merak betina sementara paruhnya pandai memungut makanan. Pejantan dengan ekor kipas paling elok akan memiliki anak paling banyak untuk meneruskan salinan-salinan gen-gen pemercantik ekor kipas. Itulah alasan ekor kipas merak begitu cantiknya. Fakta bahwa ekor kipas merak cantik di mata kita hanyalah akibat susulan yang tak disengaja. Ekor kipas merak adalah alat penyebar gen dan cara kerjanya adalah melalui mata merak betina.

Sayap adalah alat penyebaran instruksi genetik untuk membuat sayap. Pada kasus merak, sayap berfungsi sebagai pelestari gen, khususnya saat si burung pesona ini dikagetkan oleh pemangsa, lalu memelesat sebentar ke udara. Tumbuhan membuat sesuatu yang serupa dengan organ terbang bagi benih-benih mereka (Gambar 8.6), tapi biarpun demikian rata-rata orang mungkin enggan memakai kata ‘terbang’, dalam pengertian sejatinya, untuk tumbuhan. Tumbuhan, agaknya, tidak terbang dan tidak punya sayap.

Tapi tunggu! Dari sudut pandang tumbuhan, ia tidak *butuh* sayap sendiri kalau ada sayap lebah, atau sayap kupu-kupu, yang bisa terbang untuknya. Saya malah tidak keberatan *menyebut* sayap lebah itu *sayap tumbuhan*. Sayap-sayap itu organ terbang yang dipakai, oleh tumbuhan, untuk mengangkut serbuk sarinya dari bunga yang satu ke bunga yang lain. Bunga adalah alat untuk meneruskan DNA tumbuhan ke generasi berikutnya. Cara kerjanya mirip ekor kipas merak jantan, tetapi bukan dengan memikat merak betina, melainkan lebah. Kalau tidak, tidak ada bedanya. Persis seperti ekor kipas merak jantan, secara tidak langsung,



Gambar 8.6 DNA dengan sayap: benih pohon *maple* dan rumput dandelion.

menggerakkan otot-otot kaki merak betina untuk berjalan ke arahnya dan kawin dengannya, demikianlah pula warna dan corak dan wangi dan nektar bunga menggerakkan sayap-sayap lebah dan kupu-kupu dan kolibri. Lebah tertarik dan mendekat ke arah bunga-bunga. Sayap-sayap mereka mengepak dan mengangkut serbuk sari dari satu bunga ke bunga yang lain. Sayap-sayap lebah sungguh dapat disebut sayap-sayap bunga, karena berfungsi membawa gen-gen bunga, seperti halnya membawa gen-gen lebah.

Tubuh gajah tidak tahu-menahu apakah ia bekerja untuk menyebarkan DNA gajah atau DNA virus, dan sayap lebah tidak tahu-menahu apakah ia bekerja untuk menyebarkan

DNA lebah atau DNA bunga. Agaknya, kalau kita kesampingkan kasus-kasus pengecualian seperti lebah yang terkecoh dan sia-sia bersanggama dengan anggrek lebah, sayap-sayap itu bekerja untuk menyebarkan keduanya. Perbedaan antara DNA ‘milik sendiri’ dan DNA serbuk sari, dari sudut pandang mesin pelaksana lebah, tidak dapat dimengerti. Sikap merak dan lebah, bunga dan gajah, terhadap DNA mereka sendiri sama seperti sikap mereka terhadap DNA virus-virus parasit yang menjangkuti mereka. DNA virus adalah program yang berbunyi: ‘Gandakan saya dengan cara simpel dan sederhana, menggunakan mesin siap pakai pada sel-sel inang.’ DNA gajah berbunyi: ‘Gandakan saya dengan cara yang lebih rumit dan memutar – bangun dahulu seekor gajah.’ DNA bunga berbunyi: ‘Gandakan saya dengan cara yang lebih rumit dan memutar lagi: pertama, bangun sekuntum bunga lalu, kedua, pakai bunga itu untuk memanipulasi, dengan pengaruh-pengaruh tak langsung seperti nektar yang menggoda, sayap-sayap seekor lebah (yang telah dibangun ke dalam spesifikasi paket DNA yang lain, DNA “milik” lebah itu sendiri) untuk menyebarluaskan bulir-bulir serbuk sari yang merupakan instruksi DNA yang sama.’ Kita akan dekati kesimpulan ini lagi, dari arah yang lain, di bab berikutnya.

## BAB 9

### PENGGANDA ROBOT

BARU SAJA KITA SIMPULKAN BAHWA BUNGA DAN GAJAH, secara *de facto*, adalah inang bagi DNA-nya sendiri, selayaknya pula bagi DNA virus. Kesimpulan ini tepat, tetapi meninggalkan pertanyaan-pertanyaan sulit yang belum terjawab. Ada satu langkah penting yang luput dari argumennya. Virus komputer melenggang kangkung karena dunia ini sudah sarat dengan komputer, yang kuat, siap, dan menanti arahan untuk ditaati. Namun, komputer-komputer ini buatan manusia. Pintu ke dalamnya terbuka lebar untuk dimasuki program-program parasit dengan leluasa. Virus DNA pun menjangkiti inang-inangnya dengan leluasa, dengan semua mesin seluler rumit yang tunduk pada perintah. Tapi pada kasus mesin-mesin hidup, dari mana mesin-mesin itu berasal?

Bayangkan hal seperti virus komputer yang, alih-alih dimudahkan dengan adanya perangkat komputer yang siap mematuhi instruksi-instruksinya, harus memulai semuanya dari nol. Bunyi instruksi virus ini tidak boleh hanya ‘Gandakan saya’, karena tidak ada komputer untuk mematuhi instruksi itu. Agar benar-benar mampu melakukan swa-penyebaran, di dunia tanpa mesin-mesin komputasi dan penggandaan yang siap pakai, apa yang harus dilakukan sebuah program komputer swa-ganda? Harus dimulai dengan perintah: ‘Buat mesin-mesin yang dibutuhkan untuk menggandakan saya.’ Dan, sebelum sampai ke situ, ia harus memerintahkan, ‘Buat

komponen-komponen yang akan dirakit menjadi mesin-mesin untuk menggandakan saya.' Dan, sebelum sampai ke situ, ia harus memerintahkan, 'Kumpulkan bahan-bahan mentah yang dibutuhkan untuk membuat komponen-komponen itu.' Program yang lebih canggih ini perlu diberi nama. Kita panggil dia 'Program Replikasi Instruksi Total' atau PRIT.

PRIT harus punya kendali atas lebih dari sekadar komputer biasa dengan *keyboard* dan layar. Ia harus juga memiliki peranti yang sepadan dengan tangan-tangan terampil, atau perangkat genggam dan manipulasi, yang dipadu dengan perangkat pengindraan untuk membentuk komponen-komponen dan merangkainya jadi satu. Perangkat bak-tangan dibutuhkan untuk mencari dan merakit komponen-komponen itu dan, sebelum itu, mengumpulkan bahan-bahan mentahnya. Komputer bisa menyimulasikan aneka macam hal di layarnya, tetapi ia sendiri tidak bisa membangun komputer lain seperti dirinya. Supaya bisa, ia perlu menjamah dunia nyata dan memanipulasi bahan-bahan logam padat, silikon, dan bahan-bahan fisik lainnya.

Mari kita cermati permasalahan teknis yang tersaji di sini. Komputer *desktop* modern dapat memanipulasi bentuk-bentuk berwarna pada layar-layar bersinar katode, pigmen-pigmen berwarna pada kertas *printer*, dan kadang materi-materi lain seperti bunyi di pelantang suara stereo. Ini semua bisa dipakai untuk menciptakan ilusi-ilusi kepadatan tiga dimensi, tetapi semua itu sebenarnya ilusi, yang bergantung pada terkecohnya otak manusia. Kubus digambarkan dari perspektif tertentu pada layar. Dengan proses *rendering* bidang permukaan yang sesuai, kubus itu akan tampak padat meyakinkan, tetapi kita tetap tidak bisa memungut dan

merabanya, sebagai benda padat dan berat, dengan jari-jemari kita. Dengan perangkat lunak yang sesuai, kita dapat menyimulasi pemotongan kubus ke dalam dua bagian dan melihat tampilan tampang lintang di layar kita. Tapi lagi-lagi, itu semua tidak benar-benar padat. Komputer masa depan mungkin mampu mengecoh indra-indra lain dengan cara serupa. Peranti masa depan yang sepadan dengan *mouse* sekarang dapat diutak-atik untuk menghantarkan rasa lembam yang realistik ke jari-jemari saat mendorong benda ‘berat’ di sekitar layar. Tapi tetap benda tersebut tidak benar-benar berat, tidak terbuat dari benda-benda berwujud dan padat.

Komputer yang menjalankan program PRIT harus memanipulasi hal yang lebih dari imajinasi manusia. Ia harus mampu menangani benda-benda padat di dunia nyata di luar sana. Bagaimana sebuah komputer dapat melakukannya? Akan bukan main sulitnya. Kita bisa memulai upayanya dengan mencoba merancang *printer* komputer jenis baru, ‘*printer* 3D’. *Printer* komputer biasa memanipulasi tinta di atas sehelai kertas dua dimensi. Salah satu cara menghampirkan representasi tiga dimensi dari, misalnya, tubuh seekor kucing, adalah dengan membuat serangkaian tampang berantai yang dicetak di atas lembaran-lembaran transparan. Dalam prosesnya, komputernya akan dengan susah payah mengiris dan memindai, dari ujung hidung hingga ujung ekor si kucing, mencetak ratusan lembar asetat. Ketika lembaran-lembaran itu ditumpuk menjadi balok padat, tampilan tiga dimensi seekor kucing akan tampak di dalam blok tersebut.

Ini pun masih belum *printer* 3D sejati karena kucingnya, bila dicetak seperti ini, akan tersemat di dalam sebuah matriks

asetat. Kita dapat memperbaikinya dengan mengganti tinta dengan resin yang dapat mengeras sendiri. Lembaran-lembaran itu akan ditumpuk seperti tadi, lalu larut atau hilang, meninggalkan resin yang sudah mengeras. Apabila, meski muskil, permasalahan teknis dengan desain ini dapat diatasi, kita akan memiliki sebuah instrumen yang mampu membangun benda tiga dimensi apa pun: sebuah *printer* komputer tiga dimensi yang sejati.

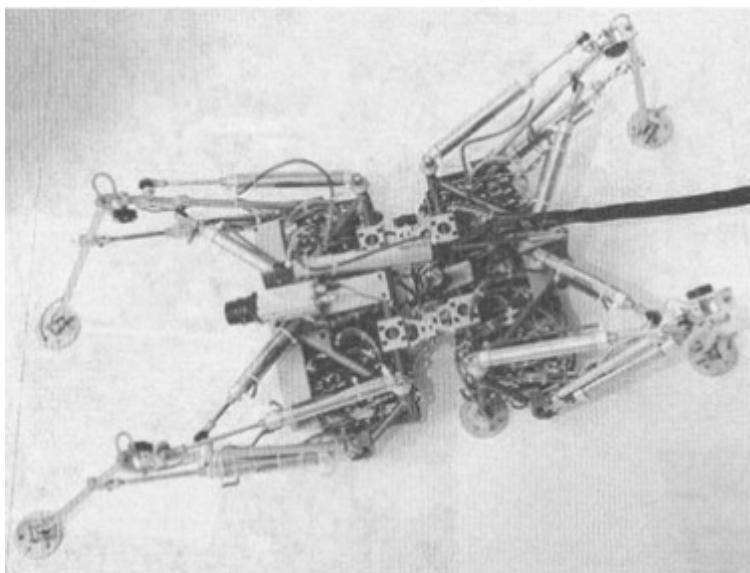
*Printer* komputer 3D kita masih mengakar kuat pada prakonsepsi-prakonsepsi dua dimensi. Alat ini mereka cipta produk tiga dimensinya menggunakan prinsip tampang atau irisan berantai. Perangkat produksi yang bergantung pada prinsip irisan berantai tidak akan cukup untuk program PRIT kita. Mesin yang berguna, seperti mesin pembakaran internal, takkan pernah dapat dibuat dengan teknik irisan berantai. Mesin seperti itu membutuhkan subkomponen seperti silinder dan piston, roda gila dan sabuk. Komponen-komponen ini dibuat dari bahan-bahan yang berbeda satu dengan yang lain, dan harus bebas bergerak, relatif terhadap yang lain. Mesinnya tidak dapat dibangun dengan irisan-irisan menumpuk: Harus *dirakit* dengan merangkai komponen-komponen terpisah yang dibuat sebelumnya. Komponen-komponen yang sudah dibuat sebelumnya itu sendiri juga perlu dirakit, dengan cara serupa, dari bagian-bagian yang lebih kecil. Jenis perangkat produksi yang cocok untuk PRIT sama sekali bukan *printer* 3D. Melainkan sebuah robot industri. Robot dengan penjejit atau yang sepadan dengan tangan, yang mampu menggenggam objek. ‘Tangan’ ini harus berada di ujung sebuah benda yang setara dengan lengan dan harus memiliki sendi universal atau serangkaian sendi yang



Gambar 9.1 Robot industri dari pabrik mobil Nissan. Yokohama.

mampu menggerakkannya di tiga matra. Ia memiliki alat yang setara dengan organ-organ pengindraan, yang mampu memandunya menuju objek berikutnya yang harus dipungut, dan mampu membawa objek itu ke tujuan yang diinginkan sehingga dapat dikencangkan pada posisinya dengan cara yang sesuai.

Robot-robot industri seperti ini ada di pabrik-pabrik modern (Gambar 9.1). Dan robot-robot itu memang berfungsi, asalkan tiap-tiap darinya diberi satu tugas khusus untuk dijalankan pada satu titik tertentu di sebuah lini perakitan. Namun, robot industri yang biasa masih belum memadai untuk menjalankan program PRIT. Ia bisa menyatukan – merakit – komponen-komponen jika komponen-komponen tersebut diserahkan pa-



Gambar 9.2 Robot pejalan dengan kaki isap, Portsmouth Polytechnic, Inggris.

danya dengan orientasi yang baku, atau ditarik untuk melewatkannya di sebuah lini produksi. Padahal, tujuan utama kita adalah lepas dari ketergantungan pada penyerahan dengan orientasi yang baku, sehingga bisa kita terima 'dengan leluasa'. Robot kita, entah bagaimana caranya, harus mencari bahan-bahan baku untuk membuat komponen-komponennya sebelum bisa mulai merakitnya jadi satu. Untuk melakukan itu, ia harus menjelajahi dunia, giat mencari bahan-bahan mentah, menambangnya, meramunya. Ia harus punya sarana berpindah tempat – alat seperti roda kelabang atau kaki ulat bulu.

Ada robot yang punya kaki, atau sarana lain untuk berpindah

tempat dengan cara yang semi-sengaja. Robot pada Gambar 9.2 ini kebetulan agak mirip serangga; hanya saja, tungkainya empat, bukan enam. Ia dilengkapi dengan kaki pengisap, seperti kaki lalat, karena kelihaiannya adalah memanjat dinding-dinding vertikal. Para pembuatnya sering menjahili robot ini dengan menaruh tangan di titik tempatnya hendak berpijak. Kaki si robot lantas mendeteksi ketaksesuaian medan yang terjadi lalu, dengan gaya mirip pantomim yang membuat kita mengulum senyum, mencari permukaan yang lebih baik. Tapi ini satu detail pada satu robot. Robot pendahulunya yang terkenal, ‘penyu’ *Machina speculatrix* yang dibangun oleh W. Grey Walter dari Universitas Bristol, mampu mencari dan mencolokkan diri ke sumber listrik untuk mengecas baterai-baterainya. Begitu baterainya melemah, ia menunjukkan ‘hasrat makan’ listrik yang makin gelisah dan mendorongnya untuk lebih giat lagi mencari sumber listrik. Bila sudah tertemu, ia akan mencolokkan diri dan diam di situ hingga ‘kenyang’. Detail-detail ini tidak fundamental. Yang menjadi fokus perhatian kita adalah mesin yang mampu bergerak dengan tungkai-tungkainya sendiri dan giat mencari sesuatu atas kendali organ-organ pengindraannya sendiri dan komputer bawaannya sendiri.

Tugas kita berikutnya adalah menyatukan dua jenis robot ini. Bayangkan robot pejalan dan berkaki isap ini menggendong, di punggungnya, sesuatu seperti robot industri penggenggam sebagaimana yang kita lihat tadi. Mesin paduan ini berada di bawah kendali sebuah komputer bawaan. Komputer bawaannya punya banyak perangkat lunak rutin untuk mengontrol tungkai dan kaki isapnya, serta untuk mengontrol rangkaian lengan dan tangannya. Namun, semuanya itu

berada di bawah kendali menyeluruh dari sebuah program induk Gandakan Saya, yang arahannya berbunyi: 'Jelajahi dunia, kumpulkan bahan-bahan baku untuk membuat duplikat seluruh robotnya. Buat robot yang baru, lalu tanamkan program PRIT ke dalam komputer bawaannya. Lepas liarkan, agar dia bisa melakukan hal yang sama'. Robot khayali yang telah kita bangun ini dapat disebut robot PRIT.

Robot PRIT yang kita bayangkan kini adalah mesin dengan kecerdikan dan kerumitan teknis yang luar biasa. Prinsip ini dibahas oleh matematikawan Hongaria-Amerika ternama, John von Neumann (satu dari dua kandidat untuk gelar terhormat bapak komputer modern – yang seorang lagi adalah Alan Turing, matematikawan muda Inggris yang, lewat kegeniusannya dalam mengurai sandi, barangkali telah berjasa paling besar dibanding semua orang lain di pihak Sekutu dalam memenangkan Perang Dunia II, tetapi meninggal dunia karena bunuh diri setelah perang akibat persekusi peradilan, termasuk suntikan hormon paksa, atas homoseksualitasnya). Tapi hingga saat ini, mesin von Neumann atau robot PRIT pengganda diri belum lagi terbangun. Mungkin, takkan pernah terbangun. Mungkin, upaya untuk itu berada di luar batas-batas kemungkinan praktis.

Ah, masa iya? Bahwa robot pengganda diri belum pernah dibangun – omong-kosong apa itu? Lalu, kalau begitu, saya ini apa? Atau Anda? Atau lebah atau bunga atau kanguru? Kita semua ini apa kalau bukan robot-robot PRIT? Kita tidak dibuat untuk tujuan yang sama: Kita telah dirakit oleh proses-proses perkembangan embrionik, atas arahan tertinggi dari gen-gen yang telah terseleksi secara alami. Tapi yang nyatanya kita

lakukan sama persis dengan bunyi instruksi untuk robot PRIT khayali tadi. Kita menjelajahi dunia, mencari bahan-bahan mentah yang dibutuhkan untuk merakit komponen-komponen yang dibutuhkan untuk memelihara diri kita dan akhirnya merakit robot lain yang mampu melakukan hal yang sama. Bahan-bahan mentah tersebut adalah molekul-molekul yang kita tambang dari lapisan pangan yang kaya.

Sebagian orang merasa tersinggung disebut robot. Biasanya karena mereka berpikir robot itu mayat hidup dungu yang berjalan tersentak-sentak, tanpa kendali diri yang baik, tanpa kecerdasan, dan tanpa keluwesan. Namun ini semua bukanlah ciri-ciri wajib atau penting dari robot. Kebetulan saja ciri-ciri itu ada pada beberapa robot yang telah kita bangun dengan teknologi masa kini. Kalau saya katakan bahwa bunglon, atau serangga tongkat atau manusia itu robot yang membawa instruksi pemrogramannya sendiri di dalam tubuhnya, saya sama sekali tidak sedang menaksir ihal kecerdasannya. Sebuah entitas bisa sangat cerdas dan tetap robot. Saya pun tidak sedang menilai ihal keluwesannya, karena robot bisa sangat fleksibel. Manusia abad ke-20 yang menolak disebut robot sebetulnya sedang menolak asosiasi makna kata yang dangkal dan tidak relevan (seperti orang dari abad ke-18 yang menolak menyebut kapal uap sarana transportasi karena tidak ada kudanya). Robot adalah suatu mekanisme, dari kompleksitas dan kecerdasan yang belum ditentukan, yang disiapkan terlebih dahulu untuk melaksanakan tugas tertentu. Tugas robot PRIT adalah mendistribusikan salinan-salinan programnya sendiri ke seluruh wilayah, bersama dengan mesin-mesin yang diperlukan untuk mengeksekusi program tersebut.

Titik awal pembahasan kita tentang robot-robot penyalin diri adalah ini. Kita sepakat bahwa program Gandakan Saya yang sederhana, seperti virus komputer atau virus DNA sungguhan, tetap bergantung pada dunia yang memudahkan mereka dengan adanya mesin-mesin yang mampu membaca dan mematuhi instruksi-instruksinya. Namun, kemudahan itu timbul hanya karena seseorang, atau sesuatu, yang lain sudah membangun mesin-mesin pelaksana arahan itu. Kita kini telah membayangkan robot yang amat canggih yang, sekali lagi, memuat pengalihan besar pada program Gandakan Saya. Alih-alih memerintahkan Gandakan Saya, program ini berbunyi: 'Rakit komponen-komponennya dan buat versi baru dari seluruh mesin yang dibutuhkan untuk menyalin saya, lalu muat saya ke dalam komputer bawaannya.'

Kita telah sampai lagi di titik kesimpulan bab sebelumnya. Gajah adalah pengalihan besar pada sebuah program komputer yang ditulis dalam bahasa DNA. Burung unta adalah pengalihan yang lain, pohon ek adalah pengalihan yang lain. Dan, tentu, manusia pun begitu. Kita semua adalah robot-robot PRIT, mesin-mesin von Neumann. Tapi lantas bagaimana seluruh proses ini awalnya bermula? Untuk menjawab itu, kita harus kembali ke masa yang dahulu sekali, lebih dari 3.000 juta tahun, atau mungkin sampai 4.000 juta tahun. Di masa-masa itu, dunia ini jauh berbeda. Tidak ada kehidupan, tidak ada makhluk hayati; yang ada hanyalah fisika dan kimia, dan detail-detail kimia Bumi saat itu pun jauh berbeda. Sebagian besar, meski tidak semua, dari spekulasi-spekulasi berdasar tentang asal mula kehidupan dimulai dari, istilahnya, sup purba: kaldu encer berisi zat-zat kimia organik sederhana di laut. Tak ada yang tahu seperti apa kejadiannya,

tetapi tanpa melanggar hukum-hukum fisika dan kimia, muncullah sebuah molekul yang kebetulan memiliki sifat salin-diri – sebuah replikator.

Kelihatannya ini seperti keberuntungan yang luar biasa. Saya perlu berkomentar sedikit tentang ‘keberuntungan’ ini. Pertama, ia hanya perlu terjadi sekali saja. Dalam hal ini, ia agak mirip keberuntungan yang dibutuhkan agar sebuah pulau dapat terhuni. Sebagian besar pulau di seluruh dunia, yang terpencil sekalipun seperti Pulau Ascension, dihuni oleh satwa. Sebagian di antara hewan-hewan ini, misalnya burung dan kelelawar, sampai ke sana melalui proses yang dapat dengan mudah kita pahami, tanpa harus mengemukakan keberuntungan besar. Tapi binatang-binatang lain, seperti kadal, tidak bisa terbang. Kita menggaruk-garuk kepala dan bertanya-tanya, bagaimana bisa mereka tiba di sana? Agaknya tak memuaskan rasanya kalau kita mengajukan keberuntungan gila-gilaan, misalnya: Kebetulan saja si kadal ini tersangkut di sebatang pohon bakau di pulau utama, yang tercabut dan hanyut ke seberang laut. Gila ataupun tidak, keberuntungan semacam ini memang terjadi – ada kadal di pulau-pulau di tengah samudra. Kita biasanya tidak mengetahui perinciannya karena peristiwa seperti ini tidak cukup sering terjadi sehingga kita ada jodoh untuk benar-benar menyaksikannya. Intinya adalah, hanya perlu terjadi sekali saja. Demikian pula halnya dengan asal mula kehidupan di sebuah planet.

Selain itu, sejauh yang kita ketahui, peristiwa ini mungkin hanya terjadi di satu saja dari satu miliar miliar planet di alam semesta. Tentu, banyak orang berpikir bahwa kehidupan sebetulnya terjadi di banyak planet, tetapi bukti yang kita

punya hanya *bukti* bahwa peristiwa itu terjadi di satu planet, setelah kurun setengah miliar hingga satu miliar berlalu. Peristiwa mujur seperti yang kita cermati ini *boleh jadi* teramat sangat muskil sampai-sampai peluangnya untuk terjadi, di suatu tempat di alam semesta, barangkali sekecil satu banding satu miliar miliar miliar pada tiap tahunnya. Kalau *memang* peristiwa ini terjadi di satu planet, di mana pun di alam semesta, planet tersebut mestilah planet kita – karena sekarang kita sedang memperbincangkannya.

Dugaan saya, kehidupan barangkali tidak selangka itu dan asal mula kehidupan barangkali tidak semuskil itu. Namun, ada argumen-argumen yang menentang dugaan tersebut. Salah satu contoh menariknya adalah argumen ‘Di mana mereka?’. Bayangkan sebuah suku bangsa Pasifik Selatan yang tinggal di pulau yang begitu terpencil, sampai-sampai dalam seluruh sejarah lisan suku tersebut tak pernah ada perahu bercadik yang menemukan pulau berpenghuni lainnya. Para tetua suku lantas berspekulasi tentang kemungkinan bahwa ada kehidupan di luar pulau mereka. Kubu ‘kita sendirian’ mengetengahkan argumen kuat bahwa, faktanya, pulau mereka sendiri tak pernah dikunjungi. Sekalipun perjalanan suku itu terbatas pada kisaran jangkau perahu bercadik, tidakkah semestinya ada suku-suku bangsa lain dengan teknologi perahu yang lebih maju dan canggih? Mengapa mereka tak pernah datang bertandang?

Pada kasus pulau-pulau berpenghuni di Bumi, sekarang ini semuanya sudah pernah dikunjungi, dan dewasa ini pastilah tinggal segelintir masyarakat yang tinggal di area yang begitu terpencil sampai-sampai tidak pernah melihat pesawat. Tetapi planet pulau kita di alam semesta tak pernah, sejauh yang kita

tahu dari catatan-catatan yang telah dibuktikan keasliannya, dikunjungi. Terlebih lagi, selama beberapa dasawarsa terakhir, kita telah memiliki perlengkapan untuk mendeteksi komunikasi radio dari jarak amat jauh. Ada sekitar satu juta bintang dalam radius yang dapat dijangkau gelombang-gelombang radio dalam seribu tahun. Seribu tahun adalah waktu yang singkat, menurut standar-standar bintang dan geologi. Jika peradaban-peradaban berteknologi itu lazim, sebagian di antaranya semestinya telah memancarkan gelombang-gelombang radio selama ribuan tahun lebih lama dari kita. Tidakkah semestinya kita telah mendengar selirih bisikan tentang keberadaan mereka sekarang? Ini bukan argumen yang menentang pikiran adanya kehidupan di suatu tempat lain di alam semesta. Tapi ini argumen yang menentang pikiran adanya kehidupan cerdas dan canggih, yang terdapat di tempat dengan jarak yang cukup rapat untuk berada dalam jangkauan radio dari pulau-pulau kehidupan lainnya. Jika kehidupan, saat bermula, dapat memunculkan hal selain probabilitas rendah untuk melahirkan kehidupan cerdas, kita dapat menganggap ini sebagai bukti bahwa kehidupan itu sendiri langka. Kesimpulan alternatif atas rantai penalaran ini adalah usulan muram bahwa kehidupan cerdas barangkali cukup sering muncul, tetapi biasanya singkat saja waktu yang berlalu antara penemuan radio dan pembinaaan diri akibat teknologi.

Kehidupan boleh jadi lazim di alam semesta, tetapi kita juga dapat berspekulasi bahwa kehidupan itu amatlah langka. Oleh karena itu, masuk akal bahwa jenis peristiwa yang kita cari, saat kita berspekulasi tentang awal mula kehidupan, boleh jadi merupakan peristiwa yang amat sangat muskil: bukan

jenis peristiwa yang dapat diduplikasi di laboratorium, bukan pula jenis peristiwa yang akan dipandang ‘mentak’ oleh seorang ahli kimia. Ini paradoks menarik, yang diurai tuntas dalam satu bab ‘Asal Mula dan Mukjizat’ di buku *Pembuat Arloji yang Buta*. Boleh jadi, kita sebetulnya sedang giat mencari teori dengan sifat khusus yang, bila kita temukan, akan kita nilai amat sangat tak mentak! Jika ditilik, kita boleh jadi justru khawatir apabila seorang ahli kimia berhasil mendukung teori asal mula kehidupan yang, menggunakan standar-standar biasa kemungkinan, kita nilai memang mentak. Di lain pihak, kehidupan kiranya telah muncul pada setengah miliar pertama dari 4,5 miliar tahun usia Bumi; kita (kehidupan) telah ada selama 8/9 usia Bumi dan saya masih merasa bahwa munculnya kehidupan di sebuah planet sama sekali bukan peristiwa yang tidak disangka-sangka.

Asal mula kehidupan, di mana pun itu, berasal dari munculnya, secara kebetulan, sebuah entitas swa-replikasi. Dewasa ini, replikator yang vital di Bumi adalah molekul DNA, tetapi replikator asalnya kemungkinan besar bukan DNA. Kita tidak tahu apa dia. Lain dari DNA, molekul-molekul pereplikasi asali ini tidak dapat bersandar pada mesin-mesin rumit untuk menggandakan diri mereka. Walaupun begitu, molekul-molekul ini pastilah sepadan dengan instruksi ‘Gandakan Saya’, ‘bahasa’ untuk menulis instruksi-instruksinya bukan bahasa yang telah sangat diformalkan sehingga hanya bisa dipatuhi oleh mesin yang rumit saja. Replikator asali ini mestilah tidak memerlukan mekanisme penguraian sandi yang rumit, seperti instruksi-instruksi DNA dan virus komputer sekarang ini. Penggandaan diri adalah sifat inheren dari struktur entitas tersebut, sama persis seperti, misalnya,

kekerasan adalah sifat inheren dari berlian – sesuatu yang tidak harus ‘diurai-sandikan’ dan ‘dipatuhi’. Kita boleh yakin bahwa para replikator asali ini, berbeda dari penerus-penerusnya kemudian – molekul-molekul DNA – tidak memiliki permesinan urai-sandi dan patuh-instruksi yang rumit, karena mesin-mesin rumit adalah hal yang muncul di dunia ini baru setelah bergenerasi-generasi evolusi. Dan evolusi baru bergerak setelah ada replikator. Untuk bisa lolos dari kungkungan ketat ‘dilema asal mula kehidupan’ (lihat di bawah), entitas-entitas pengganda diri asali mestilah cukup sederhana sehingga dapat muncul akibat ‘kecelakaan-kecelakaan’ kimiawi yang spontan.

Begitu para replikator spontan pertama ini ada, evolusi bisa maju melangkah. Sudah menjadi sifat sebuah replikator untuk menghasilkan populasi berisi salinan-salinan dirinya sendiri, dan itu berarti populasi berisi entitas-entitas yang juga menjalani penggandaan. Maka dari itu, populasi tersebut cenderung akan tumbuh secara eksponensial, hingga terhadang persaingan untuk mendapatkan sumber daya atau bahan-bahan mentah. Saya akan jabarkan wacana tentang pertumbuhan eksponensial ini sebentar lagi. Ringkasnya, populasi tersebut berlipat ganda pada interval yang beraturan, bukan cuma bertambah dengan jumlah konstan pada interval yang beraturan. Artinya, akan segera ada populasi replikator yang sangat besar dan, karena itu, akan timbul pula persaingan di antara mereka. Sudah menjadi sifat proses penyalinan bahwa mestilah ada ketaksempurnaan: Proses penggandaannya diselingi galat-galat acak. Oleh karena itu, akan muncul varietas-varietas replikator di dalam populasinya. Sebagian dari varian-varian ini akan kehilangan

sifat swa-duplikasinya dan bentuk mereka pun tidak akan dipertahankan di dalam populasi tersebut. Sebagian varian yang lain kebetulan memiliki sifat yang menyebabkan mereka mampu menggandakan diri dengan lebih cepat dan efisien. Konsekuensinya, jumlah mereka menjadi lebih banyak di populasi itu. Karena mereka sudah mulai bersaing untuk mendapatkan bahan-bahan mentah yang sama sebagai replikator rival, seiring waktu, jenis replikator yang tipikal dan purata di populasi tersebut akan terus digantikan oleh jenis purata yang baru dan lebih baik. Lebih baik dalam hal apa? Tentu saja dalam hal bereplikasi. Kemudian, peningkatan ini akan mewujud sebagai kemampuan untuk memengaruhi reaksi-reaksi kimiawi lain untuk memfasilitasi swa-replikasi. Lambat laun, pengaruh tersebut akan menjadi cukup rumit sehingga seorang pengamat, andai kata dia ada (tentu, sebetulnya tidak ada, karena butuh miliaran tahun untuk mengevolusikan sesuatu yang bisa disebut pengamat), boleh jadi menggambarkan proses tersebut sebagai penguraisandian dan pematuhan instruksi-instruksi. Dan andai pengamat tersebut ditanya apa makna dari instruksinya, ia mestilah menjawab bahwa maknanya adalah ‘Gandakan saya’.

Terdapat aneka kesulitan yang sudah pasti di dalam cerita ini. Di antaranya, sudah saya sebut dengan istilah dilema asal mula kehidupan. Makin besar jumlah komponen di dalam sebuah replikator, makin besar pula risiko bahwa salah satu di antaranya akan disalin dengan keliru, yang berakibat malafungsi total pada rakitan utuhnya. Hal ini menyiratkan bahwa para replikator primordial pertama mestilah memiliki segelintir komponen saja. Tapi molekul dengan jumlah

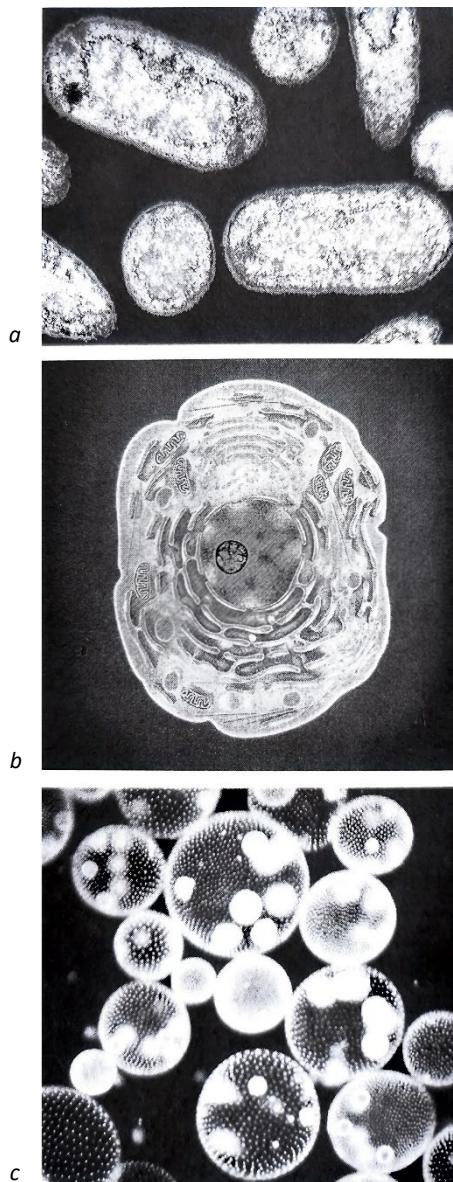
komponen yang lebih sedikit dari jumlah minimal tertentu kemungkinan terlalu sederhana untuk mampu merekayasa penggandaan dirinya. Upaya yang luar biasa cerdik dan pandai telah dikerahkan untuk merekonsiliasi dua syarat yang tampak saling bertentangan ini – dan lumayan berhasil, tetapi argumennya menjadi lebih matematis dari yang cocok untuk disajikan di buku ini.

Mesin-mesin replikasi purba – para pengganda robot pertama – mestilah jauh lebih sederhana dari bakteri, padahal bakteri adalah contoh paling sederhana dari robot-robot PRIT yang kita kenal sekarang ini (Gambar 9.3a). Bakteri hidup dengan sejumlah besar ragam cara dan, dari sudut pandang kimiawi, kisaran cara hidupnya yang jauh lebih lebar dibanding gabungan dari cara-cara hidup seluruh isi kerajaan makhluk hidup yang tersisa. Ada bakteri yang berkerabat lebih dekat dengan kita daripada dengan bakteri dari jenis-jenis asing yang lain. Ada bakteri yang mendapatkan pemenuhan kebutuhan hidupnya dari belerang di mata air panas – dan bagi mereka oksigen itu racun mematikan. Ada bakteri yang memfermentasikan gula menjadi alkohol dalam kondisi tanpa oksigen. Ada bakteri yang hidup dengan mengonsumsi karbon dioksida dan hidrogen, serta mengeluarkan metana. Ada bakteri yang berfotosintesis (menggunakan sinar matahari untuk menyintesikan makanan) seperti tumbuhan. Ada bakteri yang berfotosintesis dengan cara yang jauh berbeda dari tumbuhan. Aneka kelompok bakteri mencakup kisaran biokimia yang amat sangat beragam yang membuat, bila dibandingkan dengan keragamannya itu, kita semua – hewan, tumbuhan, fungi, dan sebagian bakteri lain – tampak seragam dan monoton.

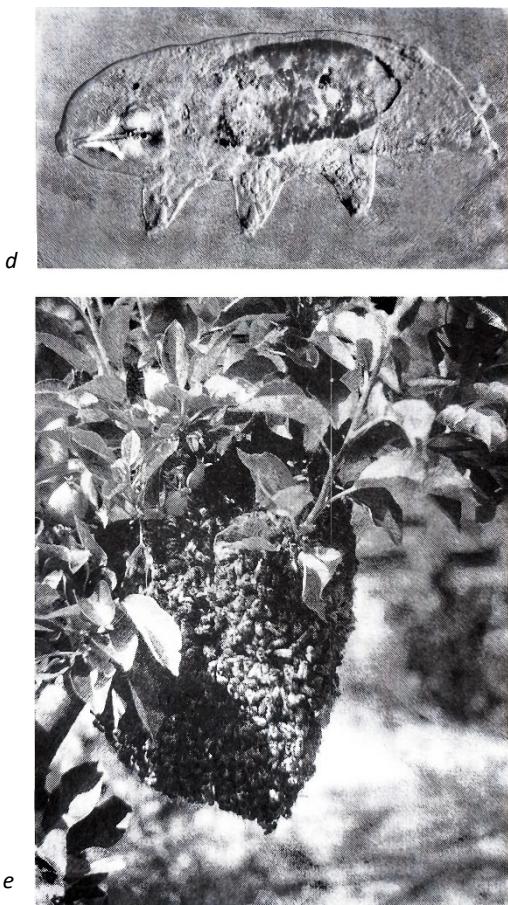


Lebih dari seribu juta tahun lalu, beberapa jenis bakteri berkumpul dan membentuk 'sel eukariotik' (Gambar 9.3b). Sel seperti ini selnya kita, dengan nukleus dan bagian-bagian internal rumit lain, yang banyak di antaranya disatukan dari selaput-selaput internal yang dilipat dengan ruwetnya, seperti mitokondria yang sempat saya tunjukkan di Gambar 5.2. Sel eukariotik itu kini dianggap berasal dari satu koloni bakteri. Sel-sel eukariotik itu sendiri kemudian berhimpun ke dalam koloni-koloni. Volvox adalah makhluk modern (Gambar 9.3c). Tapi ada kemungkinan mereka merepresentasikan hal yang terjadi lebih dari seribu juta tahun lalu, ketika sel-sel kita untuk pertama kalinya mulai berkumpul membentuk koloni-koloni. Penggandengan sel-sel eukariotik ini sepadan dengan penggandengan bakteri, yang terjadi lebih dini, ke dalam sel-sel eukariotik dan penggandengan gen-gen, yang terjadi lebih dini lagi, ke dalam bakteri. Komplotan-komplotan sel-sel eukariotik yang lebih besar dan padat disebut jasad-jasad metazoa. Gambar 9.3d menunjukkan jasad metazoa yang relatif kecil, seekor tardigrada (beruang air). Jasad-jasad metazoa itu sendiri kadang berkomplot membentuk koloni-koloni yang berperilaku layaknya individu-individu (Gambar 9.3e).

Tadi saya katakan bahwa gajah adalah pengalihan besar pada program Gandakan Saya, tetapi saya bisa saja berkata tikus alih-alih gajah dan kata 'besar' masih tetap tepat digunakan. Volvox memiliki beberapa ratus sel. Tikus adalah bangunan besar yang terdiri atas sekitar satu miliar sel. Gajah adalah koloni berisi kira-kira  $1.000$  triliun ( $10^{15}$ ) sel, dan tiap-tiap sel tersebut merupakan sebuah koloni bakteri. Andai gajah itu robot yang membawa cetak birunya sendiri, besarnya akan ti-



Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).



Gambar 9.3 Hierarki tingkat organisasi di antara rupa-rupa kehidupan: (a) bakteri; (b) sel eukariotik bertaraf maju, dilengkapi nukleus, yang awalnya dievolusikan dari koloni bakteri; (c) volvox, koloni sel-sel eukariotik yang terdiferensiasi; (d) koloni sel-sel eukariotik terdiferensiasi yang lebih padat-penduduk, seekor tardigrada. Tubuh manusia adalah koloni semacam itu – koloni berisi koloni-koloni, karena tiap-tiap sel kita merupakan koloni bakteri; (e) koloni berisi organisme-organisme: kerumunan lebah madu – sebuah koloni dari koloni-koloni dari koloni-koloni.

ada terkira. Gajah adalah sebuah koloni sel, tetapi – karena sel-sel itu membawa salinan dari instruksi DNA yang sama – mereka semua bergotong-royong, bekerja bersama mencapai satu tujuan: menggandakan data DNA identik mereka sendiri.

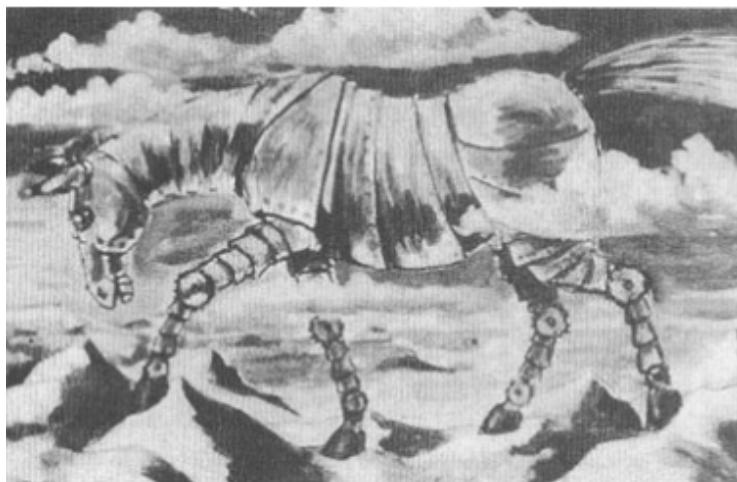
Tentu saja, gajah bukanlah benda yang amat besar, pada skala yang absolut. Dibanding bintang, gajah kecil. Besar di sini maksudnya dalam konteks perbandingannya dengan molekul-molekul DNA yang pelestarian dan penyebarannya menjadi tujuan gajah dirancang. Gajah besar dibandingkan para replikator pembuat gajah yang menumpang di dalamnya.

Untuk bisa membayangkan skalanya, bayangkan para insinyur membangun sebuah robot mekanis raksasa yang bisa kita tumpangi dalamnya, seperti prajurit Yunani di dalam Kuda Troya mereka. Tapi kuda mekanis kita ini dibangun dengan skala yang membuat ukuran tiap insinyur setara dengan ukuran salah satu dari molekul-molekul robot tersebut. Ingat, kita membayangkan kuda sungguhan sebagai robot yang dibangun dengan gen-gen yang menumpang di dalamnya. Maksud dari Gambar 9.4 adalah bahwa, andai kita membangun kuda robot untuk kita tumpangi sendiri, dan andai kuda robot kita sama besar, relatif terhadap kita, dengan besarnya kuda sungguhan, relatif terhadap gen-gen yang membangunnya, maka kuda robot kita dapat mengangkangi pegunungan Himalaya. Kuda hidup sungguhan terbuat dari triliunan sel. Dengan beberapa pengecualian kecil, tiap-tiap dari sel-sel tersebut memiliki seregu gen yang menumpang di dalamnya, walau sebagian besar daripadanya, di dalam satu jenis sel, tertidur.

Tubuh hidup sungguhan dapat menjadi begitu besar (diban-

ding gen-gen yang membangunnya) karena tumbuh melalui proses yang sangat berbeda dari cara tumbuh mesin buatan manusia; agak berbeda dari cara kuda mekanis ini dibangun, andai kata kuda itu akan dibangun. Metode pertumbuhan khusus yang diterapkan oleh benda-benda hidup adalah pertumbuhan eksponensial. Dengan kata lain, benda hidup tumbuh dengan penggandaan lokal.

Dimulai dengan satu sel yang sangat kecil. Atau, sel yang ukurannya kira-kira pas untuk ditumpangi gen-gen pembuatnya. Ukurannya berada dalam kisaran yang dapat mereka jangkau untuk manipulasi biokimiawi. Sulur-sulur pe-



Gambar 9.4 Kuda adalah wahana robot bagi molekul-molekul DNA dan kuda itu raksasa jika dibandingkan dengan mereka. Jika manusia membangun sebuah Kuda Troya untuk menumpang di dalamnya, dengan skala serupa yang relatif terhadap ukuran kita, wahana itu akan membuat pegunungan Himalaya tampak kerdil. Kuda fantasi ini dilukis oleh ibu saya, Jean Dawkins, untuk salah satu Kuliah Natal *Royal Institution* saya.

ngaruh mereka dapat meraih seluruh penjuru sebuah sel, dan sel tersebut dapat mereka bentuk sehingga memiliki sifat-sifat tertentu. Barangkali, sifat paling menakjubkan dari sel adalah kemampuannya untuk membelah diri menjadi dua sel anak yang, kurang lebih, serupa dengannya. Seturut si sel induk, tiap sel anak juga dapat membelah diri menjadi dua, membentuk empat sel cucu. Tiap-tiap dari keempat sel tersebut, pada gilirannya, dapat menggandakan diri, membentuk delapan, dan seterusnya. Inilah pertumbuhan eksponensial, atau penggandaan lokal.

Orang yang tidak terbiasa dengan alur itu akan merasa kaget dengan daya pertumbuhan eksponensial. Seperti janji saya tadi, saya akan luangkan sedikit waktu untuk membahasnya, karena penting. Ada banyak cara untuk mengilustrasikannya. Kalau kita lipat secarik kertas sekali, ketebalan kertas itu kini dua kali ketebalan awalnya. Lipat lagi dan kini ketebalannya empat kali lipat. Lipat lagi dan kini ketebalannya menggumpal jadi delapan kali lipat. Tiga lipatan lagi adalah kali terjauh yang bisa dilakukan, sebelum gumpalan tersebut menjadi terlalu kaku untuk dilipat: enam puluh kali ketebalan awal tadi. Tapi andaikan masalah kekakuan mekanis ini tidak ada dan kita bisa terus melipat sampai, katakanlah, lima puluh kali, setebal apa lantas gumpalan kertas itu? Jawabannya: amat sangat tebal sampai-sampai tingginya mencuat keluar dari atmosfer Bumi, menembus orbit planet Mars.

Demikian pula, dengan penggandaan lokal sel di seluruh tubuh yang sedang berkembang, jumlah sel bertambah amat pesat ke kisaran yang amat besar. Paus biru terbuat dari seratus ribu triliun ( $10^{17}$ ) sel. Begitu dahsyatnya daya pertumbuhan eksponensial, hanya butuh lima puluh tujuh generasi sel,

dalam kondisi ideal, untuk menghasilkan makhluk gergasi semacam itu. Yang saya maksud dengan satu generasi sel adalah satu kali penggandaan. Ingat bahwa jumlah sel naik 1, 2, 4, 8, 16, 32, dst. Jadi, butuh enam generasi sel untuk membentuk tiga puluh dua sel. Dan, jika kita terus melipatduakannya seperti itu, hanya perlu lima puluh tujuh generasi sel untuk sampai di jumlah seratus ribu triliun, jumlah sel di dalam tubuh seekor paus biru.

Cara menghitung jumlah generasi sel ini sebetulnya tidak realistik karena hasilnya hanyalah angka minimum. Cara ini mengasumsikan bahwa, setelah setiap generasi sel, semua sel tersebut terus menggandakan diri. Kenyataannya, banyak silsilah sel berhenti menggandakan diri lebih dini, ketika sudah selesai membangun bagian tubuh tertentu, misalnya hati. Silsilah-silsilah sel yang lain terus menggandakan diri lebih lama lagi. Jadi, seekor paus biru, faktanya, terdiri atas sejumlah silsilah sel dengan panjang berbeda-beda, yang membangun bagian-bagian berbeda dari pausnya. Sebagian dari silsilah-silsilah ini terus membelah diri sebanyak lebih dari lima puluh tujuh generasi sel. Sebagian yang lain berhenti membelah diri sebelum mencapai lima puluh tujuh generasi sel. Pada praktiknya, ada ‘sel-sel pokok’, subperangkat sel yang disisihkan untuk tujuan pembuatan salinan-salinan sel seperti diri mereka sendiri.

Kita bisa membuat hitungan kasar jumlah minimum generasi sel yang dibutuhkan, dalam kondisi ideal, untuk menumbuhkan hewan apa pun, dengan mengetahui bobotnya. Kita bisa menganggap bahwa hewan-hewan besar tidak memiliki sel-sel amat besar. Yang ada hanyalah jumlah yang lebih banyak dari jenis-jenis sel yang terdapat di dalam

hewan-hewan kecil. Kalkulasi kasarnya menunjukkan bahwa butuh sedikitnya empat puluh tujuh generasi penggandaan sel untuk menumbuhkan seorang manusia dewasa dan hanya sepuluh generasi sel lagi untuk menumbuhkan seekor paus biru. Angka-angka ini tentunya estimasi yang terlalu rendah dan alasan-alasannya telah saya sampaikan. Bagaimanapun, adalah benar bahwa, dengan dahsyatnya kekuatan pertumbuhan eksponensial, hanya perlu perubahan kecil pada kurun terus membelah dirinya sebuah silsilah sel tertentu, untuk mencapai perubahan dramatis dalam ukuran akhir limpahan sel yang diproduksi. Mutasi kadang melakukan ini.

Teknologi pembangunan tubuh-tubuh kolosal ini – kolosal menurut standar para pembangun dan penumpangnya (DNA) – dapat disebut gigateknologi. Gigateknologi berarti seni membangun benda-benda yang ukurannya, paling tidak, satu miliar kali lebih besar dari Anda. Seni gigateknologi adalah pengalaman yang belum pernah dimiliki para insinyur kita. Wahana-wahana terbesar yang kita bangun untuk ditumpangi – kapal-kapal besar – tidaklah sangat besar jika diukur relatif terhadap ukuran para pembangunnya; kita bahkan bisa mengelilingi wahana-wahana itu dalam hitungan menit. Saat membangun benda seperti kapal, kita tidak bisa melakukannya dengan teknik pembangunan eksponensial. Yang bisa kita lakukan hanyalah mengerubuti sekujur strukturnya, mematri dan menyatukan ratusan pelat baja yang telah dibuat setengah jadi.

DNA, saat membangun robotnya, wahana untuk ditumpanginya, memiliki sarana pertumbuhan eksponensial yang dapat diperintahnya. Pertumbuhan eksponensial adalah kekuatan besar yang berada dalam genggaman gen-gen yang

terseleksi secara alami. Artinya, penyesuaian renik pada sebuah detail kendali pertumbuhan embrionik dapat memunculkan efek paling dramatis sebagai luarannya. Mutasi yang memerintahkan sebuah subsilsilah sel tertentu untuk membelah diri satu kali lagi – misalnya, dari dua puluh empat ke dua puluh lima generasi sel – pada prinsipnya dapat menimbulkan efek penggandaan ukuran bagian tubuh tertentu. Trik yang sama – mengubah jumlah generasi sel atau laju pembelahan sel – dapat digunakan oleh gen pada proses embriologi untuk mengubah bentuk salah satu bagian tubuh. Manusia modern memiliki dagu yang lebih menonjol dari leluhur kita yang terbilang ‘modern’: *Homo erectus*. Untuk mengubah bentuk dagu, tinggal menyesuaikan sedikit jumlah generasi sel di bagian-bagian tertentu pada tengkorak embrioniknya.

Yang menakjubkan adalah bahwa silsilah-silsilah sel berhenti membelah diri bila memang sudah saatnya; karena itulah, bagian-bagian tubuh kita proporsional satu dengan yang lain. Tentu, di beberapa kasus, silsilah-silsilah sel justru tidak berhenti membelah diri, padahal sudah waktunya. Bila itu terjadi, kita menyebutnya kanker. Randolph Nesse dan George Williams (dalam buku cemerlang yang mereka tulis dengan judul sempurna *Darwinian Medicine* atau *Kedokteran Darwinian*, tetapi yang ditumpangi oleh para penerbit dengan judul-judul tak berkesan dan bervariasi tergantung lokasi penerbitannya) mengetengahkan poin bijak mengenai kanker. Sebelum bertanya mengapa kita mengidap kanker, patutlah kita bertanya mengapa kita tidak selalu mengidapnya.

Siapa yang tahu manusia akan atau tidak akan mencoba membangun benda-benda dengan gigateknologi? Tapi orang

sudah membicarakan *nanoteknologi*. Jika ‘giga’ berarti satu miliar, ‘nano’ berarti satu per satu miliar. Nanoteknologi berarti teknik rekayasa benda yang ukurannya satu per satu miliar kali ukuran pembangunnya.

Ada kalangan – dan tokoh pemukanya tidak semua berasal dari kelompok New Age atau orang-orang fanatik dari kultus tertentu – yang berkata bahwa hal seperti Gambar 9.5 tak lama lagi akan menjadi kenyataan. Jika mereka benar, hampir tak ada segi kehidupan manusia yang tidak terkena dampak dramatisnya. Kedokteran adalah salah satu contohnya. Para dokter bedah modern adalah orang-orang berketerampilan tinggi, dengan instrumen-instrumen yang pelik dan presisi. Melepas lensa mata yang kabur karena katarak dan menggantinya dengan lensa pengganti, sebagaimana dilakukan dokter bedah modern, adalah kemampuan yang bukan main. Instrumen-instrumen yang mereka gunakan amatlah halus dan persis. Namun, dibandingkan dengan skala nanoteknologi, instrumen-instrumen itu tetap amat sangat kasar. Coba simak Eric Drexler, seorang ilmuwan Amerika yang didapuk sebagai pemuka nanoteknologi, saat ia melukiskan pisau dan benang bedah saat ini dari sudut pandang nano.

Pisau dan benang bedah modern terlalu kasar untuk memperbaiki pembuluh kapiler, sel, dan molekul. Coba bayangkan prosedur bedah ‘halus’ dari sudut pandang sel: sebilah belati besar menusuk masuk, dengan babi buta mencincang mesin-mesin molekuler sekumpulan sel hingga putus dan tembus, membantai ribuan di antara mereka. Kemudian, sebatang menhir besar menerobos melalui kerumunan yang telah terbelah itu, menyeret kabel selebar gerbong kereta barang di belakangnya untuk mengikat kembali kerumunan itu jadi satu. Dari sudut pandang sel, prosedur bedah



Gambar 9.5 Fantasi dalam nanoteknologi. Peranti-peranti robot yang dikirim untuk memperbaiki butir-butir darah merah.

terhalus sekalipun, yang dijalankan dengan pisau tajam dan keterampilan lihai, tetaplah ibarat pekerjaan tukang jagal. Hanya kemampuan sel untuk meninggalkan yang mati, berkumpul kembali, dan memperbanyak dirilah yang memungkinkan kesembuhan itu terjadi.

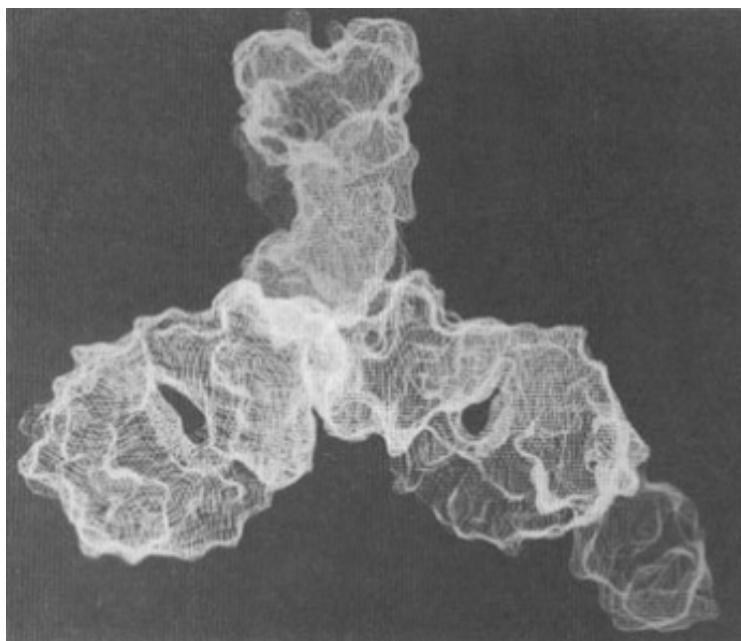
Tentu, ‘menhir’ di situ maksudnya jarum bedah yang halus, dan kabel selebar gerbong kereta barang adalah benang bedah terhalus. Nanoteknologi menghadirkan impian untuk membangun instrumen-instrumen bedah yang cukup kecil untuk dapat diterapkan pada skala yang sama dengan sel-sel itu sendiri. Instrumen-instrumen semacam itu akan jauh terlalu kecil untuk dikendalikan dengan jari-jemari seorang

ahli bedah. Kalau, pada skala seluler, seutas benang saja sudah selebar gerbong kereta barang, bayangkan selebar apa jari-jari dokter bedahnya. Perlu ada mesin-mesin otomatis kecil, robot-robot mungil, yang tak ubahnya versi-versi miniatur dari robot-robot industri yang kita jumpai tadi di bab ini.

Robot sekecil ini boleh jadi piawai dalam memperbaiki, misalnya, sel darah merah yang terjangkit penyakit. Tapi ada gerombolan pasukan sel-sel darah merah yang perlu dilalui robot itu, sekitar 30 miliar jumlahnya dalam tubuh setiap dari kita. Lantas, bagaimana mungkin robot nanoteknologi cilik ini mengatasi masalah itu? Barangkali Anda sudah menebak jawabannya: multiplikasi eksponensial. Harapannya adalah bahwa robot nanoteknologi akan menggunakan teknik swa-multiplikasi yang sama seperti sel-sel darah itu sendiri. Robot akan mengklonakan – mereplikasi – dirinya sendiri. Dengan daya pertumbuhan eksponensial, populasi robot itu mestinya melonjak hingga miliaran, seperti halnya populasi sel darah merah melejit hingga miliaran.

Nanoteknologi semacam ini adalah perkara masa depan, yang boleh jadi takkan pernah datang. Alasan para ilmuwan yang mengajukannya berpikir bahwa nanoteknologi patut diupayakan adalah ini. Mereka tahu, walau kelihatan asing dan ganjil, yang sepadan dengan nanoteknologi sudah berjalan di sel-sel kita. Dunia DNA dan molekul protein adalah dunia yang benar-benar berlangsung pada skala yang, jika berhasil kita capai, akan disebut nanoteknologi. Saat seorang dokter menyuntik Anda dengan imunoglobulin untuk mencegah penyakit hepatitis, dokter tersebut mengisi aliran darah Anda dengan padanan alami dari peranti-peranti nanoteknologi. Tiap molekul imunoglobulin merupakan objek rumit yang,

layaknya semua molekul protein lain, bergantung pada bentuknya agar bisa menjalankan fungsinya (Gambar 9.6). Instrumen-instrumen medis kecil ini berkhasiat hanya karena jumlahnya jutaan. Mereka telah diproduksi besar-besaran – diklonakan – menggunakan teknik-teknik pertumbuhan populasi eksponensial. Dalam hal ini, mereka teknik-teknik biologis: kerap ditumbuhkembangkan di darah seekor kuda, misalnya. Vaksin-vaksin lain memacu kecenderungan tubuh untuk mengklonakan antibodi-antibodi seperti imunoglobulin kuda tersebut. Harapannya, alat-alat nanoteknologi, yang serupa dengan robot-robot industri miniatur, dapat diklonakan dengan prosedur-prosedur yang dirancang cerdik.



Gambar 9.6 Nanoteknologi dunia alami: molekul imunoglobulin.

Terjemahan ini diterbitkan dan tersedia  
GRATIS di [translationsproject.org](http://translationsproject.org).

Nanoteknologi, bagi kita, tampak asing dan sulit dipercaya. Dunia mesin di tataran atom tampak seperti dunia yang teramat asing, lebih asing dari kehidupan di planet-planet lain, sebagaimana dikhayalkan oleh para penulis fiksi ilmiah. Nanoteknologi, bagi kita, adalah hal yang boleh jadi terwujud di masa depan. Ia adalah hal yang mendebarkan, mungkin agak menakutkan dan kelihatannya baru. Padahal, jauh dari kata baru dan asing, nanoteknologi sebenarnya purba. Benda-benda besar seperti kita inilah yang baru, ganjil, asing. Kita adalah produk gigateknologi (giga dari sudut pandang gen-gen kita) yang gres dan mutakhir (baru beberapa ratus juta tahun). Pada dasarnya, kehidupan berpijak pada dunia nano yang dihuni entitas-entitas renik (nano dari sudut pandang kita), dunia molekul-molekul protein, yang dibuat menjadi molekul-molekul DNA dengan spesifikasi tersandi dan yang mengendalikan interaksi dengan molekul-molekul lainnya.

Kita tinggalkan nanoteknologi di masa depan. Kita kembali ke pesan utama bab ini dan bab sebelumnya. Gen-gen seekor gajah atau seorang manusia, seperti gen-gen virus, dapat dianggap sebagai program komputer Gandakan Saya. Gen-gen virus adalah instruksi-instruksi tersandi yang berbunyi (kalau kebetulan sedang menjangkiti seekor gajah): 'Wahai sel-sel gajah, gandakan saya.' Gen-gen gajah berkata. 'Wahai sel-sel gajah, bahu-membahu lah kalian untuk membuat gajah baru, yang harus diprogram untuk nanti tumbuh besar dan membuat lebih banyak gajah baru, yang semuanya diprogram untuk menggandakan saya.' Prinsipnya sama. Cuma bahwa ada program-program Gandakan Saya yang lebih memutar dan berliku-liku dari program-program lainnya. Hanya program-program parasit yang bisa terus langsung, karena

menggunakan mesin-mesin yang dibuat untuk siap mematuhi instruksi-instruksi mereka. Gen-gen gajah pun bukanlah program-program yang sangat nonparasit jika dibandingkan dengan sub-subrutin padanannya yang parasit. Gen-gen seekor gajah ibarat koloni gergasi berisi virus-virus yang saling mendukung. Tiap gen gajah memainkan peran yang tidak lebih besar dari peran yang dimainkan sebuah gen virus. Tiap-tiapnya memainkan peran kecilnya sendiri dalam gotong-royong membangun mesin-mesin yang mereka semua butuhkan bagi eksekusi program mereka. Tiap-tiapnya berkembang karena kehadiran yang lain. Gen-gen virus juga berkembang karena kehadiran gen-gen gajah yang kooperatif, tetapi mereka tidak membalas dengan kontribusi positif apa pun. Kalau iya, mungkin sepatutnya kita tidak menyebut mereka gen-gen virus, tetapi gen-gen gajah. Dengan kata lain, setiap tubuh mengandung gen-gen sosial dan antisosial. Yang antisosial kita panggil dengan sebutan gen-gen virus (dan jenis-jenis gen parasit lainnya). Yang sosial kita panggil dengan sebutan gen-gen gajah (manusia, kanguru, kurma, dll.). Tapi gen-gen itu sendiri, entah sosial entah antisosial, entah gen virus entah gen ‘milik sendiri’, hanyalah instruksi-instruksi DNA, dan mereka semua berkata, dengan satu atau lain cara, entah yang nikmat entah yang lakenat, entah yang singkat entah yang saling selimpat, ‘Gandakan Saya’.

## BAB 10

### 'KEBUN SELINGKUNG'

SUDAH JAUH KITA MELANGKAH DAN AKHIRNYA SIAP UNTUK kembali ke yang tersulit dan terumit dari semua cerita saya, cerita buah ara. Kita awali dengan uraian berikut yang, sekilas, terkesan tak ubahnya gombal sastrawi penceramah malang yang saya sindir di paragraf-paragraf pembuka buku ini. Ara bukanlah buah, melainkan kebun bunga yang dibalik dari dalam ke luar. Ia tampak seperti buah. Ia terasa seperti buah. Ia menempati ceruk buah di khazanah bentuk pada batin kita dan pada pola-pola kultural yang telah ditemukan oleh para ahli antropologi. Namun, ia bukan buah; ia kebun selingkung, kebun gantung, dan salah satu keajaiban dunia. Saya tidak akan membiarkan pernyataan ini menggantung menjadi buah pikiran khusuk untuk dipetik oleh mereka yang 'peka' sementara semua yang lain pada senewen. Berikut ini maknanya.

Maknanya berakar pada evolusi. Buah-buah ara diturunkan, melalui seuntai rantai perantara yang berjenjang rapat, dari leluhur yang secara permukaan tampak sangat lain dari buah ara modern. Bayangkan sebuah film selang-waktu (*time-lapse*) yang disusun dengan cara berikut. Bingkai pertama adalah buah ara modern, yang baru saja dipetik dari pohonnya, dibelah di bagian tengahnya, diletakkan di atas selembar kartu, lalu difoto. Bingkai kedua adalah buah ara serupa dari satu abad yang lalu. Lanjutkan hingga berabad-abad ke belakang, ara demi ara, bingkai demi bingkai, terus sampai

buah ara yang mungkin dimakan oleh Yesus, atau dipetik oleh seorang budak untuk Raja Nebukadnezar di Taman Gantung Babilonia, ara dari negeri Nod, Timur Eden, ara yang memaniskan hidup *Homo erectus*, *Homo habilis*, serta si kecil Lucy dari Bangsa Afar yang singkat dan haus akan gula; kembali ke masa sebelum budi daya, kembali ke tumbuhan ara liar di hutan belantara, dan seterusnya. Sekarang, putar film tersebut dan saksikan buah ara modern beralih rupa ke leluhur jauhnya. Perubahan apa saja yang akan kita lihat?

Sudah pasti, makin jauh ke belakang, makin kecil ukurannya karena buah ara hasil budi daya telah dimontokkan selama berabad-abad dari buah-buah leluhur liar yang lebih keras dan kecil. Tapi perubahan ini perubahan superfisial dan, meski menarik, akan berakhir dalam beberapa milenium pertama dari perjalanan kita kembali ke masa lalu. Yang lebih radikal dan mencengangkan adalah perubahan yang akan tampak saat film diputar lebih jauh, hingga jutaan tahun. ‘Buah’ tersebut akan menyeruak. Lubang mungil yang hampir tak terlihat pada pucuknya akan monyong, membuka, menganga hingga tak lagi berupa lubang, tetapi cawan. Cermati permukaan dalam dari cawan itu dan akan tampak barisan bunga-bunga kerdil. Awalnya, cekungan cawan itu dalam. Lalu, saat film diputar balik menyusuri waktu, pelan-pelan tapi pasti cekungannya makin dangkal. Barangkali ia akan sampai ke tahap rata seperti bunga matahari, karena setangkai bunga matahari pun sebetulnya berisi ratusan bunga kecil yang menyesaki satu alas bersama. Lanjut terus melampaui tahap bunga matahari, cawan ara kita mencembung hingga bunga-bunga kecilnya berada di sisi luar, seperti murbei (ara adalah anggota famili murbei). Lebih ke belakang lagi, melampaui

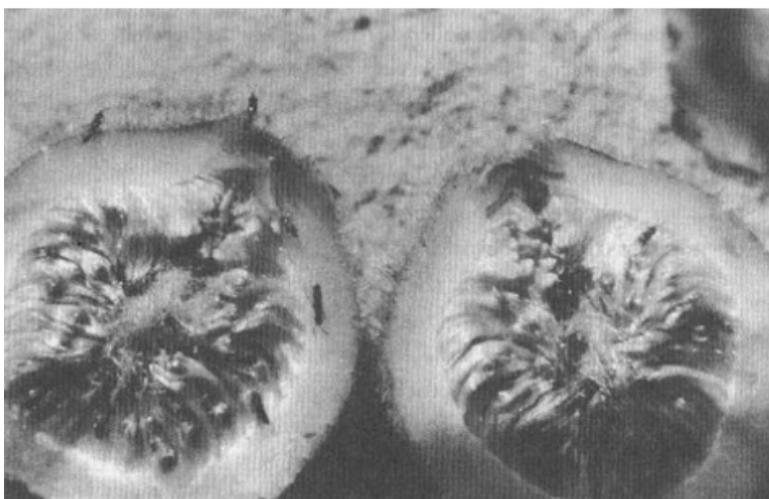
tahap murbei, bunga-bunga kecil itu memisah dan menjadi bunga-bunga tersendiri, seperti pada bunga *hyacinth* (meski *hyacinth* tidak berkerabat dekat dengan ara).

Tidakkah melukiskan sebiji ara sebagai ‘kebun selingkung’ agak terkesan dibuat-buat, atau bahkan rangah? Lagi pula, kita tak bisa melukiskan *hyacinth* atau murbei sebagai kebun terpajan. Pembelaan saya pembelaan yang kuat dan sama sekali tidak mengada-ada. Lihatlah kebun dari mata serangga yang menyerbuki bunga-bunganya. Kebun, pada skala ukuran manusia, adalah populasi bunga di atas sepetak tanah bermeter-meter persegi. Para penyerbuk ara begitu mungil sehingga, bagi mereka, bagian dalam sebiji buah ara tampak bak kebun, meski memang kebun kecil. Kebun ini ditanami ratusan bunga mini, baik jantan maupun betina, masing-masing dengan bagian-bagian reniknya sendiri. Selain itu, buah ara sungguh sebuah dunia yang selingkung dan swasembada untuk para penyerbuk mininya.

Secara teknis, para penyerbuknya adalah tawon-tawon yang masih tergolong satu famili, Agaonidae, dan mereka mungil, terlalu kecil jika dilihat tanpa kaca pembesar. Istilah ‘secara teknis’ di sini berarti bahwa, meski tidak tampak adanya kemiripan kuat dengan tawon kuning-hitam yang meneror stoples selai di musim panas, tawon ara berasal dari leluhur yang sama dengan mereka. Bunga-bunga ara diserbuki hanya oleh tawon-tawon cilik ini (Gambar 10.1). Hampir setiap spesies ara (dan ada lebih dari 900 jumlahnya) punya spesies tawon pribadinya sendiri, yang telah menjadi pendamping genetiknya di sepanjang waktu evolusi, sejak keduanya memisah bersama dari para pendahulunya masing-masing. Tawon bergantung penuh pada ara untuk mendapatkan

makanan dan ara bergantung mutlak pada tawon untuk membawa serbuk sarinya. Tiap spesies akan lekas punah tanpa kompanyonnya. Hanya tawon betina, yang keluar dari buah ara tempatnya lahir, yang menjadi pembawa serbuk sari. Bentuk mereka seperti bayangan kita atas tawon-tawon yang dikerdilkan dengan sangat. Di lain pihak, tawon-tawon jantan tidak bersayap karena mereka lahir dan mati di dunia gelap dan tertutup sebiji buah ara; mereka pun tampak seperti bukan tawon, apalagi tawon dari spesies yang sama dengan para betinanya.

Cerita hidup tawon-tawon ara sulit dituturkan karena berupa siklus dan kurang jelas dari titik mana mestinya uraian kita diawali. Memang begitulah adanya. Namun, cerita akan saya



Gambar 10.1 Bagian dalam buah ara dengan tawon-tawon ara jantan dan betina.

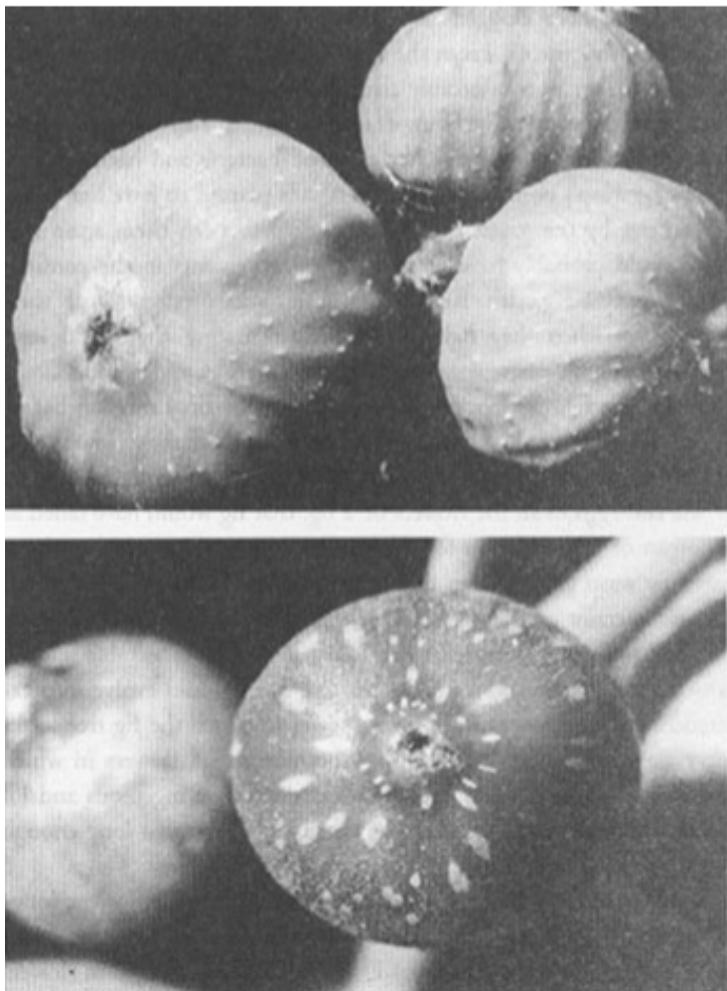
awali dari menetasnya larva-larva tawon yang baru, masing-masing meringkuk di kapsul mungilnya, di dasar salah satu bunga betina, jauh di dalam kebun selingkung itu. Makan bakal biji, ia tumbuh dewasa dan menerobos kapsul dengan mengunyah dindingnya, keluar ‘bebas’ menuju bagian dalam buah ara yang gelap. Tawon jantan dan tawon betina menjalani cerita hidup yang lumayan berbeda. Yang jantan menetas terlebih dahulu, lalu menggeledah buah ara untuk mencari kapsul betina yang belum lahir. Bila tertemukan, ia masuk dengan mengunyah dinding ovul tersebut dan mengawini perawan yang masih orok itu. Tawon betina lantas keluar dari kapsul lahirnya dan mengawali perjalanan keliling di kebun gantung mini tersebut. Perincian tentang kejadian berikutnya agak berbeda-beda, tergantung spesiesnya. Namun, berikut ini garis besarnya. Tawon betina mencari bunga-bunga jantan, yang kerap berada di dekat jalan masuk ke buah ara. Dengan sikat serbuk sari khusus di kaki-kaki depannya, dalam kegelapan ia bekerja, secara sistematis menyendok serbuk ke kantong-kantong khusus di cekungan-cekungan dadanya.

Ia tampak berupaya keras untuk mengangkut serbuk sari dengan wadah-wadah khusus di tubuhnya itu. Sebagian besar serangga penyerbuk hanya dibedaki dengan tepung sari, mau tak mau. Mereka tidak memiliki perangkat angkut, ataupun naluri untuk memuat serbuk sari. Tapi lebah iya. Mereka punya keranjang-keranjang serbuk sari di kaki-kaki mereka, yang mengembol kuning atau cokelat dengan serbuk sari yang dijejalkan ke dalamnya. Namun lebah, lain dari tawon ara, mengangkut serbuk sari untuk dijadikan makanan larva mereka. Tawon ara tidak mengangkut serbuk sari untuk

dimakan. Mereka sengaja memuatnya ke kantong-kantong khusus, semata-mata untuk tujuan membuat ara (yang manfaatnya akan mereka petik juga, tetapi dengan cara yang lebih tak langsung). Kita akan kembali ke perkara kerja sama yang tampak akur antara ara dan para penyerbuknya nanti.

Sarat akan muatan serbuk berharga, tawon-tawon betina meninggalkan buah ara menuju angkasa terbuka di dunia luar sana. Bagaimana persisnya ia keluar, berbeda-beda tergantung spesiesnya. Ada yang keluar melalui pintu gerbang kebunnya, lubang kecil yang terletak di pucuk buah itu (Gambar 10.2). Di beberapa spesies lain, tawon jantanlah yang bertugas melubangi dinding buahnya, dan mereka melakukannya dengan gotong-royong, melibatkan puluhan pejantan. Setelah itu, peran tawon jantan usailah, tetapi misi besar sudah menanti si tawon betina. Ia mengudara ke ranah yang asing, mencari – barangkali dengan indra penciumannya – buah ara lain dari spesies mitra khususnya sendiri. Buah ara semata wayang yang dicarinya haruslah pula tengah berada pada fase hidup yang tepat, yaitu fase matangnya putik pada bunga betina.

Setelah menemukan buah ara dari jenis yang tepat, tawon betina mencari lubang sempit di pucuknya dan merangkak masuk melalui lubang itu ke ruang gelap di dalamnya. Gabagaba itu begitu sesak sampai-sampai, saat menyusup masuk melaluinya, sayap si tawon kemungkinan copot karena tersangkut akar-akarnya. Para penyelidik yang meneliti pori-pori buah ara telah mendapati pori-pori ini dalam keadaan tersumpal sayap, antena, dan serpihan tubuh tawon yang lain. Dari sudut pandang ara, jalan masuk yang sempit merepotkan ini bermanfaat karena mencegah masuknya parasit-parasit



Gambar 10.2 Pintu gerbang kebun: bagian luar buah ara yang menunjukkan jalan masuknya.

yang tak diinginkan. Lorong halang-rintang perontok sayap yang dilalui tawon betina ini juga kemungkinan berfungsi untuk membersihkannya dari bakteri dan kotoran berbahaya.

Dari sudut pandang si tawon, sekalipun menyakitkan kalau sayap-sayapnya rontok tersangkut akar-akar di lorong itu, toh ia sudah tidak membutuhkannya dan geraknya di kebun selingkung yang sempit itu justru terhalang jika sayapnya masih ada. Ingat, semut ratu kerap menggigit putus sayapnya sendiri setelah masa terbang untuk kawin usai dan ia sampai di tahap hidup di bawah tanah, yang membuat geraknya terhalang jika sayap masih ada.

Di dalam buah ara itu, tawon betina menuntaskan misi akhirnya sebelum mati, dan misi ini misi ganda. Ia menyerbuki semua putik yang ia kunjungi di dalam buah ara itu dan ia bertelur di sana. Tidak di semua bunga, tapi. Di sebagian saja. Kalau semuanya, buah ara itu akan gagal sebagai organ reproduksi untuk pohnnya karena biji-bijinya akan habis dimakan oleh larva tawon. Apakah tindakan menyisihkan sebagian bunga ini menunjukkan sikap altruistik tawon? Pertanyaan itu perlu ditangani dengan hati-hati. Ada kondisi-kondisi tertentu yang, menurut teori Darwinian, dapat menimbulkan perilaku menahan diri sebagaimana diperagakan tawon-tawon ini. Namun, sedikitnya ada beberapa spesies ara yang pohnnya menjaga kepentingannya sendiri dengan menentukan jatah jumlah bunga yang boleh diteluri oleh tawon. Teknik-tekniknya luar biasa cerdik, dan saya akan melantur sebentar dari uraian tentang daur hidup normal tawon ara untuk menjelaskan dua di antaranya.

Pada beberapa spesies, buah ara mengandung dua jenis bunga betina: berputik panjang dan berputik pendek. (Putik adalah organ reproduksi betina yang tegak seperti tiang di bagian tengah semua bunga.) Tawon mencoba bertelur di kedua jenis

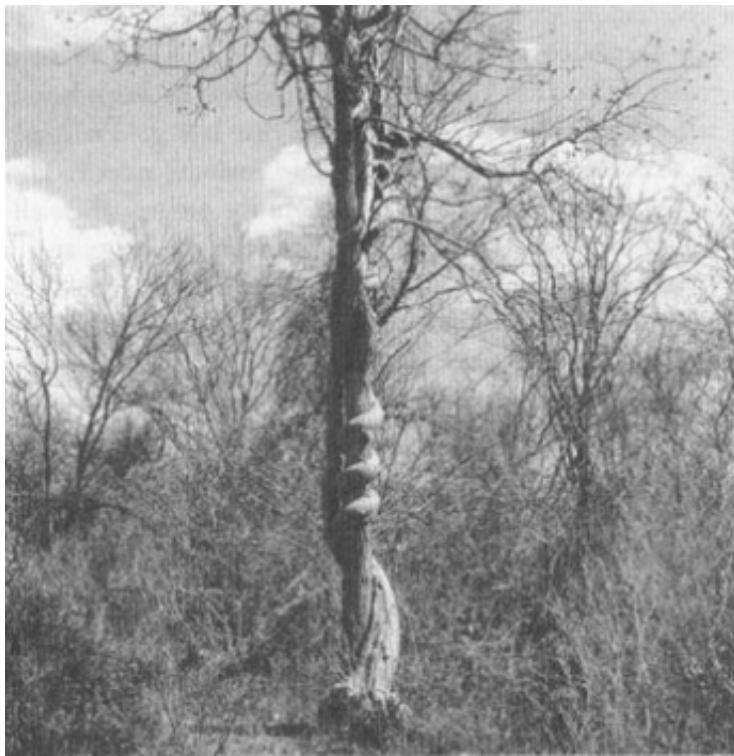
bunga ini tetapi ovipositornya terlalu pendek untuk menggapai dasar dari bunga-bunga berputik panjang sehingga ia menyerah dan mencari yang lain. Hanya ketika ia tiba di bunga berputik pendek sajalah ovipositornya bisa sampai ke bagian dasar, dan ia pun bertelur satu di sana. Pada spesies ara yang lain, yang tidak membedakan bunga dengan ciri putik panjang dan putik pendek, metode pohon ara dalam menertibkan perilaku tawon bisa lebih kejam lagi. Atau begitulah kiranya yang diyakini W. D. Hamilton, kini kolega saya di Oxford dan merupakan salah seorang penerus Darwin terdepan zaman sekarang. Hamilton mengemukakan, dengan beberapa bukti pendukung dari observasinya sendiri di Brasil, bahwa pohon ara dapat mendeteksi bilamana sebiji buah ara telah dieksplorasi secara berlebihan oleh tawon. Buah ara yang semua bunganya telah diteluri dianggap tak berguna oleh pohnnya. Tawon sudah terlalu egois. Mereka telah membunuh angsa yang menghasilkan telur emas. Atau, hemat Hamilton, angsanya bunuh diri. Pohon ara menjatuhkan buah yang telah dieksplorasi habis-habisan itu ke tanah sehingga telur-telur tawon di dalamnya ikut mati. Mungkin kita tergoda untuk menafsirkannya sebagai aksi balas dendam, dan ada beberapa model matematis yang ilmiah dan kredibel, yang dapat membebaskan kita dari kecurigaan interpretasi antropomorfik. Namun, di kasus ini, yang diperbuat pohon itu lebih mengarah ke tindakan mengurangi kerugian daripada menuntut balas. Butuh sumber daya untuk mematangkan buah ara, dan sumber daya itu akan sia-sia bila dipakai untuk mematangkan buah ara yang telah dirusak oleh tawon-tawon rakus. Sambil lalu, bahasa permainan siasat semacam ini, yang tak ragu-ragu menggunakan kata-kata seperti ‘balas dendam’ dan ‘menertibkan’, akan muncul berulang kali di bab ini.

Penggunaannya sah jika ditangani dengan benar, yang kerap berarti menggunakan dasar teori permainan (*game theory*) matematis.

Kembali ke siklus hidup tawon ara tipikal, tawon betina kita baru saja menggelang-geliut seperti Alice, masuk melalui pintu sempit, takkan pernah melihat dunia luar lagi, dan tengah bersiap membongkar muatan serbuk sari yang telah dikumpulkannya dari buah ara tempatnya lahir. Perilaku penyerbukan tawon ara betina punya seluk-beluk yang membuatnya tampak disengaja. Berbeda dari kebanyakan serangga penyerbuk yang membiarkan serbuk sari lepas tak sengaja dari tubuhnya, tawon betina dari sedikitnya beberapa spesies tawon ara membongkar barang bawaannya dengan upaya dan perhatian yang sama dengan yang ia kerahkan saat memuatnya. Ia kembali menggunakan sikat di kaki-kaki depannya, dengan sistematis menyerok keluar serbuk sari dari kantong-kantong khusus ke sikat-sikat itu, dan mengguncang-guncangkannya di atas permukaan reseptif bunga betina.

Dengan menumpangkan telur-telurnya di haribaan bunga-bunga betina, si tawon betina memungkasi cerita kita tentang siklus hidup ini. Hidupnya sendiri pun berakhir pula. Ia merangkak ke celah lembap di kebun selingkung itu dan mati. Ia mati, tetapi ia meninggalkan bermega-megabita informasi genetik yang terekam tepat di telur-telurnya, dan daurnya pun berlanjut.

Meski ada perbedaan pada beberapa detailnya, yang sebentar lagi akan saya uraikan, cerita yang telah saya tuturkan ini serupa bagi sebagian besar jenis ara. *Ficus*, genus tumbuhan ara, adalah salah satu marga terbesar di kerajaan makhluk



Gambar 10.3 (A) ara pencekik; (b) pohon baobab yang dibelit ara pencekik.

hidup. Genus ini juga sangat beragam. Selain dua spesies ara yang buahnya bisa dimakan (oleh kita), genus ini juga meliputi pohon karet; pohon beringin; pohon Bodhi (*Ficus religiosa*), yang menaungi sang Buddha; aneka tumbuhan semak dan perambat; serta pelbagai tumbuhan ara 'pencekik' dari kawasan tropis. Cerita ara pencekik ini patut dikisahkan. Lantai hutan adalah tempat yang gelap dan haus akan tenaga matahari. Menggapai langit terbuka dan matahari adalah tujuan setiap pohon di hutan. Batang pohon adalah gondola



daun, kemudi untuk mengangkat panel-panel surya – dedaunan – ke atas naungan pohon-pohon pesaing. Sebagian pohon ditakdirkan mati saat masih berupa pancang. Hanya ketika sebatang pohon dewasa di area sekitar ambruk, ditumbangkan angin ribut dan usia, sajalah terbuka peluang bagi setangkai pancang belia. Pada setiap kalinya di dalam hutan, peristiwa mujur ini mungkin terjadi sekali saja dalam seratus tahun. Bila terjadi, dimulailah perlombaan mengejar matahari. Semua pancang di daerah situ, dari aneka macam spesies, beradu cepat menjadi pihak yang mengisi kekosongan di tajuk hutan.

Tetapi tumbuhan ara pencekik telah menemukan cara kejinya sendiri dan cerita mereka membuat kisah ular laknat dari Kitab Kejadian jadi tampak hina (Gambar 10.3). Alih-alih menunggu ada pohon yang mati, mereka justru mendalangi peristiwa itu. Pohon ara pencekik mengawali hidupnya sebagai tumbuhan pemanjat. Ia membelitkan diri ke batang pohon dari spesies lain dan tumbuh seperti bunga rambat *clematis* atau mawar *rambling rose*. Namun, berbeda dari bunga *clematis*, sulur-sulur ara pencekik tumbuh makin begap dan tegap. Tanpa ampun, ia mengencangkan cengkeramannya pada pohon inang yang malang itu, menghalang-halangi pertumbuhannya, dan akhirnya sampai di titik yang, dalam dunia botani, sepadan dengan mencekiknya hingga mati. Pohon ara tersebut kini tumbuh jangkung dan dengan mudahnya memenangkan perlombaan menuju lubang cahaya yang ditinggalkan pohon yang lumpuh tadi. Pohon beringin adalah sejenis ara pencekik dengan fitur tambahan yang menakjubkan. Setelah mencekik mati inang aslinya, ia mengutus akar-akar gantung yang, bila menyentuh tanah, menjadi akar-akar serap yang baik tetapi, di atas tanah, berfungsi sebagai batang tambahan. Sebatang pohon beringin pun menjadi hutan kecil dengan diameter hingga 1.000 kaki dan bisa menaungi pasar *indoor* ukuran sedang di India.

Sejauh ini, saya menuturkan cerita-cerita ara untuk menunjukkan bahwa fakta-fakta mengenai ara setidaknya sama memikatnya dengan yang mampu digali dari mitologi atau karya sastra oleh si penceramah di Bab I. Selain itu, tujuannya adalah juga menunjukkan cara ilmiah untuk menjawab pertanyaan, yang semoga dapat menjadi contoh berfaedah bagi diletan sastra itu. Fakta-fakta yang telah

dengan ringkas saya jabarkan adalah hasil dari upaya teliti dan cerdik selama bertahun-tahun: karya yang pantas menyandang gelar ‘ilmiah’, bukan karena dibuat dengan perkakas canggih dan mahal, melainkan karena didisiplinkan dengan sikap cita tertentu. Sebagian besar dari upaya mengurai cerita penyebukan tawon memang diisi dengan kegiatan mengiris buah ara dan melihat isi dalamnya. Tetapi ‘melihat’ kesannya terlalu santai. Bukan cuma melongo pasif, melainkan berupa sesi pencatatan yang direncanakan dengan teliti, menghasilkan data yang akan diasup ke dalam kalkulasi. Jangan cuma memetik dan mengiris buah ara. Secara sistematis, ambil sampelnya dari sejumlah besar pohon, dengan ketinggian tertentu, dan pada musim-musim tertentu di tahun itu. Jangan cuma menatap tawon-tawon yang menggelang-geliut di dalamnya: Temu kenali, foto, gambar dengan akurat, hitung, dan ukur. Golongkan menurut spesies, jenis kelamin, usia, dan lokasinya di dalam buah ara. Kirim spesimen ke museum-museum untuk identifikasi melalui komparasi mendetail dengan standar-standar yang diakui secara internasional. Tapi jangan ukur dan hitung tanpa jelas juntrungannya. Ukur dan hitung untuk menguji pelbagai hipotesis yang dinyatakan. Dan bilamana hitungan serta ukuran tersebut sesuai dengan ekspektasi hipotesisnya, waspadai – secara terperinci dan terhitung – kemungkinan hasil-hasil itu diperoleh karena kebetulan, maka tak berarti apa-apa.

Baik, begitu. Sekarang, kita kembali ke tawon-tawon ara. Saya tadi berkata bahwa, pada banyak spesies tawon ara, para pejantan di sebiji buah ara bekerja sama menggali lubang untuk jalan keluar para betina. Mengapa? Mengapa seekor

pejantan, mengingat kawan-kawannya akan menggali lubang, tidak memilih untuk duduk santai berpangku tangan? Di sini, di dunia renik, terletak sebuah teka-teki yang terus menggelitik rasa penasaran ahli-ahli biologi: teka-teki altruisme. Masalah lainnya timbul ketika si ahli berusaha menerangkan perkaranya kepada orang awam. Pikiran awam jarang memandangnya sebagai teka-teki sama sekali. Maka, ahli biologi, sebelum bisa menggadang-gadangkan kecerdikan solusinya, harus mengawali dengan meyakinkan pendengar bahwa teka-teki yang membutuhkan solusi istimewa itu memang ada. Pada kasus khusus tawon-tawon ara jantan, berikut ini alasan ia merupakan teka-teki. Tawon jantan yang berpangku tangan dan membiarkan kawan-kawannya menggali lubang mestilah bisa menyimpan tenaga untuk mengawini tawon-tawon betina, aman karena tahu bahwa ia tak harus capek-capek ikut membuat lubang. Gen-gen untuk sifat ogah turun tangan ini, *ceteris paribus*, akan menyebar, mengorbankan gen-gen pesaing untuk sifat gotong-royong membuat lubang. Kalimat gen-gen untuk X akan menyebar dengan mengorbankan Y itu setara dengan kalimat Y akan menghilang, digantikan oleh X. Tentu saja, konsekuensi dari hal ini adalah tak ada lubang yang digali dan semua tawon jantan akan kena getahnya. Tapi ini saja bukan alasan atas perilaku kerja sama tawon jantan untuk menggali lubang. Ia boleh menjadi alasan jika hewan-hewan ini memiliki kemampuan prakira ala manusia tetapi, dengan asumsi bahwa tidak seperti itu kenyataannya, seleksi alam memang akan selalu meloloskan manfaat jangka pendek. Karena nyatanya semua tawon-tawon jantan yang lain tetap menggali, manfaat jangka pendek akan dinikmati oleh individu tawon jantan yang tidak ikut kerja bakti dan lebih memilih untuk menyimpan

tenaganya. Pada argumen ini, kegiatan gali-menggali semestinya hilang dari populasi, disingkirkan oleh seleksi alam. Fakta bahwa hal itu tidak terjadilah yang menimbulkan teka-teki bagi kita. Untungnya, teka-teki ini adalah teka-teki yang, pada prinsipnya, kita ketahui pemecahannya.

Sebagian dari solusinya boleh jadi terletak pada hubungan kekerabatan: pada kemungkinan besar bahwa semua tawon jantan di dalam sebiji buah ara bersaudara. Sanak-saudara cenderung memiliki salinan-salinan gen yang sama. Seekor tawon yang membantu penggalian lubang akan melepaskan tidak hanya tawon-tawon betina yang telah dikawininya, tetapi juga yang telah dikawini saudara-saudaranya. Salinan-salinan gen yang melestarikan perilaku gotong-royong akan menyeruak keluar melalui lubang itu, menumpangi tubuh-tubuh semua tawon betina ini. Itulah alasan gen-gen tersebut bertahan dan penjelasan yang baik untuk bertahannya perilaku tersebut di antara tawon-tawon jantan.

Tetapi kekerabatan mungkin bukan jawaban utuhnya. Saya tidak akan menjabarkannya secara terperinci, tetapi ada satu unsur permainan yang tidak berkaitan dengan persaudaraan dan berlaku untuk kerja sama di antara tawon dan buah ara. Kisah tawon dan buah ara sarat akan bau tawar-menawar sengit, akan kepercayaan dan pengkhianatan, akan godaan pelanggaran yang ditertibkan dengan aksi pembalasan tanpa kesadaran. Kita sudah mencicipi rasanya dalam teori Hamilton tentang buah ara yang dieksplorasi keterlaluan, lantas dicopot jatuh ke tanah. Tak bosan-bosannya, saya harus mengingatkan bahwa, sungguh, hal itu terjadi tanpa kesadaran. Sekilas tampak sudah jelas untuk sisi cerita di pihak buah ara, karena tak ada orang waras yang berpikir tumbuhan

itu berkesadaran. Tawon boleh jadi berkesadaran, boleh jadi tidak. Tetapi untuk tujuan bab ini, kita perlakukan siasat tawon sama dengan siasat pohon ara yang karuan tidak berkesadaran.

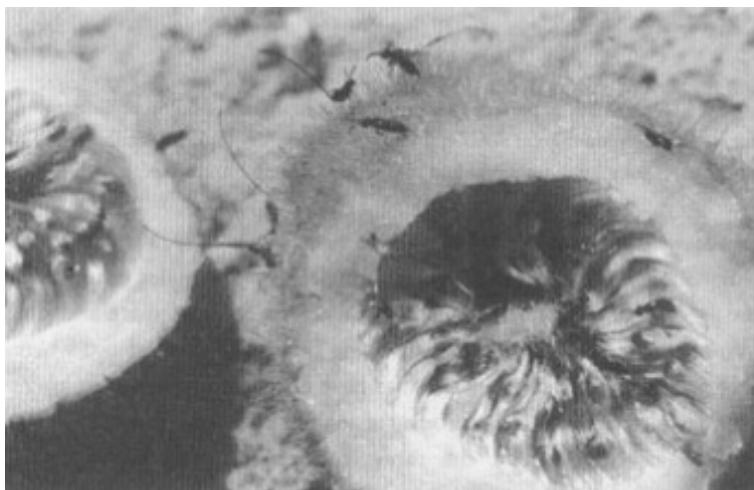
Kebun selingkung ini adalah surga yang dibudidayakan demi kepentingan serangga-serangga kecil dan, tidak heran, ia menjadi rumah bagi aneka ragam fauna renik yang menggeliat-geliat, tidak hanya tawon yang jasa penyerbukannya membuatnya ada. Larva-larva kumbang, ngengat, dan lalat berlimpah jumlahnya, begitu pula dengan tungau dan cacing kecil. Ada pemangsa yang mengintai tepat di gerbang kebun itu, menanti kesempatan meraup kekayaan fauna di dalamnya (Gambar 10.4).

Para penyerbuk sejati bukanlah satu-satunya jenis tawon mini



Gambar 10.4 Macam-macam petaka menyambut tawon ara. Seekor semut mengintai di luar gerbang kebun, menunggu kemunculan tawon-tawon.

umum ‘tawon ara’. Ada juga tukang tebeng, kerabat jauh dari para penyerbuk bonafide dan menjadi parasit bagi mereka. Tawon-tawon parasit ini tidak masuk melalui lubang di ubun-ubun buah ara, melainkan biasanya disuntikkan melalui dinding buahnya saat masih berupa telur, dengan hipodermik yang luar biasa panjang dan tipis, ovipositor khusus induk mereka (Gambar 10.5). Jauh di dalam buah ara, ujung hipodermik tersebut mencari bunga-bunga kecil tempat telur-telur tawon ara penyerbuk telah dibaringkan. Tawon parasit betina tampak dan berfungsi layaknya fasilitas pengeboran, dan lubang yang diborinya melalui dinding buah ara itu, pada skala ukurannya sendiri, setara dengan sumur sedalam 100 kaki. Para pejantannya kerap tak bersayap, layaknya tawon-tawon ara jantan yang sejati (Gambar 10.6). Untuk memugas cerita ini, ada parasit lapis kedua, tawon-tawon yang mengin-



Gambar 10.5 Buah ara yang dibelah, dengan tawon-tawon parasit betina yang mengacungkan ‘pengebor’ mereka tinggi-tinggi.



Gambar 10.6 Para penebeng: tawon-tawon parasit, *Apocrypta perplexa*, yang tidak melakukan kerja penyerbukan tetapi ikut menikmati manfaat dari buah ara. (a) Betina; (b) tampilan miniatur tawon betina dalam sikap 'mengebor'; (c) jantan, tanpa sayap dan tampak tak mirip tawon sama sekali.

tai di samping tawon 'juru bor', menunggu pekerjaannya selesai. Tak lama setelah tawon betina itu menarik hipodermiknya, si hiperparasit ini menyelipkan ovipositornya

sendiri yang lebih sederhana ke dalam lubang bor dan menyisipkan telurnya.

Seperti tawon-tawon penyerbuk itu sendiri, para penebeng dari berbagai spesies parasit ini saling melancarkan permainan siasatnya. Hal ini diselidiki juga oleh W. D. Hamilton, dalam penelitiannya di Brasil bersama istrinya Christine. Lain dari tipe penyerbuk, tawon-tawon spesies penebeng kerap memiliki pejantan sekaligus betina yang bersayap. Ada spesies yang semua pejantannya bersayap, ada yang semua pejantannya tak bersayap, dan ada yang pejantannya campur antara bersayap dan tanpa sayap. Tawon jantan tanpa sayap, seperti pejantan dari spesies penyerbuk, tidak pernah meninggalkan buah ara tempatnya lahir, bergulat, kawin, dan mati. Tawon jantan bersayap, seperti tawon betina, terbang meninggalkan buah ara tempatnya lahir dan kawin dengan semua betina yang belum kawin. Jadi, ada dua cara untuk menjadi seekor tawon jantan dan, pada beberapa spesies, keduanya diterapkan. Menariknya, pada spesies-spesies terlangka, tawon jantan lebih cenderung bersayap; sementara itu, spesies-spesies paling jamak lebih cenderung tanpa sayap. Gejala ini wajar karena tawon jantan dari spesies kebanyakan kemungkinan menemukan tawon betina dari spesiesnya sendiri di buah ara yang sama. Sebaliknya, pejantan dari spesies langka kemungkinan merupakan satu-satunya anggota dari spesiesnya di buah ara yang ditempatinya. Jalan terbaik baginya untuk menemukan kawan kawin adalah dengan terbang merantau, mencari di luar sana. Bahkan, duo Hamilton menemukan bahwa tawon-tawon jantan yang bersayap justru menolak kawin *hingga* terbang keluar dari buah ara tempat mereka lahir.

Dari sudut pandang strategis, secara khusus kita menaruh perhatian pada spesies-spesies yang memiliki dua jenis pejantan. Seolah ada jenis kelamin ketiga. Para pejantan bersayap jauh lebih *menyerupai* tawon-tawon betina daripada tawon-tawon jantan tanpa sayap. Tawon betina dan tawon jantan bersayap sudah hampir persis tawon – ukurannya saja yang sangat kecil. Namun, tawon jantan tanpa sayap, kalau dilihat, sedikit pun tak mirip tawon. Banyak di antaranya memiliki capit-capit buas, yang membuat mereka agak mirip cocopet mini yang berjalan mundur. Mereka kelihatannya menggunakan capit-capit ini hanya untuk bersabung – memancung dan merajang hingga mati para pejantan lain yang dijumpai dalam kembara di kebun gelap, lebap, dan kedap yang menjadi satu-satunya dunia mereka. Profesor Hamilton menggambarkannya dengan mengesankan.

Pertarungan mereka tampak ganas dan berawas-awas – istilahnya cara pengecut tetapi, jika direnungkan, istilah itu tampak tak adil mengingat latar yang, pada konteks manusia, hanya dapat disamakan dengan sebuah ruangan redup, penuh sesak dengan orang yang di antaranya, atau mengintai di ceruk dan rongga di mana-mana, ada kira-kira selusin pembunuh gila bersenjatakan sangkur. Satu gigitan bisa langsung mematikan. Seekor pejantan *Idarnes* sanggup menggigit tawon jantan lain jadi dua, tapi biasanya gigitan mematikan itu berupa tikaman kecil pada tubuh. Cedera kecil sering dan cepat sekali mengakibatkan kelumpuhan – tanda bahwa bisa digunakan... Jika tak satu pihak pun terluka parah dalam baku hantam pertama atau kedua, salah satunya, mungkin sudah buntung satu kaki atau mulai merasa ada gelagat kalah, mundur dan mencoba bersembunyi... Dari posisi terselubung ini, ia bisa lebih aman menggigit kaki-kaki si jawara atau pejantan lain yang sedang lewat... Dalam satu kali masa berbuaah pada sebatang pohon

*Ficus* yang besar, kemungkinan jatuh beberapa juta korban jiwa akibat pertempuran.

Fenomena spesies dengan dua jenis pejantan bukan tak dikenal di kelompok hewan lain, tetapi kasusnya paling kentara pada kelompok tawon ara penebeng ini. Ada rusa-rusa merah jantan yang disebut rusa *hummel* (tanpa tanduk) yang, seperti namanya, tidak bertanduk, tetapi tampak cukup mampu bersaing dengan para rival bertanduknya dalam hal reproduksi. Para teoretikus telah menemukan dua kemungkinan penyebab fenomena koeksistensi dua jenis pejantan ini. Teori yang pertama adalah teori ‘adaptasi dengan situasi buruk’. Teori ini boleh jadi benar pada salah satu spesies lebah soliter, yakni *Centris pallida*. Spesies ini memiliki dua jenis pejantan, yang disebut ‘pelanglang’ (*patroller*) dan ‘pengambang’ (*hoverer*). Lebah pelanglang besar-besar. Mereka giat mencari betina yang belum menetas dan keluar dari tempat pengeraman bawah tanahnya, menggali dan mengawini betina-betina ini di bawah tanah. Lebah pengambang kecil-kecil. Mereka tidak menggali, tetapi mengambang di udara, menanti munculnya segerintir lebah betina yang terbang keluar karena luput dari pencarian para pelanglang di bawah sana. Bukti menunjukkan bahwa lebah pelanglang lebih efektif dari lebah pengambang. Namun, dengan tubuh dan peluang yang lebih kecil untuk sukses sebagai pelanglang, lebah pengambang lebih memilih melayang-layang di udara. Tentu saja, pilihan ini bersifat genetik, bukan sadar.

Teori kedua tentang koeksistensi dua jenis pejantan di satu spesies adalah teori keseimbangan stabil. Agaknya, teori ini benar untuk kasus tawon ara penebeng. Inti teorinya adalah

bahwa kedua jenis pejantan bisa sama-sama berhasil bila hidup dalam rasio jumlah yang khusus dan seimbang di populasinya. Berikut ini hal yang menjaga keseimbangan proporsi tersebut. Bila seekor pejantan adalah anggota tipe yang lebih langka, ia berhasil terlebih karena kelangkaannya. Oleh karena itu, akan lahir lebih banyak individu dari jenisnya dan, konsekuensinya, kelompok ini pun tak lagi langka. Jika mereka berhasil dengan begitu baiknya sehingga menjadi umum, jenis yang lain kini diuntungkan karena relatif langka dan, maka dari itu, mereka pun menjadi lebih umum lagi. Jadi, proporsinya diatur layaknya sebuah termostat. Penuturan saya seolah menyiratkan timbulnya gonta-ganti proporsi, tetapi tidak juga – tak lebih dari gonta-ganti suhu pada ruangan yang dikontrol dengan termostat. Proporsi kesetimbangan stabilnya pun tidak harus 50-50. Apa pun proporsi kesetimbangannya, seleksi alam akan terus mendorong balik populasi itu ke rasio tersebut. Proporsi kesetimbangannya adalah proporsi yang membuat kedua tipe pejantan dapat bereproduksi dengan sama baiknya.

Bagaimana kiranya hal yang begini dapat terjadi pada kasus tawon ara penebeng? Fakta pertamanya adalah bahwa tawon betina dari spesies-spesies parasit ini cenderung bertelur hanya satu atau dua butir saja di satu buah ara, lalu pindah ke buah lainnya (ingat, mereka mencolokkan ovipositornya dari luar buah ara). Ada alasan-alasan kuat untuk hal ini. Jika seekor tawon betina menaruh semua telurnya di satu buah ara, anak-anak perempuan dan laki-lakinya (yang tak bersayap) besar kemungkinan akan saling mengawini, dan inses itu buruk, untuk alasan yang serupa dengan alasan bunga ogah menyerbuki dirinya sendiri. Yang jelas, faktanya,



Gambar 10.7 Kebun Selingkung.

tawon-tawon betina menyebar keturunan mereka sedikit-sedikit ke buah ara yang berbeda-beda. Konsekuensinya, akan ada – secara taksengaja – sejumlah buah ara yang tidak mengandung telur spesies tersebut sama sekali. Dan akan ada sejumlah buah ara yang tidak mengandung telur-telur tawon jantan dan sebagian yang lain tidak mengandung telur-telur tawon betina.

Sekarang, bayangkan kemungkinan yang boleh jadi dihadapi seekor tawon jantan tanpa sayap. Jika menetas di buah ara tanpa betina, ia tidak dapat berbuat apa-apa. Dari segi genetik, itulah akhir hayatnya. Namun, kalaupun ada betina di buah aranya, ia berkesempatan kawin dengan mereka, meski harus bersaing dengan para pejantan lain dari jenisnya – dan

tak heran bila tawon-tawon jantan mungil ini tergolong petarung bersenjata terlengkap dan paling tak kenal ampun di kerajaan hewan. Segelintir tawon betina meninggalkan buah ara mereka tanpa sempat kawin, sekalipun ada pejantan tak bersayap di dalamnya. Beberapa buah ara kebetulan punya telur-telur betina tetapi tanpa telur-telur jantan. Tawon-tawon betina ini akan meninggalkan buah ara itu tanpa dikawini, dan pejantan yang bisa kawin dengan mereka hanyalah para pejantan bersayap di luar.

Maka, para pejantan bersayap dapat berkembang biak hanya jika ada beberapa buah ara yang kebetulan memiliki tawon betina tetapi tanpa pejantan tak bersayap. Seberapa besar kemungkinannya? Tergantung pada rasio antara kepadatan populasi tawonnya dan jumlah buah ara yang ada. Dan tergantung pula pada jumlah tawon jantan bersayap. Jika secara umum populasi tawon jauh lebih kecil dari jumlah buah ara, jumlah telur tawon akan sedikit dan penempatannya pun jarang-jarang. Maka boleh jadi, buah ara yang hanya memuat telur betina saja paling tidak ada beberapa jumlahnya. Dalam kondisi seperti ini, perkembangbiakan tawon jantan bersayap akan relatif efektif. Sekarang lihat apa yang terjadi jika populasi tawon terbilang besar. Sebagian besar buah ara akan memuat beberapa tawon, dari kedua jenis kelamin. Sebagian besar tawon betina akan dikawini oleh para pejantan tanpa sayap sebelum meninggalkan buah aranya, sehingga kelompok pejantan bersayap sulit berkembang biak.

Hamilton telah mengerjakan kalkulasinya dengan lebih akurat. Ia menyimpulkan bahwa, jika jumlah rerata telur jantan per buah ara lebih besar dari sekitar tiga butir, tawon-tawon jantan bersayap hampir pasti takkan bereproduksi. Pada

semua tingkat kepadatan yang lebih tinggi dari batas ini, seleksi alam akan memilih yang tak bersayap di antara semua pejantan. Jika jumlah rerata telur jantan per buah ara adalah satu atau di bawahnya, tawon jantan tanpa sayap akan kalah saing karena mereka hampir pasti tidak berada di buah ara yang sama dengan tawon lain, apalagi tawon betina. Dalam kondisi seperti ini, seleksi alam akan memilih yang bersayap di antara semua pejantan. Pada tingkat-tingkat kepadatan semenjana, teori keseimbangan stabil akan berlaku dan seleksi alam memilih campuran tawon jantan bersayap dan tak bersayap di populasinya.

Begini roda teori keseimbangan stabil berputar, seleksi alam memilih tipe pejantan mana pun yang minoritas atau, lebih tepatnya, tipe pejantan mana pun yang berada pada level di bawah frekuensi kritis, berapa pun frekuensi kritis tersebut. Ringkasnya, kita bisa mengatakan bahwa seleksi alam memilih frekuensi kritisnya. Frekuensi kritis itu sendiri bervariasi dari satu spesies ke spesies yang lain, tergantung kepadatan absolut populasi tawon dibandingkan jumlah buah aranya. Boleh dikata, aneka spesies tawon, dengan kepadatan populasi tawon/buah aranya masing-masing, adalah aneka ruangan yang suhunya dikendalikan termostat. Tiap ruangan memiliki termostatnya sendiri, yang diatur ke suhunya sendiri pula. Misalnya, pada spesies dengan jumlah rerata telur jantan per buah ara tiga, seleksi alam memilih campuran tawon jantan di populasi itu, yang sekitar 90 persen di antaranya tanpa sayap. Pada spesies dengan jumlah rerata telur jantan per buah ara dua, seleksi alam memilih campuran tawon jantan yang sekitar 80 persen di antaranya tanpa sayap. Ingat, pada kondisi yang tengah kita bahas ini, dua jantan per buah

ara adalah angka *rata-rata*. Tidak berarti bahwa, pada tiap buah ara, pasti ada dua tawon jantan. Di dalam rasio rerata 2:1 ini, terdapat buah ara tanpa pejantan, buah ara dengan satu pejantan, dengan dua pejantan, dan dengan lebih dari dua pejantan. Dua puluh persen pejantan bersayap sisanya mengusahakan kelangsungan genetiknya bukan dari buah ara dengan dua pejantan (yang para betinanya kemungkinan besar sudah dikawini sebelum melanglang pergi), melainkan dari ara tanpa pejantan sama sekali.

Apa bukti nyata bahwa teori keseimbangan stabillah yang berlaku pada tawon-tawon ini, bukan teori adaptasi dengan situasi buruk? Perbedaan penting di antara dua teori tersebut adalah bahwa, di teori pertama, dua jenis tawon jantan mestinya sama-sama berhasil berkembang biak, sementara di teori kedua tidak demikian. Pasangan Hamilton menemukan bukti yang menunjukkan bahwa kedua jenis pejantan memang sama-sama berhasil kawin dengan tawon-tawon betina. Sepuluh spesies mereka amati. Dan mereka mendapati bahwa, di semua spesies tersebut, proporsi antara tawon jantan bersayap dan tanpa sayap lebih kurang setara dengan proporsi tawon betina yang meninggalkan buah ara kelahirannya tanpa sempat dikawini. Oleh karena itu, spesies yang 80 persen betinanya keluar dari buah ara tempatnya menetas tanpa sempat kawin, adalah juga spesies yang 80 persen pejantannya bersayap. Spesies yang 70 persen betinanya kawin sebelum keluar dari buah ara tempatnya lahir adalah juga spesies yang 70 persen pejantannya tidak bersayap. Sungguh seolah proporsi kedua jenis tawon jantan ini sama persis dengan yang semestinya jika keduanya ingin sama-sama bisa mengawini tawon betina. Bukti ini

mendukung teori keseimbangan stabil dan membantah teori adaptasi dengan situasi buruk. Maaf kalau berbelit-belit, tetapi hal itu sepadan dengan rumitnya dunia tumbuhan ara.

Kita tinggalkan tawon-tawon penebeng, kita kembali ke tawon-tawon ara sejati, para penyebuk spesialis buah ara. Kalau kisah tentang tawon penebeng sudah terasa pelik, bersiaplah untuk menghadapi cerita pemungkas saya. Saya pribadi merasa cukup lihai dalam menjelaskan perkara-perkara sulit nan rumit, tetapi yang berikut ini mungkin akan menundukkan kelihaiannya saya. Saya akan berusaha sekuat tenaga. Tetapi kalau gagal, salahkan ara dan tawon-tawon mitranya. Atau jangan salahkan mereka maupun saya, tetapi kagumilah evolusi atas pesona subtil dari tarian gaib di sepanjang garis waktu evolusi. Butuh ikhtiar kuat untuk menyusuri halaman-halaman terakhir buku ini, tetapi mudah-mudahan hasilnya sepadan.

Pohon-pohon ara yang menjadi latar cerita berikut ini adalah pohon-pohon ‘dioesis’. Artinya, alih-alih satu jenis ara dengan bunga jantan dan bunga betina seperti pohon-pohon ‘monoesis’ yang kita bahas sejauh ini, ada pohon jantan ada pula pohon betina. Pohon betina menghasilkan buah ara yang mengandung bunga betina saja. Pohon jantan menghasilkan buah ara yang mengandung bunga jantan, tapi tidak berhenti di situ. Buah-buah ara yang disebut jantan ini juga mengandung bunga-bunga betina semu, yang sangat penting bagi tawon-tawonnya. Berbeda dari bunga-bunga betina sejati pada buah-buah ara betina, bunga-bunga betina semu pada buah-buah ara jantan mandul, sekalipun diserbuki. Yang mereka bisa adalah memberi makan tawon-tawon bayi, dan – di sinilah berpangkal cerita panjangnya – mereka harus

diserbuki dahulu, baru mau melakukan itu. Bunga-bunga betina subur di buah-buah ara betina adalah kuburan genetik bagi tawon, kendati vital perannya bagi reproduksi ara. Tawon-tawon betina masuk dan menyerbuki mereka, tetapi telur-telurnya takkan berkembang di sana.

Di sini terletak unsur-unsur sebuah permainan strategi yang kaya, yang bisa kita deskripsikan dalam kerangka ‘keinginan’ (dalam pengertian khusus Darwinian) dari para pemainnya. Buah ara jantan dan betina sama-sama ‘ingin’ dimasuki tawon, tetapi tawon ingin masuk hanya ke buah-buah ara jantan – semata-mata karena bunga-bunga betina semu di dalamnya. Pohon jantan ingin agar telur dibaringkan di bunga-bunga betina semu sehingga tawon-tawon betina anakan yang menetas di sana akan memuat serbuk sari buah ara jantan ke alat angkut mereka dan terbang membawanya. Pohon ara itu tidak punya kepentingan langsung atas menetasnya tawon jantan di buah-buahnya karena tawon jantan tidak mengangkut serbuk sari. Hal ini tampak mengagetkan karena, lagi pula, tawon jantan berperan penting dalam kelangsungan ras tawon-tawon ara. Kita manusia, yang gemar memperkirakan dan memikirkan konsekuensi lebih besar dari perbuatan kita, kesulitan untuk membersihkan pikiran dari wacana bahwa seleksi alam pun melakukan hal serupa. Pokok ini sudah saya terangkan di contoh yang lain. Jika seleksi alam mampu memandang jauh ke depan, hewan dan tumbuhan akan mengambil langkah-langkah pelestarian rasnya – rasnya sendiri dan ras-ras yang mereka butuhkan, seperti mangsa dan penyerbuknya. Tetapi alam, beda dari manusia yang berotak, tak punya prakiraan. ‘Gen-gen egois’ dan manfaat jangka pendek selalu dipilih bila semua yang lain bergelut memenuhi



kebutuhan jangka panjang rasnya. Kalau lah sebatang pohon ara bisa lolos meski hanya memelihara tawon betina saja, ia akan melakukannya dan mengandalkan pohon ara lain untuk urusan produksi para pejantan yang dibutuhkan dalam pelestarian ras tawon. Intinya, selama pohon-pohon lain menghasilkan tawon jantan, sebatang pohon egois dan nakal yang menemukan cara menambah produksi tawon betinanya – maka dari itu, menambah jumlah serbuk sari yang bisa diekspornya – akan diuntungkan. Seiring generasi berganti generasi, makin banyak pohon yang menjadi egois dan mengandalkan pohon-pohon lain, yang jumlahnya kian sedikit, untuk memproduksi tawon jantan yang diperlukan. Kelak, pohon terakhir yang teguh mengasuh tawon jantan akan mati karena kalah subur dari para rival yang hanya menghasilkan tawon betina.

Untunglah, tampaknya pohon-pohon ara tidak pegang kendali atas rasio jenis kelamin tawon yang dibesarkan di buah-buah mereka. Kalau iya, kemungkinan buah-buah ara jantan akan hilang, dan ras tawon ara akan binasa. Bawa ras pohon-pohon ara pun ikut mati karenanya adalah kenyataan yang nahas sekali. Seleksi alam tidak dapat menjenguk hingga sejauh itu. Alasan pohon-pohon ara tidak punya kendali atas rasio jenis kelamin besar kemungkinan adalah karena tawon, yang juga berkepentingan dalam mengendalikan rasio jenis kelamin mereka, punya kekuatan tandingannya.

Pohon ara betina juga ingin (lagi-lagi, dalam pengertian khusus Darwinian) buah-buahnya dimasuki para tawon betina; kalau tidak, bunga-bunga betina mereka tidak akan diserbuki. Tawon betina ingin memasuki buah-buah ara jantan, karena hanya di situlah ia akan mendapatkan bunga-bunga betina semu,

tempat larvanya bisa berkembang. Ia ingin menjauhi buah-buah ara betina karena begitu ia masuk ke salah satunya, secara genetik ia sudah mati. Ia tidak akan memiliki keturunan. Dalam ungkapan lebih ketatnya, gen-gen yang membuat tawon memasuki buah ara betina tidak akan diteruskan ke generasi-generasi selanjutnya. Jika yang diseleksi oleh alam hanyalah tawon saja, dunia ini akan penuh dengan tawon yang menghindari buah ara betina dan memilih buah ara jantan, dengan lampin telur di bunga betina semunya yang aman sentosa.

Sekali lagi, kita manusia ingin menyela dan berkata: ‘Tapi tentu tawon-tawon ini mestinya ingin sebagian dari mereka masuk ke buah-buah ara betina karena, meski itu seperti menggali kuburan genetiknya sendiri, buah ara betina amat penting bagi kelangsungan ras pohon ara. Kalau ras pohon ara punah, ras tawon ara pun lekas ikut punah’. Ini sama persis dengan argumen kita yang sebelumnya. Asalkan ada tawon ara yang dengan bodohnya, atau dengan ikhlasnya, memasuki buah ara betina, seleksi alam akan memilih individu tawon egois yang menemukan cara menjauhi buah ara betina dan hanya memasuki buah ara jantan. Keegoisan di antara tawon-tawon memang lebih dipilih daripada kecenderungan jiwa sosial untuk mengupayakan kelangsungan ras. Lalu, mengapa pohon ara dan tawon ara tidak punah? Bukan karena altruisme atau tinjauan masa depan, melainkan karena keegoisan di pihak yang satu pada relasi ini terhalang keegoisan tandingan di pihak yang lain. Yang mencegah tawon betina berbuat egois dan menghindari buah ara betina adalah tindakan langsung yang diambil pohon-pohon ara sendiri untuk menjegal bakal tawon-tawon egois. Seleksi alam telah meloloskan taktik-

taktik tipu daya oleh buah ara betina, yang menjadikannya begitu mirip dengan buah ara jantan sehingga tawon tidak dapat membedakan keduanya.

Jadi, permainan antara tawon dan ara kita menyuguhkan kondisi berimbang yang memikat. Individu-individu di kedua belah pihak berpeluang untuk egois. Jika yang mana pun dari kedua dorongan egois ini berhasil, tawon dan pohon ara boleh jadi sama-sama punah. Pencegahnya bukanlah kekang altruistik, bukan pula prakiraan berkesadaran ekologis. Pencegahnya adalah aksi bayangkara langsung oleh individu-individu pemain di kedua pihak, yang bertindak atas kepentingan egois mereka sendiri. Pohon-pohon ara, kalau bisa, akan melenyapkan tawon-tawon jantan – dan, karenanya, tak sengaja memastikan kepunahan tawon dan kepunahannya sendiri. Mereka tidak melakukan itu karena dihalangi oleh tawon, yang punya kepentingan memelihara tawon jantan dan betina. Tawon-tawon ara, kalau bisa, akan menjauhi buah-buah ara betina – dan, karenanya, tak sengaja memastikan kepunahan pohon dan kepunahannya sendiri. Mereka tidak melakukan itu karena dihalangi oleh pohon, yang membuat buah ara jantan dan betina begitu sulit dibedakan.

Ringkasnya sejauh ini, boleh dianggap, pohon ara jantan dan betina sama-sama berusaha sekuat tenaga untuk memancing tawon ke buah ara jenisnya sendiri. Dan boleh dianggap, tawon berjuang untuk bisa membedakan mana buah ara jantan mana betina, untuk memasuki yang pertama dan menjauhi yang kedua. Ingat, ‘berjuang’ berarti bahwa, sepanjang waktu evolusi, mereka akan memiliki gen-gen yang mengagihkan kecenderungan ke buah ara jantan. Lebih

rumitnya lagi, kita juga akan mendapati bahwa pohon ara jantan mestinya perlu mendorong perkembangan tawon yang memasuki buah ara betina, begitu pula *sebaliknya*. Argumen sulit berikut ini akan saya dasarkan pada makalah cemerlang yang disusun oleh dua ahli biologi Inggris: Alan Grafen, salah seorang teoretikus matematis Darwinisme terdepan, dan Charles Godfray, seorang ahli ekologi dan entomologi terkemuka.

Senjata apa saja yang dimiliki pohon-pohon ara dalam melancarkan permainan strategi mereka? Pohon betina bisa membuat buah-buah aranya kelihatan, dan berbau, semirip mungkin dengan buah ara jantan. Mimikri, seperti dibahas pada bab-bab sebelumnya, adalah fenomena yang lazim terjadi di kerajaan makhluk hidup. Serangga tongkat menyerupai ranting yang tak bisa dimakan dan, karena itu, diabaikan oleh burung. Banyak kupu-kupu sedap menyerupai kupu-kupu sangit dari spesies lain yang, lewat pengalaman, dihindari oleh burung pemangsa. Anggrek dari berbagai spesies meniru lebah, lalat, atau tawon. Mimikri seperti ini telah meriangkan hati para peneliti alam sejak abad ke-19 dan kerap pula mengecoh para kolektor, seefektif terkecohnya hewan-hewan lain. Meski dahulu dikagumi dan tidak dimengerti, kini jelas bahwa mimikri, dengan kesempurnaan yang hampir tanpa batas, dengan mudahnya berevolusi melalui seleksi alam. Mimikri dengan buah ara jantan (yang diinginkan tawon) oleh buah ara betina (yang tidak diinginkan tawon) bisa dianggap sudah pasti, tetapi kelanjutannya – kalau diistilahkan secara halus – agak samar dan perlu banyak pemikiran. Kita juga menganggap buah ara jantan akan sebisa mungkin tampak, dan berbau, seperti buah ara betina. Berikut



ini alasannya.

Pohon ara jantan ‘ingin’ tawon betina memasuki buah aranya dan bertelur di bunga-bunga betina semu di dalamnya. Namun, ara baru memetik manfaatnya kalau tawon betina belia yang lantas menetas di situ lanjut memainkan perannya. Para betina baru ini harus memuat serbuk sari ke saku angkutnya, meninggalkan buah ara tempatnya lahir, dan kemudian paling tidak sebagian dari mereka harus masuk ke kuburan genetik buah ara betina dan menyerbukinya (sehingga gen-gen ara menyebar, walau gen-gen tawon itu sendiri tidak). Buah ara jantan yang tampak sangat tidak mirip buah ara betina mungkin sangat sukses dalam membantu tawon-tawon betina mencapai tujuannya masuk ke bunga-bunga jantan saja dan bertelur di sana. Tetapi para betina anakan dari tawon-tawon tersebut akan cenderung mewarisi selera ara induk-induk mereka. Tawon-tawon betina anakan ini akan mewarisi kecenderungan mencari buah-buah ara jantan saja dan mereka tak berguna dalam penyebaran gen-gen buah ara tempatnya menetas (walau lihai dalam penyebaran gen-gennya sendiri).

Sekarang, bayangkan sebatang pohon ara jantan yang buahnya menyerupai buah ara betina. Boleh jadi, lebih sukar baginya untuk memikat tawon betina, yang akan berkelit karena sedang mencoba menjauhi buah ara betina. Namun, tawon-tawon betina yang *ternyata* berhasil dipikatnya adalah sekelompok tawon betina yang diseleksi secara khusus: tawon betina yang dengan bodohnya (dari perspektif mereka) memasuki buah ara yang tampak seperti buah ara betina. Tawon-tawon ini akan bertelur di bunga-bunga betina semu, seperti tadi. Seperti tadi, tawon-tawon betina anakannya akan

mewarisi selera ara induk-induk mereka. Nah, sekarang, coba pikir seperti apa seleranya itu. Tawon-tawon belia ini berasal dari induk-induk yang dengan rela dan bersemangat memasuki buah ara jantan *yang tampak seperti buah ara betina*, dan anak-anak betinanya akan mewarisi tendensi mereka (yang bodoh dari perspektif tawon). Anak-anak betina mereka akan melanglang buana, mencari buah-buah ara yang tampak seperti buah ara betina. Dan mereka akan menemukan sejumlah cukup buah ara betina sejati, yang berakibat binasanya gen-gen mereka sendiri tetapi ditempatkannya serbuk sari buah ara jantan persis di lokasi yang diinginkan. Tawon-tawon betina yang telah teperdaya ini mencampakkan gen-gennya sendiri, tetapi membawa gen-gen ara sukses di bakul-bakul serbuk sarinya, termasuk gen-gen untuk membuat buah ara jantan meniru buah ara betina. Gen-gen buah ara dari pohon-pohon pesaing – gen-gen yang membuat buah ara jantan sangat lain dari buah ara betina – juga ikut dibawa di bakul-bakul serbuk sari tawon. Tetapi serbuk sari yang berbakul-bakul ini lebih berisiko terbuang – dari perspektif buah ara jantan – di kuburan genetik buah ara jantan yang lain. Maka, buah ara jantan akan ‘bersekongkol’ dengan buah ara betina untuk menyulitkan tawon dalam membedakan keduanya dan menghindari kuburan genetik mereka. Buah ara jantan dan buah ara betina akan ‘seiya sekata’ dalam ‘keinginan’ untuk tak dapat dibedakan.

Seperti sorak-sorai Einstein, sungguh Tuhan maha pelik! Tapi, kalau masih bisa tahan, kepelikannya makin menjadi. Bunga-bunga betina semu, di dalam buah-buah ara jantan, harus diserbuki agar menyediakan makanan yang dibutuhkan seekor larva tawon. Jadi, tidak sulit untuk memahami, dari perspektif



tawon betina, alasannya gitu menjelali diri dengan serbuk sari; tidak sulit untuk memahami alasan tawon betina memiliki bakul-bakul serbuk khusus, daripada hanya dipupur serbuk sari secara tak sengaja. Tawon-tawon betina memetik manfaat nyata dengan membawa serbuk sari. Mereka butuh serbuk sari agar bunga-bunga betina semu membuat makanan untuk larva-larva mereka. Namun, Grafen dan Godfray menunjukkan bahwa masih tersisa satu masalah di sisi pihak yang satu lagi dari relasi yang luar biasa ini. Masalah timbul bila kita berpaling ke pihak buah ara. Mengapa bunga-bunga betina semu di sebiji buah ara jantan *perlu* diserbuki dahulu baru menyediakan makanan untuk larva-larva tawon? Bukankah akan lebih ringkas kalau langsung saja, dengan atau tanpa penyerbukan? Buah ara jantan perlu memberi makan larva tawon supaya bisa menghantarkan serbuk sari ke buah ara betina. Tetapi mengapa bunga-bunga betina semu bersiteguh harus diserbuki dahulu sebelum menghasilkan makanan?

Bayangkan ada pohon jantan mutan, sebatang jadah yang lebih lunak terhadap syarat ini dan mengizinkan larva-larva tawon berkembang sekalipun ditaruh di bunga-bunga yang tidak diserbuki. Pohon mutan ini tampaknya akan lebih unggul dari para rivalnya yang bawel soal syarat dan ketentuan karena ia akan menghasilkan lebih banyak tawon belia. Coba pikir. Buah ara bisa saja dimasuki beberapa betina yang, karena satu dan lain hal, tidak membawa serbuk sari di bakul mereka. Di buah ara yang rewel, tawon-tawon betina ini bisa saja bertelur, tetapi larva yang menetas akan mati kelaparan dan pasukan muda penyerbuk pun tidak terbentuk. Tapi sekarang lihat rivalnya, ara mutan yang toleran. Kalau ia

dimasuki oleh tawon betina tanpa serbuk sari, tidak masalah. Larva-larva tawon betina itu tetap tumbuh dan akan menjadi tawon-tawon belia yang sehat. Ara yang toleran ini akan menghasilkan lebih banyak tawon karena ia membesarkan baik keturunan tawon yang membawa serbuk maupun keturunan tawon yang tidak. Jadi, buah ara jantan yang toleran ini jelas lebih unggul dari buah ara jantan yang kaku soal aturan karena ia akan menghasilkan pasukan tawon betina yang lebih besar untuk membawa serbuk sarinya terbang, menuju cakrawala genetik. Bukan begitu?

Bukan, dan inilah kepelikan yang hampir-hampir terlalu kusut, yang dicermati Grafen dan Godfray. Bala tentara tawon betina belia ini, yang berbondong-bondong keluar dari buah ara yang toleran, jumlahnya memang banyak. Tapi argumennya sama seperti yang tadi – mereka akan mewarisi tendensi induk-induk mereka. Induk-induk mereka – khususnya induk-induk dari tawon-tawon surplus ini, selisih yang dihasilkan buah ara toleran melebihi buah ara rival yang rewel soal aturan – punya kelemahan. Mereka gagal membawa serbuk sari atau, karena alasan lain, gagal menyerbuki bunga tempat tumbuh kembang larva-larvanya. Itulah mengapa larva-larva tambahan ini cuma tambahan saja. Dan mereka akan cenderung mewarisi kelemahan tersebut. Mereka akan condong tidak membawa serbuk sari atau akan condong menjadi penyerbuk yang buruk. Hampir seolah buah ara jantan yang rewel soal aturan dengan sengaja merintangi tawon-tawon yang memasukinya. Ia menguji mereka, untuk melihat apakah mereka akan melakukan terhadap bunga-bunga betina semu segala hal yang akan mereka perbuat terhadap bunga betina sejati. Kalau tidak, larva-larva mereka tidak diizinkan berkembang. Dengan

ujian tersebut, buah ara jantan menyeleksi gen-gen tawon yang cenderung membuat tawon pandai menyebarkan gen-gen ara. Grafen dan Godfray menyebutnya ‘seleksi janggal’. Agak mirip seleksi buatan, seperti yang kita bahas di Bab 1, tetapi tidak sepenuhnya. Bunga-bunga betina semu ibarat simulator yang dipakai untuk menyaring pilot-pilot yang tidak kompeten menerbangkan pesawat sungguhan.

Seleksi janggal adalah wacana baru dan menyuguhkan jawaban atas permasalahan yang lebih pelik lagi. Gen-gen ara dan gen-gen tawon adalah mitra, yang melenggang cepat beriringan di sepanjang waktu geologis. Sebagian besar dari banyak spesies ara, seperti telah kita lihat, memiliki spesies tawon pribadinya sendiri. Ara dan tawonnya telah berevolusi bersama – koevolusi – bersanding satu sama lain dan memisah dari spesies ara dan tawon yang lain. Kita sudah melihat keuntungan hal ini dari sudut pandang ara. Spesies tawon penyerbuk pribadi adalah peluru ajaib paling tokcer. Dengan membiakkan satu saja spesies tawon, tumbuhan ara mengarahkan serbuk sari langsung ke buah ara betina dari spesiesnya sendiri, bukan yang lain. Mereka tidak membuang-buang serbuk sari seperti kalau harus berbagi spesies tawon yang sama, satu spesies yang bertandang ke semua spesies ara tanpa pandang biji. Kurang jelas apakah kesetiaan teguh pada satu spesies ara juga menguntungkan tawon, tetapi mereka kemungkinan tak punya pilihan. Untuk alasan-alasan yang tidak perlu kita bahas, spesies kadang kala berpisah dalam evolusinya, membelah menjadi dua spesies. Pada kasus pohon-pohon ara, ketika mereka saling menyimpang pada kurun waktu evolusi, boleh jadi mereka mengubah ciri khas kimiawi yang menjadi petunjuk tawon untuk mengenali ara,

dan mungkin juga detail-detail ‘gembok-dan-kunci’ lain, seperti kedalaman bunga-bunga mungilnya. Spesies-spesies tawon terpaksa mengikuti. Contohnya, bunga yang secara gradual makin dalam di pihak ara (gembok) memaksa pemajangan ovipositor secara gradual di pihak tawon (kunci) dalam koevolusi keduanya.

Sekarang muncul satu masalah ganjil yang ditemukan oleh Grafen dan Godfray. Untuk menguraikannya, kita akan lanjutkan analogi gembok dan kunci. Spesies-spesies ara memisah satu sama lain dengan mengganti gembok-gemboknya dan spesies-spesies tawon menyesuaikan dengan kunci-kuncinya. Hal serupa mestilah terjadi ketika anggrek-anggrek leluhur meragam menjadi anggrek lebah, anggrek lalat, dan anggrek tawon. Tetapi pada kasus anggrek, proses kejadian koevolusinya mudah dipahami. Tumbuhan ara menghadirkan masalah yang amat istimewa dan amat menggiurkan – masalah terakhir yang akan saya tangani di buku ini. Jika ceritanya berjalan sesuai rencana koevolusi yang biasa, peristiwa seperti yang berikut inilah yang akan terjadi. Gen-gen untuk bunga yang lebih dalam, misalnya, akan dipilih di antara buah-buah ara betina. Hal ini akan menimbulkan tekanan seleksi positif untuk ovipositor yang lebih dalam di antara tawon-tawon. Namun, karena ganjilnya keadaan ara-ara ini, cerita tipikal koevolusi ini tidak bisa berlaku. Bunga-bunga betina yang meneruskan gen-gennya hanyalah bunga-bunga betina sejati pada buah ara betina, bukan bunga-bunga betina semu pada buah ara jantan; sementara tawon-tawon betina yang meneruskan gen-gennya hanyalah yang bertelur di bunga-bunga betina semu, bukan yang bertelur di bunga-bunga betina sejati. Maka, individu-individu tawon yang

kebetulan memiliki ovipositor panjang dan berhasil menggapai dasar bunga-bunga betina yang panjang tidak akan meneruskan gen-gen untuk ovipositor panjang. Individu-individu tawon yang ovipositor panjangnya menggapai dasar bunga-bunga betina semu akan meneruskan gen-gen mereka sendiri. Tapi di sini, gen-gen untuk membuat bunga-bunga panjang tidak akan diteruskan. Timbul teka-teki.

Sekali lagi, jawaban atas teka-teki ini tampaknya terletak pada seleksi janggal – simulator akurat untuk menyeleksi pilot: Buah-buah ara jantan ‘ingin’ agar tawon-tawon yang dikerahkannya pandai menyerbuki bunga-bunga betina sejati. Oleh karena itu, pada contoh hipotetis kita tadi, mereka menginginkan tawon yang memiliki ovipositor panjang. Cara terbaik bagi buah ara jantan untuk memastikan hal ini adalah dengan membolehkan hanya induk-induk berovipositor panjang saja yang bertelur di bunga-bunga betina semunya. Mengutarakan wacananya dalam kerangka contoh khusus ini berisiko membuatnya terdengar terlalu sengaja, seolah buah ara jantan ‘tahu’ bahwa bunga-bunga betina itu dalam. Seleksi alam akan melakukannya secara otomatis dengan memilih buah-buah ara jantan yang bunga-bunga betina semunya menyerupai bunga-bunga betina sejati di semua segi, termasuk kedalaman.

Ara dan tawon ara menduduki tempat yang tinggi untuk pencapaian evolusi: puncak spektakuler Gunung Kemusikilan. Relasi keduanya menunjukkan liku-liku dan kepelikan yang hampir-hampir menggelikan. Yang minta ditafsirkan dalam bahasa perhitungan yang sengaja, sadar, dan menghalalkan segala cara. Namun, semua itu dicapai tanpa kesengajaan apa pun, tanpa daya pikir atau kecerdasan apa pun. Bagi kita, hal

itu ditebalkan dengan kenyataan bahwa para pemainnya adalah tawon kecil dengan otak mungil di pihak yang satu dan pohon tanpa otak sama sekali di pihak yang lain. Semua itu adalah hasil proses setel-teliti Darwinian tanpa kesadaran, yang kesempurnaan canggihnya takkan kita percaya kalau tidak kita lihat dengan mata kepala sendiri. Ada berlaku semacam perhitungan atau, lebih tepatnya, jutaan kalkulasi paralel, atas biaya dan manfaat. Semua kalkulasi ini begitu rumit dan sulit, sampai-sampai komputer terbesar kita pun berat memprosesnya. Tapi ‘komputer’ yang mengolah perhitungannya tidak terbuat dari komponen-komponen elektronik, pun dari komponen-komponen saraf. Ia sama sekali tidak terletak di relung tertentu di antariksa. Ia komputer otomatis dan terdistribusi, yang keping-keping datanya disimpan dalam kode DNA, tersebar di jutaan tubuh, beralih dari tubuh ke tubuh, melalui proses-proses reproduksi.

Ahli fisiologi Oxford ternama, Sir Charles Sherrington, menyamakan otak dengan mesin tenun bertuah dalam paragraf terkenal ini:

Seolah Bimasakti mulai mempertunjukkan tarian akbar. Segera saja otak menjadi mesin tenun bertuah, yang jutaan teropongnya menganyam sebuah pola yang berubah-ubah, pola yang selalu penuh arti tetapi tak pernah abadi; sub-subpola yang mengalun serasi bagi harmoni.

Munculnya sistem saraf dan otaklah yang melahirkan benda-benda desain ke dunia ini. Sistem saraf itu sendiri, dan semua benda desain, adalah hasil dari tarian akbar yang lebih purba dan perlahan. Pandangan Sherrington itu membantunya menjadi salah seorang penyelidik sistem saraf terkemuka pada paruh pertama abad ini. Barangkali bermanfaat bila kita

meminjam pandangannya. Evolusi adalah mesin tenun bertuah yang semua teropongnya sibuk menganyam benang-benang kode DNA; pola-pola fana yang tercipta, saat mereka meronggeng berpasang-pasangan di sepanjang kala geologis purba, menyulam himpunan megah kearifan leluhur, uraian yang tersandi secara digital tentang marcapada nenek moyang dan syarat serta cara agar sintas di dalamnya.

Tapi uraian penalaran itu harus ditulis di buku yang lain. Di buku ini, pelajaran pokoknya adalah bahwa dataran tinggi evolusi tidak dapat dijajaki dengan tergesa-gesa. Permasalahan tersulit sekalipun tetap bisa dipecahkan dan puncak-puncak terterjal sekalipun bisa dijajal, bilamana jalur landai, untuk ditapaki dengan tekun dan perlahan, bisa ditemukan. Gunung Kemuskilan tidak dapat diterjang. Berangsur-angsur, meski lambat, ia harus didaki.



## DAFTAR PUSTAKA

### REFERENSI DAN SARAN BACAAN LEBIH LANJUT

- Adams, D. (1989) *The More than Complete Hitchhiker's Guide*. New York: Wings Books.
- Attenborough, D. (1979) *Life on Earth*. London: Collins.
- Attenborough, D. (1984) *The Living Planet*. London: Collins/BBC Books.
- Attenborough, D. (1995) *The Private Life of Plants*. London: BBC Books.
- Basalla, G. (1988) *The Evolution of Technology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Berry, R. J., dan Hallam, A. (Eds.) (1986) *Collins Encyclopedia of Animal Evolution*. London: Collins.
- Bonner, J. T. (1988) *The Evolution of Complexity*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Bristowe, W. S. (1958) *The World of Spiders*. London: Collins.
- Brusca, R. C., dan Brusca, G. J. (1990) *Invertebrates*. Sunderland, Mass.: Sinauer.
- Carroll, S. B. (1995) 'Homeotic genes and the evolution of arthropods and chordates'. *Nature*, 376, 479-85.
- Coveney, P., dan Highfield, R. (1995) *Frontiers of Complexity*. London: Faber and Faber.
- Cringely, R. X. (1992) *Accidental Empires*. London: Viking
- Cronin, H. (1991) *The Ant and the Peacock*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Dance, S.P. (1992) *Shells*. London: Dorling Kindersley.
- Darwin, C. (1859) *The Origin of Species*. Harmondsworth (1968): Penguin.
- Darwin, C. (1882) *The Various Contrivances by Which Orchids are Fertilised by Insects*. London: John Murray.
- Dawkins, R. (1982) *The Extended Phenotype*. Oxford: W. H. Freeman.
- Dawkins, R. (1986) *The Blind Watchmaker*. Harlow: Longman.
- Dawkins, R. (1989) 'The evolution of evolvability'. In *Artificial Life*. (Ed. C. Langton.) Santa Fe: Addison-Wesley,
- Dawkins, R. (1989) *The Selfish Gene*. (edisi ke-2) Oxford: Oxford University Press.
- Dawkins, R. (1995) *River Out of Eden*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Dennett, D. C. (1995) *Darwin's Dangerous Idea*. New York: Simon and Schuster.
- Douglas-Hamilton, Ian O. (1992) *Battle for the Elephants*. London: Doubleday.
- Drexler, K. E. (1986) *Engines of Creation*, New York Anchor Press/Doubleday.
- Eberhard, W. G. (1985) *Sexual Selection and Animal Genitalia*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- Eldredge, N. (1995) *Reinventing Darwin: The great debate at the high table of evolutionary theory*. New York: John Wiley.
- Fisher, R. A. (1958) *The Genetical Theory of Natural Selection*. New York Dover.
- Ford, E. B. (1975) *Ecological Genetics*. London: Chapman and Hall
- Frisch, K. v. (1975) *Animal Architecture*. London: Butterworth.
- Fuchs, P., dan Krink, T. (1994) 'Modellierung als Mittel zur Analyse raumlichen Orientierungsverhaltens'. Diplomarbeit, Universität Hamburg

- Goodwin, B. (1994) *How the Leopard Changed its Spots*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Gould, J. L, dan Gould, C. G. (1988) *The Honey Bee*. New York: Scientific American Library
- Gould, S. J. (1983) *Hen's Teeth and Horse's Toes*. New York: W. W. Norton.
- Grafen, A., dan Godfray, H. C.J. (1991) 'Vicarious selection explains some paradoxes in dioecious fig-pollinator systems'. *Proceedings of the Royal Society of London*, B., 245, 73-6
- Gribbin, J., dan Gribbin, M. (1993) *Being Human*. London: J. M. Dent
- Haeckel, E. (1974) *Art Forms in Nature*. New York Dover.
- Haldane, J. B. S. (1985) *On Being the Right Size*. (Ed. J. Maynard Smith.) Oxford: Oxford University Press.
- Halder, G., Callaerts, P., dan Gehring, W. J. (1995) 'Induction of ectopic eyes by targeted expression of the eyeless gene in *Drosophila*'. *Science*, 267, 1788-92.
- Hamilton, W. D. (1996) *Narrow Roads of Gene Land: The collected papers of W. D. Hamilton, Vol. 1. Evolution of Social Behaviour*. Oxford: W. H. Freeman/Spektrum.
- Hansell, M. H. (1984) *Animal Architecture and Building Behaviour*. London: Longman.
- Hayes, B. (1995) 'Space-time on a seashell'. *American Scientist*, 83, 214-18.
- Heinrich, B. (1979) *Bumblebee Economics*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- Hölldobler, B., dan Wilson, E. O. (1990) *The Ants*. Berlin: Springer-Verlag
- Hoyle, F. (1981) *Evolution From Space*. London: J. M. Dent.
- Janzen, D. (1979) 'How to be a fig'. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10, 13-51.
- Kauffman, S. (1995) *At Home in the Universe*. Harmondsworth: Viking.

## DAFTAR PUSTAKA

- Kettlewell, H. B. D. (1973) *The Evolution of Melanism*. Oxford: Oxford University Press.
- Kingdon, I (1993) *Self-made Man and His Undoing*. London: Simon and Schuster.
- Kingsolver, J. G., dan Koehl, M. A. R. (1985) 'Aerodynamics, thermoregulation, and the evolution of insect wings: differential scaling and evolutionary change'. *Evolution*, 39, 488-504.
- Land, M. F. (1980) 'Optics and vision in invertebrates'. Dalam *Handbook of Sensory Physiology*. (Ed. H. Autrum.) VII/68, 471-592. Berlin: Springer-Verlag.
- Langton, C. G. (Ed.) (1989) *Artificial Life*. New York: Addison-Wesley.
- Lawrence, P. A. (1992) *The Making of a Fly*. London: Blackwell Scientific Publications.
- Leakey, R. (1994) *The Origin of Humankind*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Lundell, A. (1989) *Virus! The secret world of computer invaders that breed and destroy*. Chicago: Contemporary Books.
- Macdonald, D. (Ed.) (1984) *The Encyclopedia of Mammals* (2 vol.) London: Allen and Unwin
- Margulis, L. (1981) *Symbiosis in Cell Evolution*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Maynard Smith, J. (1988) *Did Darwin Get it Right?* Harmondsworth: Penguin Books.
- Maynard Smith, J. (1993) *The Theory of Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Maynard Smith, J., dan Szathmáry, E. (1995) *The Major Transitions in Evolution*. Oxford: Freeman/Spektrum.
- Meeuse, B., dan Morris, S. (1984) *The Sex Life of Plants*. London: Faber and Faber.

- Meinhardt, H. (1995) *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*. Berlin: Springer-Verlag
- Moore, R. C., Lalicker, C. G., dan Fischer, A. G. (1952) *Invertebrate Fossils*. New York: McGraw-Hill
- Nesse, R., dan Williams, G. C. (1995) *Evolution and Healing: The New Science of Darwinian Medicine*. London: Weidenfeld and Nicolson. Juga diterbitkan dengan judul *Why We Get Sick* oleh Random House, New York.
- Nilsson, D.-E. (1989) 'Vision, optics and evolution'. *Bioscience*, 39, 298-307.
- Nilsson, D.-E. (1989) 'Optics and evolution of the compound eye'. Dalam *Facets of Vision*. (Eds. D. G. Stavenga and R. C. Hardie.) Berlin: Springer-Verlag
- Nilsson, D.-E., dan Pelger, S. (1994) 'A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve'. *Proceedings of the Royal Society of London*, 8, 256, 53-8.
- Orgel, LE (1973) *The Origins of Life*. London: Chapman and Hall.
- Pennyculck, C. J. (1972) *Animal Flight*. London: Edward Arnold.
- Pennyculck, C.J. (1992) *Newton Rules Biology*. Oxford: Oxford University Press.
- Pinker, S. (1994) *The Language Instinct*. Harmondsworth: Viking.
- Provine, W. B. (1986) *Sewall Wright and Evolutionary Biology*. Chicago: Chicago University Press.
- Raff, R.A., and Kaufman, T. C. (1983) *Embryos, Genes and Evolution*. New York Macmillan.
- Raup, D. M. (1966) 'Geometric analysis of shell coiling general problems'. *Journal of Paleontology*, 40, 1178-90.
- Raup, D. M. (1967) 'Geometric analysis of shell coiling coiling in ammonoids'. *Journal of Paleontology*, 41, 43-65
- Ridley, Mark (1993) *Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.

- Ridley, Matt (1993) *The Red Queen: Sex and the evolution of human nature*. Harmondsworth: Viking.
- Robinson, M. H. (1991) 'Niko Tinbergen, comparative studies and evolution'. Dalam *The Tinbergen Legacy*, (Eds. M. 5. Dawkins, T. R. Halliday, and R. Dawkins.) London: Chapman and Hall.
- Ruse, M. (1982) *Darwinism Defended*. Reading, Mass: Addison-Wesley.
- Sagan, C., dan Druyan, A. (1992) *Shadows of Forgotten Ancestors*. New York: Random House.
- Salvini-Plawen, L. v. dan Mayr, E. (1977) 'On the evolution of photoreceptors and eyes'. Dalam *Evolutionary Biology*. (Eds. M. K. Hecht, W. C. Steere, dan B. Wallace.) 10, 207-63. New York Plenum.
- Terzopoulos, D., Tu, X., dan Grzeszczuk, R. (1995) 'Artificial fishes: autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world'. *Artificial Life*, 1, 327-51.
- Thomas, K. (1983) *Man and the Natural World: Changing Attitudes in England 1500-1800*. Harmondsworth: Penguin Books
- Thompson, D'A. (1942) *On Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Trivers, R. L. (1985) *Social Evolution*. Menlo Park: Benjamin/ Cummings.
- Vermeij, G. J. (1993) *A Natural History of Shells*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Vollrath, F. (1988) 'Untangling the spider's web'. *Trends in Ecology and Evolution*, 3, 331-5.
- Vollrath, F. (1992) 'Analysis and interpretation of orb spider exploration and web-building behavior'. *Advances in the Study of Behavior*, 21, 147-99.
- Vollrath, F. (1992) 'Spider webs and silks'. *Scientific American*, 266, 70-76.
- Watson, J. D., Hopkins, N. H., Roberts, J. W., Steitz, J. A., dan Weiner, A. M. (1987) *Molecular Biology of the Gene* (edisi ke-4). Menlo Park Benjamin/Cummings.

- Weiner, J. (1994) *The Beak of the Finch*. London: Jonathan Cape.
- Williams, G. C. (1992) *Natural Selection: Domains, Levels and Challenges*. Oxford: Oxford University Press.
- Wilson, E. Q. (1971) *The Insect Societies*. Cambridge, Mass: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Wolpert, L. (1991) *The Triumph of the Embryo*. Oxford: Oxford University Press.
- Wright, S. (1932) 'The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution'. *Proceedings 6th International Congress of Genetics*, 1, 356-66.

