

E.M. WILSON



HIDRO- LOGI TEKNIK

EDISI KEEMPAT

PENERBIT ITB BANDUNG

Hidrologi teknik

Terbitan Keempat

E.M. Wilson

D. Sc., Ph.D., M.Sc., F.I.C.E., F.A.S.C.E

Profesor Peneliti dalam Teknik Hidrolik
Universitas Salford



Penerbit ITB Bandung

Isi

Judul asli: EM Wilson, *Engineering hydrology*, edisi ke-4

© EM Wilson 1969, 1974, 1983, 1990

All rights reserved. No reproduction, copy or transmission of this publication may be made without written permission.

No paragraph of this publication may be reproduced, copied or transmitted save with written permission or in accordance with the provisions of the Copyright, Designs and Patents Act 1988, or under the terms of any licence permitting limited copying issued by the Copyright Licensing Agency, 90 Tottenham Court Road, London W1P 9HE.

Any person who does any unauthorised act in relation to this publication may be liable to criminal prosecution and civil claims for damages.

First published 1969 by

THE MACMILLAN PRESS LTD

Hounds Mills, Basingstoke, Hampshire RG21 2XS

and London Companies and representatives throughout the world

Penerjemah : MM Purbo-Hadiwidjoyo, AIAGI, MAEG, MAESE

Penyunting : drs. Suroso, MSc

Buku ini diterbitkan dalam rangka pengadaan buku ajar untuk perguruan tinggi, bekerja sama dengan Higher Education Development Project, IBRD Loan 2944-IND (World Bank Education XXI Project), Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Hak cipta edisi bahasa Indonesia: Penerbit ITB 1993

Data katalog dalam terbitan

WILSON

Hidrologi teknik; terjemahan MM Purbohadiwidjoyo. — Bandung:
Penerbit ITB, 1993.
14a, 328 h., 21 cm
620.416 2

ISBN 979-8001-88-5

Prakata dari penerbit 9a

Prakata untuk terbitan keempat 10a

Sanwacana 11a

Takarir 13a

1 Pendahuluan

- 1.1 Ilmu yang berhubungan 1
- 1.2 Daur hidrologi 2
- 1.3 Kekayaan air pada bumi 3
- 1.4 Hidrologi sebagaimana diterapkan dalam rekayasa 4

2 Data meteorolog

- 2.1 Cuaca dan iklim 6
- 2.2 Kelembapan 7
- 2.3 Suhu 10
- 2.4 Penyinaran 11
- 2.5 Angin 11
- 2.6 Pencurahan 12
- 2.7 Bentuk curahan selain hujan 18
- 2.8 Peluasan dan penafsiran data 19
- 2.9 Peluang curahan terbesar (PCT) 33

Acuan 37

Soal 39

3 Penguapan dan pemeluhan

- 3.1 Faktor meteorologi 43
- 3.2 Pemeluhan 44
- 3.3 Cara menaksir penguapan 45
- 3.4 Penguapan dari permukaan daratan dengan menggunakan nilai Penman E₀ 55
- 3.5 Rumus Thornthwaite untuk penguapan 56

3.6 Pengukuran langsung dengan kancah penguap	58	7.3 Memisahkan aliran dasar dan limpasan	172
3.7 Pemakaian habis	59	7.4 Menilai aliran dasar	176
Acuan	67	7.5 Hidrograf satuan	177
Soal	69	7.6 Hidrograf satuan dari berbagai jujuh	179
4 Peresapan dan penelusan		7.7 Hidrograf satuan sebagai sebaran persen	184
4.1 Daya resap tanah	72	7.8 Penurunan hidrograf satuan	185
4.2 Berbagai faktor yang berpengaruh terhadap f_c	72	7.9 Hidrograf satuan dari badai rumit atau badai masa-ganda	186
4.3 Cara menentukan daya resap	76	7.10 Hidrograf satuan sesaat	195
4.4 Kelengesan tanah	79	7.11 Hidrograf satuan sintesis	197
Acuan	88	7.12 Hidrograf satuan sintesis dari ciri DAS dengan cara FSR	201
Soal	89	7.13 Penggunaan hujan pada hidrograf satuan	212
5 Airtanah		Acuan	215
5.1 Keterdapatnya airtanah	91	Soal	216
5.2 Beberapa faktor yang berpengaruh	92	8 Melacak banjir	
5.3 Pengaliran airtanah	96	8.1 Pendahuluan	223
5.4 Menyadap airtanah	103	8.2 Persamaan penyimpanan	224
5.5 Serahan sumur	106	8.3 Pelacakan waduk	225
5.6 Mengupas uji pompa	114	8.4 Melacak alur sungai	230
Acuan	119	8.5 Cara pelacakan grafik	238
Soal	119	8.6 Hidrograf satuan sintesis dari pelacakan banjir	241
6 Limpasan permukaan		Acuan	248
6.1 Masalah keteknikan yang bersangkutan	121	Soal	250
6.2 Ciri DAS dan pengaruhnya terhadap limpasan	122	9 Prakiraan hidrologi	
6.3 Faktor iklim	128	9.1 Pendahuluan	255
6.4 Penasaban curah hujan/limpasan	130	9.2 Beberapa rumus banjir	256
6.5 Lengkung tarafan aliran: penentuan, penyesuaian dan luasannya	132	9.3 Analisis kekerapan	260
6.6 Volum dan jujuh limpasan	150	9.4 Cara FSR untuk memprakirakan Q dan Q_T untuk DAS yang tak	
6.7 Menaksir limpasan rataan, Q_m	157	tersukat	278
Acuan	158	9.5 Membangkitkan data sintesis	282
Soal	161	9.6 Khuluk berdaur gejala hidrologi	284
7 Analisis hidrograf		Acuan	285
7.1 Pesusun hidrograf alami	167	Soal	288
7.2 Saham aliran dasar kepada luahan sungai	169	10 Hidrologi perkotaan	

10.1 Pendahuluan	297
10.2 Penggunaan cara kesebandingan	297
10.3 Cara hidrograf	302
Acuan	303
11 Lengkung pertumbuhan kekerapan banjir internasional	
11.1 Penelitian banjir sedunia	305
11.2 Simpulan umum	307
Acuan	311
12 Patokan meripta	
12.1 Analisis risiko	312
12.2 Memilih masa ulang ripta dengan mempertimbangkan umur ripta dan peluang untuk menjumpai aliran ripta selama umur itu	313
12.3 Memilih nilai ripta kejadian langka	314
Acuan	315
Lampiran	317
Jawaban soal	318
Senarai kata dan istilah	318
Penjurus	325

Prakata dari penerbit

Buku terjemahan ini disajikan dengan bertolak dari pendirian yang berikut: Bagaimana pun baiknya sebuah buku ajar, perlu diperhitungkan keadaan tempat buku itu akan digunakan. Buku *Hidrologi teknik* ini ditulis untuk digunakan di negara mana pun juga. Sebagaimana dapat kita maklumi, keadaan kita di Indonesia tidaklah sama dengan di banyak negara yang telah maju. Sebagai misal, dalam penerapan hidrologi teknik di lapangan, kita di sini sering menghadapi kenyataan betapa bertema (topografi, geologi, tanah) sangat langka atau bahkan tidak tersedia sama sekali. Hal seperti itu mendorong kami dari Penerbit ITB untuk menyesuaikan buku ini di sana-sini dengan keadaan kita di Indonesia, dengan persetujuan penulis dan tanpa mengurangi arti buku secara keseluruhan. Di bagian yang memerlukan keterangan tambahan, disisipkan catatan dari penerjemah.

Menyadari akan pentingnya penggunaan bahasa Indonesia yang baik mendorong kami mengikuti, sedapat mungkin, kaidah dan aturan yang dianggap sesuai dewasa ini. Termasuk yang benar-benar diperhatikan adalah peristilahan. Untuk itu telah digunakan peristilahan yang telah dipersetujui dalam Majelis Bahasa Indonesia-Malaysia (MBIM, dan sejak 1985 setelah Brunei Daussalam bergabung, menjadi MABBIM). Untuk memudahkan para pengguna, pada buku ini dicantumkan takarir serta senarai kata dan istilah.

Semoga dengan cara itu kegunaan buku ini dapat ditingkatkan.

Penerbit ITB

Prakata untuk terbitan keempat

Terbitan yang keempat ini, sama dengan ketiga terbitan yang sebelumnya, ditulis untuk mahasiswa teknik dan para insinyur muda. Tujuannya, untuk memperkenalkan kepada mereka dasar dan kebiasaan hidrologi teknik dalam praktek, dan untuk menunjukkan, lewat contoh yang sudah diselesaikan, cara pendekatan banyak masalah yang rupanya sukar, dan dijumpai oleh para insinyur bangunan air.

Dasawarsa terakhir ini merupakan waktu dengan kesibukan yang luar biasa, setelah terbitnya *Flood Studies Report* ('Laporan Telitian Banjir') oleh Lembaga Hidrologi Inggris. Contoh mengenai karya yang masih sedang berjalan itu mencakup: kemajuan dalam hidrologi perkotaan, yang terbit sebagai *The Wallingford Procedure* ('Tatacara Wallingford'); *Low Flow Studies* ('Telitian Aliran Rendah'); *Flood Studies Supplementary Report* ('Laporan Pelengkap Telitian Banjir'); dan *World Flood Study* ('Telitian Banjir Dunia') oleh IOH; dan *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* ('Pedoman untuk Menaksir Peluang Curahan Tertinggi') dari Badan Meteorologi Sedunia.

Uraian ringkas untuk beberapa di antara pokok itu dimasukkan ke dalam terbitan ini untuk mendorong agar tulisan aslinya dipelajari lebih mendalam. Kesempatan ini juga telah digunakan untuk menambah daftar soal, menyusun kembali beberapa babnya, memutakhirkan acuan, termasuk bahan yang ada hubungannya.

Saya terus menerima tanggapan, pindaan dan saran dari seluruh pelosok dunia; saya sangat menghargainya. Untuk semua itu saya mengucapkan terima kasih.

Manchester, 1989

E.M. Wilson

Sanwacana

Ucapan terimakasih disampaikan kepada yang tercantum di bawah ini untuk penerbitan bahan yang dilindungi hak cipta.

- Direktur, Lembaga Hidrologi Inggris, Wallingford, Inggris Raya
Tabel 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.11, 4.2 dan 6.1
Gambar 2.7, 2.17, 4.9, 4.10, 6.21, 6.24, 7.28, 9.7, 9.8, 11.1, 11.2, 11.3 dan 11.4
- Pengawas, Her Majesty's Stationery Office (Kantor Barang Cetakan Kerajaan Inggris)
Gambar 2.6, 2.13, dan 4.8
- Jawatan Pemetaan Tanah Inggris dan Wales, Lembaga Macauley untuk Penelitian Tanah, Jawatan Pemetaan Tanah Irlandia dan Tn. B.S. Kear
Direktur, Jawatan Meteorologi Irlandia
- Direktur, Jawatan Meterorologi Ghana
Gambar 2.8
- Kelembagaan Insinyur Sipil
Gambar 7.25, 7.26 dan 7.27
- Profesor L. Huisman, Universitas Delft
Gambar 5.11
- Tn. P.J. Rijkort, Lembaga Meteorologi Kerajaan Belanda
Lampiran B: Nomogram untuk persamaan Penman.
- Penerbit Universitas Cambridge
Tabel 3.1
- Himpunan Geografi Amerika, New York
Gambar 3.2
- McGraw-Hill Book Company
Gambar 4.7

Dr. I.G. Littlewood

Gambar 6.13 dan 6.14

American Water Works Association

Gambar 2.18

Direktur, Laboratorium Penelitian Perangkutan dan Jalan Inggris

Tabel 10.1 dan 10.2

Gambar 10.1

Direktur Jenderal, Badan Pangan dan Pertanian PBB

Tabel 3.2, 3.3 dan 3.4

Gambar 3.4

Ucapan terima kasih untuk bantuan dan informasi juga disampaikan kepada

Tn. B.J. Greenfield dari Otoritas Air Thames

Dr. Frank Farquharson, Dr. I.G. Littlewood, dan Dr. A.

Gustard, semuanya dari Lembaga Hidrologi Inggris

Dinas Jasa Nasihat, Kantor Meteorologi Inggris

Pimpinan Boode, B.V., Zevenhuizen, Negeri Belanda untuk gambar 5.9

Ny. Margaret Pearson, Universitas Salford

Takarir

Peristilahan disesuaikan dengan hasil kerjasama Indonesia-Malaysia. pdnn - padanan

akuifer - lapisan dalam Bumi yang mengandung air, mis. batupasir - aquifer

banjir - aliran air yang nisbi tinggi, sebagaimana terukur pada papan duga atau dari luah - flood

banjir ripta - hidrograf banjir atau luahan puncak sesaat yang diambil untuk meripta bangunan air atau pengendali sungai dengan memperhitungkan faktor ekonomi dan hidrologi - design flood

banjir, pelacakan - usaha menggambarkan proses menentukan keragaman luahan sejalan dengan waktu di suatu titik di alur sungai, dengan mempertimbangkan data serupa bagi sebuah titik di bagian hulu - flood routing

bendung - sawar rendah melintang sungai guna melengkongkan, mengendalikan, menghentikan atau mengukur aliran air - weir

bendungan - sawar yang dibangun melintang lembah untuk membendung air atau membentuk waduk - dam

halang - pdnn bendung

hidrologi - ilmu yang berhubungan dengan air di Bumi, keterdapatannya, persifatan kimia dan fisika dan persitindakan dengan lingkungannya, termasuk hubungannya dengan makhluk hidup - hydrology

hidrologi teknik - cabang hidrologi terapan yang menyangkut keterangan hidrologi yang teruntuk bagi teknik, mis. perancangan, periptaan, penyelenggaraan dan perawatan sarana dan bangunan teknik - engineering hydrology

hidrograf - grafik yang menunjukkan keragaman beberapa data hidrologi yang diamati seperti luahan, kecepatan pengaliran, beban endapan, sejalan dengan waktu - hydrograph

hidrograf satuan - hidrograf luahan hasil satu satuan limpasan yang terbangkitkan secara seragam di seluruh DAS pada tingkat yang seragam, selama jangka waktu tertentu - unit hydrograph

lapisan pembawa air - pdnn akuifer

luah, peluahan, luahan - banyaknya zatalir yang mengalir melalui suatu permukaan, misalnya penampang sungai, setiap satuan waktu; luah menunjuk kepada barangnya; pada peluahan yang diberi tekanan adalah prosesnya dan luahan menujuk pada hasil proses itu - discharge; lih. serahan

masa ulang - waktu rerata atau jumlah tahun terjadinya suatu peristiwa yang sama hebat atau lebih, misalnya puncak luahan banjir - return period

pelimpah - jalan air di dekat atau pada bendungan atau bangunan air lainnya, berbentuk saluran terbuka atau tertutup, untuk mengalirkan air banjir lebih - spillway

ripta, patokan meripta - nilai kejadian langka yang memberi peripta nilai berangka mengenai luahan, curah hujan, dsb. yang mempunyai makna yang sebenarnya, seperti kecepatan, kedalaman, isi - design criteria

serahan - banyaknya air yang dapat dikumpulkan untuk digunakan bagi keperluan tertentu, dari sumber air permukaan atau airtanah - yield

sumur artois - sumur yang memperoleh airnya dari akuifer tertekan - artesian well

waduk - badan air alam atau buatan yang digunakan untuk menyimpan, mengatur, dan mengendalikan sumber daya air - reservoir

1

Pendahuluan

Ilmu hidrologi berhubungan dengan keterdapat dan pergerakan air di atas dan melalui permukaan bumi. Ilmu itu berhubungan dengan berbagai bentuk kelengsangan yang ada, dan beralihnya wujud zat cair, zat padat dan bentuk gas itu di udara dan di lapisan permukaan daratan. Ilmu itu pun menyangkut lautansumbernya dan kumpulan semua air yang memberi hidup di planet ini.

1.1 Ilmu yang berhubungan

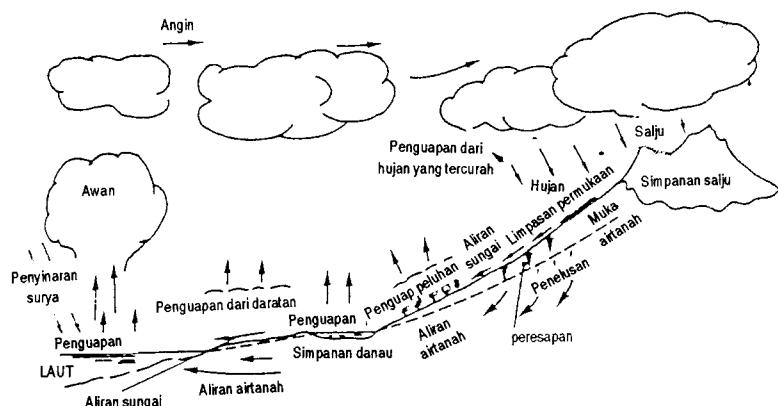
Lazimnya seorang rekayawan bidang hidrologi berhubungan dengan periptaan dan penyelenggaraan bangunan teknik untuk mengendalikan penggunaan air dan khususnya menyangkut pengaturan sungai besar dan kecil dan pembentukan waduk dan saluran pengairan. Meskipun demikian, ia pun harus menyadari akan penerapan hidrologi dalam tautan yang luas, karena banyak di antara bahan yang ia gunakan diturunkan lewat fisika, meteorologi, oseanografi, geografi, hidraulika dan ilmu lain yang berhubungan. Ia harus sadar akan pengalaman di bidang perhutanan dan pertanian serta botani dan biologi. Ia harus mengetahui teori peluang, barang sedikit cara statistika dan mampu menggunakan analisis ekonomi.

Pada dasarnya hidrologi adalah suatu ilmu yang bersifat menafsirkan. Melakukan percobaan dibatasi oleh ukuran kejadian di alam; yang diteliti sederhana saja dengan akibat yang bersifat khusus. Persyaratan mendasarnya berupa data yang diamati dan diukur mengenai semua segi pencurahan, pelimpasan, penelusan, pengaliran sungai, penguapan, dan seterusnya. Dengan data itu dan pemahaman tentang bidang pengetahuan yang berbasaran yang banyak itu, seorang hidrologiwan yang terampil dapat memberi jalan keluar bagi banyak masalah keteknikan yang timbul.

1.2 Daur hidrologi

Gerakan air yang berdaur dari lautan ke atmosfer dan dari sana karena pencurahan ke bumi, tempat air itu berkumpul, disebut daur hidrologi. Urutan peristiwa yang berdaur seperti itu memang terjadi, tetapi tidak sesederhana itu. Pertama, daur itu mungkin pada berbagai tahapan membuat jalan pintas, misalnya curahan dapat terjadi langsung di lautan, danau atau jalan air. Kedua, tidak ada keseragaman waktu yang terpakai oleh daur itu. Pada waktu ada kekeringan mungkin daur itu ternyata terhenti sama sekali, dan selama banjir tampak berlangsung terus. Ketiga, kehebatan dan kekerapan daur itu bergantung pada geografi dan iklim, karena yang menyebabkannya bekerja adalah penyinaran matahari yang berbeda-beda, bergantung pada garis lintang dan musim sepanjang tahun. Akhirnya, berbagai bagian daur itu mungkin menjadi cukup rumit (banyak liku-likunya) dan manusia hanya mampu mengendalikan sedikit pada bagian terakhirnya, ketika air sudah jatuh di bumi dan menempuh jalannya kembali ke lautan.

Meskipun anggitan daur hidrologi ini terlalu disederhanakan, cara itu memberi alat untuk menggambarkan proses yang paling penting-penting yang perlu diketahui oleh seorang hidrologawan. Secara bagan, daur itu terlukis pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Daur hidrologi

Air di lautan menguap sebagai akibat penyinaran surya, dan awan uap air bergerak melewati daratan. Pencurahan terjadi sebagai salju, butiran es, dan hujan di atas daratan, dan air pun mulai mengalir kembali ke laut. Salju dan es

di daratan adalah air dalam simpanan sementara. Hujan yang tercurah di permukaan daratan mungkin *tercegat* oleh tetumbuhan dan menguap kembali ke udara. Ada sedikit yang *meresap* ke dalam tanah dan bergerak ke bawah atau *menelus* masuk ke dalam jalur tanah di bawah yang jenuh, di bawah muka airtanah atau muka freaktik. Air dalam jalur ini mengalir perlahan-lahan melalui akuifer atau lapisan pembawa air ke alur sungai atau kadang-kadang langsung ke laut. Air yang meresap juga memberi makan kepada kehidupan tumbuhan yang di permukaan dan ada pula air yang tersedot ke atas ke tetumbuhan itu, dan di sanalah berlangsung *pemeluhuan* dari permukaan tumbuhan yang berdaun.

Air yang tertinggal di permukaan ada sebagian yang menguap kembali menjadi uap, tetapi bagian terbesar bergabung ke dalam anak air dan melimpas sebagai larian atau limpasan permukaan ke alur sungai. Permukaan sungai dan danau pun menguap, dan makin banyak lagi yang dipindahkan dari sini. Akhirnya, air yang tersisa yang tidak meresap atau menguap tiba kembali di laut lewat alur sungai. *Airtanah*, bergerak lebih perlahan-lahan, mungkin muncul kembali ke dalam alur air atau sungai di dekat garis pantai dan merembas ke dalam laut, dan seluruh daur pun berulang lagi.

1.3 Kekayaan air pada bumi

Membicarakan kekayaan air di bumi juga untuk memperoleh gambaran yang jelas mengenai ukuran kejadian yang sedang kita bicarakan ini. Tabel 1.1 menyenerakan taksiran banyaknya air yang terlibat dalam daur hidrologi dan perbandingan (dalam persen) dari jumlah air seluruhnya di bumi yang terlibat pada sebagian daripadanya.

Tabel 1.1 Taksiran kekayaan air pada bumi

Tempat	Volum (10^3 km^3)	Persenan jumlah air
Danau air tawar	125	0,62
Sungai	1,2	0,008
Kelengesan tanah	65	0,001
Airtanah	8250	2,1
Danau air asin dan laut pedalaman	105	97,25
Atmosfer	13	
Tudung es kutub, gletser dan salju	29200	
Lautan	1320000	
Jumlah	1360000 atau $1,36 \times 10^{18} \text{ m}^3$	100,0

Dari 0,6 persen jumlah air yang tersedia sebagai air tawar, separuhnya ada di bawah kedalaman 800 m. sehingga boleh dikata tidak tersedia di permukaan. Ini berarti, bahwa cadangan air tawar bumi yang dengan salah satu cara dapat diperoleh untuk digunakan manusia ada sebanyak kira-kira $4 \times 10^6 \text{ km}^3$ dan terutama terdapat dalam tanah. Dihamparkan di permukaan bumi, itu berarti tebalnya sekitar 30 m.

Keempat proses yang terutama dihadapi para hidrologiwan adalah pencurahan, penguapan dan pemeluhan, pelimpasan di permukaan atau pengaliran oleh sungai, dan pengaliran airtanah. Mereka harus mampu menafsirkan data mengenai semua proses itu dan memprakirakan dari penelitiannya jumlah air yang paling mungkin dalam peristiwa banjir dan kekeringan yang paling hebat. Mereka pun harus mampu menyatakan pendapat mengenai kekerapan yang mungkin terjadi tentang berlangsungnya peristiwa yang demikian itu; karena sesungguhnya banyak periptaan teknik air (teknik hidraulik) didasarkan atas kekerapan beberapa nilai sepanjang tertentu.

1.4 Hidrologi sebagaimana diterapkan dalam rekayasa

Bagi seorang rekayawan yang terlibat dalam pencarian perencanaan dan pendirian bangunan air, hidrologi merupakan alat yang sangat diperlukan. Andaikan, misalkan, bahwa ada kota yang hendak menambah atau memperbaiki persediaan airnya. Rekayawan itu mula-mula mencari sumber air apa saja yang ada; jika ia barangkali telah menemukan sebuah DAS di pegunungan yang jelas tak berpenghuni, ia harus membuat taksiran mengenai kemampuannya untuk dapat menyediakan air. Berapa banyakkah hujan yang jatuh di dalamnya? Berapa lamakah musim keringnya dan berapa besarkah simpanan yang akan diperlukan untuk meratakan pengaliran? Berapa banyakkah limpasan yang akan hilang dalam penguapan dan pemeluhan? Apakah pembangunan di permukaan tanah akan lebih baik daripada penyadapan aliran airtanah lewat sumur di dekat kota?

Deretan pertanyaan itu tidak berhenti di sini. Jika akan dibangun sebuah bendungan, berapa besarkah kemampuan yang harus dimiliki pelimpahnya? Berapakah garis tengah pipa yang akan menyalurkan air? Apakah menghutankan daerah tadah dapat menguntungkan atau tidak bagi projek?

Bagi semua pertanyaan itu, dan pertanyaan lainnya yang mungkin timbul, para hidrologiwan dapat memberi jawabannya. Sering jawaban itu tangguh, tetapi sering pula nilai yang diberikan bersifat peluang, dengan simpangan yang mungkin pada rentang waktu tertentu. Ini disebabkan karena hidrologi bukan suatu ilmu yang pasti. Seorang pemborong dapat saja membangun bendungan

pelengcong pada sebuah sungai dan pihak hidrologiwan mungkin memberitahu kepadanya, bahwa dengan tinggi tertentu, bendungan itu akan tersundul hanya sekali, reratanya, dalam 100 tahun. Jika bangunan itu bersifat sementara bagi waktu layan yang barangkali hanya 2 tahun, pemborong itu mungkin mengambil putusan bahwa ini risiko yang wajar. Tetapi, *itulah* risiko. Salah satu dari 2 tahun itu bisa saja merupakan tahun datangnya banjir 100 tahunan tadi, dan sampai sekarang ilmu hidrologi belum dapat meramalkan hal itu.

Dalam bidang rekayasa yang lebih luas, yang sangat penting dan kian penting, orang dapat saja mempertimbangkan pengembangan sumberdaya air di seluruh daerah aliran sungai atau wilayah. Dalam hal seperti itu, bukan main pentingnya peranan hidrologiwan. Di situ lah pandangan dan pengalamannya mempunyai bobot yang menentukan, tidak hanya dalam bangunan teknik yang bertautan dengan penyediaan air, tetapi juga pada jenis dan luasnya pertanian yang akan dilaksanakan, pada penentuan tapak untuk industri, pada ukuran banyaknya penduduk yang akan ditopang, dalam pelayaran pedalaman, pada pengembangan pelabuhan, dan dalam melestarikan kenyamanan.

Kebudayaan terutama bergantung pada penyediaan air. Sejalan dengan arah kecenderungan yang terus menuju ke kota yang lebih besar dan pertambahan industri, peranan para hidrologiwan pun makin menjadi penting, dalam memenuhi kebutuhan penduduk yang makin banyak akan air untuk minum, pengairan, industri, dan pembangkitan tenaga listrik.

2.1 Cuaca dan iklim

Hidrologi suatu wilayah pertama-tama bergantung pada iklimnya, dan kedua pada rupabumi atau topografi dan geologinya. Iklim sebagian besar bergantung pada kedudukan geografi (letak keruangan) suatu tempat di permukaan bumi. Faktor iklim yang penting-penting ialah curahan dan cara munculannya, kebasahannya, suhu dan angin; semua itu secara langsung mempengaruhi penguapan dan pemeluhan.

Rupabumi penting dalam pengaruhnya pada pencurahan dan adanya danau, tanah rawa dan tingkat limpasan yang tinggi atau rendah. Geologi penting karena mempengaruhi rupabumi dan karena batuan yang mengalasi suatu daerah adalah jalur airtanah tempat air yang telah meresap bergerak perlahan-lahan melewati lapisan pembawa air ke sungai dan laut.

Pola peredaran dalam atmosfer, rumit. Andaikata saja bumi sebuah bola seragam yang pegun, pada bagiannya yang terdekat dengan matahari terdapat peredaran atmosfer yang sederhana. Di katulistiwa, udara yang telah dipanasi naik, dan pada ketinggian besar, bergerak ke utara dan ke selatan, sedangkan udara yang lebih dingin bergerak masuk melewati permukaan untuk mengantinya. Udara panas di ketinggian itu akan mendingin dan merendah pada waktu menjauh dari katulistiwa, sampai permukaan bumi tercapai lagi ketika gerakan itu tiba kembali di katulistiwa. Sisi bumi yang paling jauh dari matahari kiranya akan seragam menjadi gelap dan dingin.

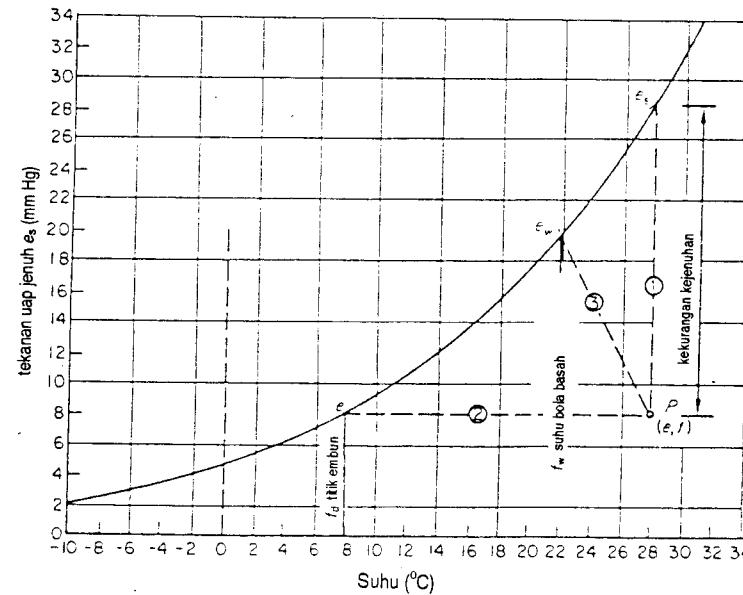
Pola yang sederhana itu terkacau oleh perputaran harian bumi pada sumbunya yang menyebabkan pemanasan dan pendinginan berganti-ganti setiap 12 jam dan menghasilkan pula gaya Coriolis yang bekerja pada aliran udara yang bergerak menuju atau menjauhi katulistiwa. Udara itu juga terkacau lebih lanjut bergerak menuju atau menjauhi sumbu bumi terhadap bidang putarnya mengitari matahari, karena terungkitnya sumbu bumi terhadap bidang putarnya mengitari matahari,

yang menyebabkan timbulnya perbedaan musim. Pengaruh lebih lanjut disebabkan oleh perbedaan daya pantul dan bahang jenis permukaan darat dan air. Akibat keadaan itu pada cuaca membuatnya secara umum menjadi rumit dan sulit untuk memprakirakannya pada jangka pendek. Tetapi dengan mengamati data yang meliputi suatu masa tertentu, dengan dasar statistika orang dapat membuat ramalan jangka panjang.

Penelitian hidrologi mengharuskan pengumpulan data di antaranya mengenai kelembapan, suhu, curahan, sinaran dan kecepatan angin. Semua faktor yang penting-penting itu dibahas dalam bab ini.

2.2 Kelembapan

Udara dengan mudah menyerap kelengasan dalam bentuk uap air. Banyaknya bergantung pada suhu udara dan suhu air. Makin tinggi suhu udara, makin banyak uap air yang dapat dikandungnya. Uap air memberikan *tekanan panggu* yang biasanya diukur dalam *bar* ($1 \text{ bar} = 100 \text{ kN/m}^2$; $1 \text{ milibar} = 10^2 \text{ N/m}^2$) atau tinggi milimeter turus raksa (Hg) ($1 \text{ mm Hg} = 1,33 \text{ mbar}$).



Gambar 2.1 Tekanan uap jenuh air di udara

Tabel 2.1 Tekanan uap jenuh sebagai fungsi suhu t
(nilai t negatif menunjuk kepada keadaan di atas es; 1 mm Hg = 1,33 mbar)

t (°C)	e_s (mm Hg)									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-10	2,15									
-9	2,32	2,30	2,29	2,27	2,26	2,24	2,22	2,21	2,19	2,17
-8	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,41	2,40	2,38	2,36	2,34
-7	2,71	2,69	2,67	2,65	2,63	2,61	2,59	2,57	2,55	2,53
-6	2,93	2,91	2,89	2,86	2,84	2,82	2,80	2,77	2,75	2,73
-5	3,16	3,14	3,11	3,09	3,06	3,04	3,01	2,99	2,97	2,95
-4	3,41	3,39	3,37	3,34	3,32	3,29	3,27	3,24	3,22	3,18
-3	3,67	3,64	3,62	3,59	3,57	3,54	3,52	3,49	3,46	3,44
-2	3,97	3,94	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70
-1	4,26	4,23	4,20	4,17	4,14	4,11	4,08	4,05	4,03	4,00
-0	4,58	4,55	4,52	4,49	4,46	4,43	4,40	4,36	4,33	4,29
0	4,58	4,62	4,65	4,69	4,71	4,75	4,78	4,82	4,86	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,11	5,14	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,40	5,44	5,48	5,53	5,57	5,60	5,64
3	5,68	5,72	5,76	5,80	5,84	5,89	5,93	5,97	6,01	6,06
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,31	6,36	6,40	6,45	6,49
5	6,54	6,58	6,54	6,68	6,72	6,77	6,82	6,86	6,91	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,20	7,25	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,51	7,56	7,61	7,67	7,72	7,77	7,82	7,88	7,93	7,98
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,26	8,32	8,37	8,43	8,48	8,54
9	8,61	8,67	8,73	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,14
10	9,20	9,26	9,33	9,39	9,46	9,52	9,58	9,65	9,71	9,77
11	9,84	9,90	9,97	10,03	10,10	10,17	10,24	10,31	10,38	10,45
12	10,52	10,58	10,66	10,72	10,79	10,86	10,93	11,00	11,08	11,15
13	11,23	11,30	11,38	11,75	11,53	11,60	11,68	11,76	11,83	11,91
14	11,98	12,06	12,14	12,22	12,96	12,38	12,46	12,54	12,62	12,70
15	12,78	12,86	12,95	13,03	13,11	13,20	13,28	13,37	13,45	13,54
16	13,63	13,71	13,80	13,90	13,99	14,08	14,17	14,26	14,35	14,44
17	14,53	14,62	14,71	14,80	14,90	14,99	15,09	15,17	15,27	15,38
18	15,46	15,56	15,66	15,76	15,96	15,96	16,06	16,16	16,26	16,36
19	16,46	16,57	16,68	16,79	16,90	17,00	17,10	17,21	17,32	17,43
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,20	18,31	18,43	18,54
21	18,65	18,77	18,88	19,00	19,11	19,23	19,35	19,46	19,58	19,70
22	19,82	19,94	20,06	20,19	20,31	20,43	20,58	20,69	20,80	20,93
23	21,05	21,19	21,32	21,45	21,58	21,71	21,84	21,97	22,10	22,23
24	22,27	22,50	22,63	22,76	22,91	23,05	23,19	23,31	23,45	23,60
25	23,75	23,90	24,03	24,20	24,35	24,49	24,64	24,79	24,94	25,08
26	25,31	25,45	25,60	25,74	25,89	26,03	26,18	26,32	26,46	26,60
27	26,74	26,90	27,05	27,21	27,37	27,53	27,69	27,85	28,00	28,16
28	28,32	28,49	28,66	28,83	29,00	29,17	29,34	29,51	29,68	29,85
29	30,03	30,20	30,38	30,56	30,74	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64
30	31,82	32,00	32,19	32,38	32,57	32,76	32,95	33,14	33,33	33,52

Andaikan suatu permukaan air yang menguap, terdapat dalam sistem tertutup dan terselubung dalam udara. Jika terdapat sumber energi bahang untuk sistem itu, penguapan air tadi ke udara akan berlangsung hingga tercapai tahana keseimbangan, bila udara itu telah menjadi jenuh dengan uap dan tidak lagi dapat menyerap. Maka molekul air pun akan memberi tekanan yang dikenal sebagai *tekanan uap jenuh*, atau e_s , untuk suhu tertentu sistem tersebut.

Nilai e_s berubah-ubah dengan suhu sebagaimana dinyatakan dalam tabel 2.1. Semua nilai itu juga dirajah sebagai suatu lengkung atau kurva yang menghubungkan e_s dan suhu (C) pada gambar 2.1. Dengan melihat kepada gambar 2.1, pertimbangkan apa yang dapat terjadi kepada suatu massa udara atmosfer P yang suhunya tetap, maka kedudukan P akan bergeser menegak garis putus-putus ① hingga udaranya menjadi jenuh. Tekanan uap yang bersesuaian P itu pada kedudukan barunya akan menjadi e_s . Pertambahan ($e_s - e$) disebut *kekurangan kejenuhan*.

Sebagai jalan lain, andaikata saja tidak ada perubahan dalam kelembapan udara ketika didinginkan, maka P kiranya akan bergerak mendatar ke kiri sepanjang garis 2 sehingga garis kejenuhan terpotong lagi. Pada titik ini P akan menjadi jenuh, pada suhu baru t_d , *titik embun*. Pendinginan udara melewati titik itu akan menghasilkan penguapan atau pembentukan kabut.

Jika air dibolehkan menguap bebas dalam masa udara, maka tidak satu pun di antara kedua kemungkinan di atas akan terjadi. Hal ini disebabkan oleh penguapan yang memerlukan bahang, yang diambil dari udara itu sendiri. Bahang ini yang disebut *bahang penguapan terpendam (laten)*, h_r , yang dinyatakan dalam persamaan

$$h_r = 606,5 - 0,095t \text{ kal/g}$$

Demikianlah, dengan naiknya kelembapan dan tekanan udara, maka menurunlah suhu udara dan titik P bergerak sudut menyudut sepanjang garis ③ sehingga tekanan udara jenuh tercapai pada titik yang ditentukan oleh e_w dan t_w . Suhu t_w ini disebut *suhu bola-basah* dan merupakan suhu yang dapat mendinginkan udara semula dengan menguapkan air ke dalamnya. Inilah suhu yang ditemukan pada termometer bola-basah.

Kelembapan nisbinya sekarang dapat dinyatakan sebagai

$$h = e/e_s, \text{ atau sebagai persen, } h = 100 e/e_s \text{ persen}$$

dan merupakan ukuran kemampuan udara menyerap kelengesan lebih lanjut, pada suhu itu. Hal itu diukur dengan meniupkan udara melewati dua termometer, yang sebuah dibalut dengan kain basah dan sebuah lagi kering. Aliran udara yang melewati bola itu mempunyai pengaruh pada pembacaan bola yang basah tadi dan kedua termometer tersebut dapat diputar pada sebuah benang atau yang lebih cocok, arus udara itu ditimbulkan dengan kipas angin yang dapat berputar. Dalam hal ini alat tersebut dinamai *psikrometer*.

Nilai e untuk suhu udara t dapat diperoleh dengan persamaan:

$$(e_w - e) = \gamma (t - t_w)$$

dalam hal ini

t_w = suhu bola-basah

t = suhu bola-kering

e_w = tekanan panggu yang bersesuaian untuk t_w (dari tabel 2.1)

γ = tetapan psikrometer (dengan mengandalkan laju udara yang melewati bola itu melebihi 3 m/det dan t diukur dalam °C, maka:
untuk e dalam milibar, $\gamma = 0,660$
untuk e dalam mm Hg, $\gamma = 0,485$)

2.3 Suhu

Suhu udara dicatat dengan termometer yang ditempatkan dalam semacam kotak yang terbuka. Perlindungan terhadap pencurahan dan peninjoran langsung matahari perlu diadakan.

Banyak pengamatan dilakukan dengan *menggunakan termometer maksimum dan minimum*. Semua itu merekam, dengan bantuan penunjuk, suhu maksimum dan minimum yang dialami setelah alat itu dipasang.

Keragaman suhu harian berkisar dari suatu minimum di sekitar matahari terbit hingga suatu maksimum dari $\frac{1}{2}$ hingga 3 jam setelah matahari mencapai puncaknya. Setelah itu terjadi penurunan yang terus-menerus melewati malam hari hingga fajar lagi. Maka dari itu, pengamatan terhadap maksimum dan minimum yang terbaik ialah dalam waktu antara pukul 8 dan 9 pagi, setelah minimum itu terjadi.

Suhu harian rataan adalah rerata yang diperoleh dari maksimum dan minimum itu dan biasanya dalam jangka sederajat rerata sebenarnya, sebagaimana direkam secara terus-menerus.

Umumnya, suhu diukur dengan derajat Celcius. Di negara lain, derajat Fahrenheit juga digunakan.

Kelandaian suhu menegak Tingkat perubahan suhu udara di atmosfer dengan ketinggian disebut tingkat *rosotan*. Nilai rataanya 6,5°C setiap 1000 m kenaikan ketinggian. Angka itu dapat beragam, terutama di dekat permukaan bumi, yang dapat sangat panas di siang hari dan memberi angka rerata yang lebih tinggi, dan mendingin pada waktu malam hari, dan memberi rerata yang lebih rendah. Pendinginan bumi, karena peninjoran ke luar, pada malam yang cerah dapat demikian besarnya sehingga terjadi *pembalikan suhu*, dengan udara yang lebih hangat terdapat di atas lapisan yang menutup permukaan bumi.

Dengan naiknya ketinggian, tekanan barometer pun turun sehingga satuan massa udara menempati volum yang lebih besar dengan makin naiknya ketinggian. Perubahan suhu akibat pengurangan tekanan adalah sekitar 10°C setiap 1000 m jika udaranya kering. Ini tingkat rosotan *adiabat-kering*. Jika udaranya lengas, dan udara itu naik, mengembang dan mendingin, maka uap airnya pun mengembun. Karena hal itu, terlepaslah bahang-terpendam pengembunan, yang menghalangi pendinginan masa air secepat udara kering. Maka dari itu, tingkat rosotan *jenuh-adiabat* yang berhasil menjadi lebih rendah, sekitar 5–6°C setiap 1000m pada ketinggian yang lebih rendah.

Sebaran suhu Umumnya, makin dekat letak suatu tempat dengan katulistiwa, makin panaslah tempat itu. Pengaruh bahang jenis yang berbeda-beda pada bumi dan air, pola arus samudera dan atmosfer, musim pada tahun, rupabumi, tetumbuhan dan ketinggian, semuanya cenderung menimbulkan keragaman pada aturan ini, dan semua perlu dipertimbangkan.

2.4 Peninjoran

Kebanyakan setasiun pengamatan meteorologi diperlengkapi dengan *radiometer* untuk mengukur baik sinaran gelombang-pendek yang masuk dari matahari dan langit, maupun sinaran bersih, yang berupa jumlah aljabar semua sinaran yang masuk dan sinaran gelombang-pendek dan gelombang-panjang yang terpantul dari permukaan bumi. Sinaran bersih itu sangat penting dalam penelitian mengenai penguapan, sebagaimana akan dilihat dalam bab 3.

2.5 Angin

Kecepatan dan arah angin masing-masing diukur dengan *anemometer* dan penunjuk arah angin. Anemometer yang lazim adalah *anemometer cawan*, yang terbentuk dari lingkaran kecil sebanyak tiga (kadang-kadang empat) cawan yang

berputar mengitari sumbu tegak. Kecepatan putaran mengukur kecepatan angin dan jumlah seluruh perputaran mengitari sumbu itu memberi ukuran berapa *jangkau angin*, jarak tempuh kantung tertentu udara dalam waktu yang ditetapkan.

Sebagai akibat gesekan permukaan tanah atau air yang dilewati angin meniup, pentinglah untuk menyatakan dalam sebarang pengamatan angin, ketinggian di atas tanah pengamatan itu dilakukan. Hubungan empiris antara kecepatan angin dan ketinggian yang digunakan umum ialah

$$u/u_0 = (z/z_0)^{0,15}$$

dalam hal ini

u_0 = kecepatan angin pada anemometer pada ketinggian z_0

u = kecepatan angin pada aras yang lebih tinggi z .

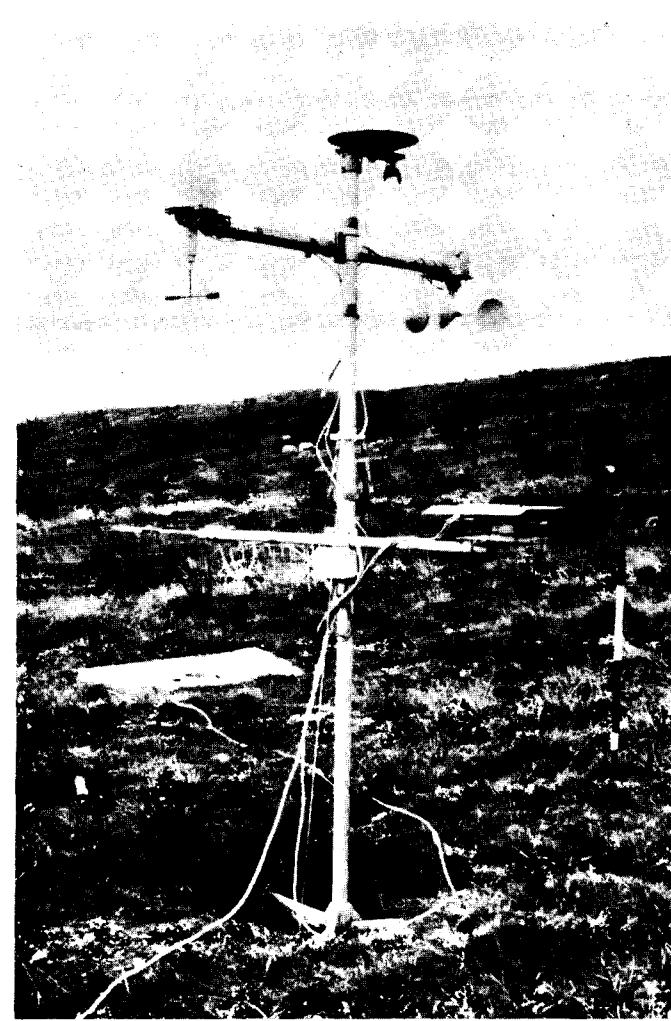
Pada tahun akhir-akhir ini ada sedikit usaha untuk membakukan ketinggian pengamatan dan di Eropa kecepatan angin biasanya diamati pada ketinggian 2 m di atas permukaan tanah.

Gambar 2.2 memperlihatkan perangkat alat untuk melakukan pengamatan meteorologi pada selang waktu pendek dan teratur. Peralatan yang merekam otomatis pada pita magnet mencakup radiometer sinaran-bersih, termometer bola basah dan kering, penunjuk arah angin, anemometer dan radiometer surya sinar-datang di puncak tiang.

2.6 Pencurahan

Sumber hampir semua curahan hujan adalah lautan. Penguapan berlangsung dari lautan dan uap air terserap dalam arus udara yang bergerak melewati permukaan laut. Udara yang bermuatan kelengasan tetap terus menyerap uap air itu hingga ia mendingin sampai di bawah suhu titik embun pada waktu uap itu tercurah sebagai hujan, atau jika suhu itu cukup rendah, sebagai butir es atau salju.

Penyebab turunnya suhu massa udara mungkin karena proses golakgalik, udara yang panas dan lengas membubung untuk membentuk awan dan setelah itu mencurahkan hujan. Ini disebut *curahan golakgalik*. Ini dicontohkan oleh badai guntur sore hari yang berkembang dari pemanasan udara lengas sepanjang hari, yang membubung menjadi awan tinggi berbentuk paron. Curahan ardi (orografi) terhasil dari arus udara lautan yang melewati daratan dan terlengongkan ke atas oleh pegunungan pantai, sehingga mendingin di bawah titik jenuh dan melimpahkan kelengasan. Sebagian hujan ardi tercurah di lereng yang mengarah



Gambar 2.2 Perangkat alat pengamatan meteorologi. Pada lengan bawah kiri, penyinaran bersih; kanan, termometer bola basah dan kering. Pada lengan atas kiri, arah angin; kanan, jangkau angin. Di puncak, penyinaran surya dan langit. Ada sukat hujan dengan tabir penolak tempias di kejauhan

ke angin. Rumpunan ketiga pencurahan hujan adalah *curahan pusar dan curahan perenggan*. Apabila terdapat daerah tekanan-rendah, udara cenderung masuk ke dalamnya dari daerah di sekelilingnya dan dengan itu memindahkan udara tekanan-rendah ke atas, mendingin dan mencurahkan hujan. Hujan perenggan berkaitan dengan perbatas masa udara, dengan masa yang satu lebih dingin ketimbang yang lainnya dan dengan demikian menjulurkan baji dingin ke bawahnya, membubungkan udara yang panas itu untuk membentuk awan dan hujan. Lereng baji perenggan itu dapat cukup datar, maka daerah hujan yang berkaitan dengan perenggan bisa sangat besar.

2.6.1 Merekam curahan Curahan terutama terjadi sebagai hujan, tetapi dapat pula berupa butiran es, *sleet*, salju, kabut atau embun. Negeri Inggris memiliki iklim yang basah, dan hujan memberi sebagian besar kelengasannya, tetapi di bagian lain dunia dapat saja seluruhnya salju, atau, di daerah kerontang, embun.

Di Inggris Raya, rekaman curah hujan diperoleh dan dicatat oleh Kantor Meteorologi dari sekitar 6500 sukat hujan yang tersebar di seluruh negara, sebagian besar memberi nilai hujan harian. Selain itu terdapat 260 buah setasiun yang diperlengkapi dengan sukat hujan yang mencatat sendiri secara terus-menerus.

Sukat hujan yang baku di Inggris terbuat dari tembaga dan terdiri dari silinder tembaga bergaris tengah 5 inci, dengan tepi atasnya yang dapat rusak. Alat itu mengumpulkan hujan dan memungkinkannya mengalir melewati corong dan masuk ke dalam wadah terbuat dari logam atau kaca yang dapat dipindah-pindah. Dari dalam wadah itu air hujan setiap hari dapat dituangkan ke dalam silinder ukur kaca bersenggat. Ada aturan yang ditentukan untuk sukat yang baku itu, demikian pula untuk pemasangan dan penggunaannya.

Sukat swarekam (yang dapat merekam sendiri) lazimnya bekerja karena mempunyai teromol yang digerakkan oleh gawai jam yang membawa alat tulis dengan penanya yang mencatat jumlah beban seluruh wadah dan air yang terkumpul, atau membuat sederet rekaman setiap kali sebuah wadah kecil dengan kapasitas yang diketahui melimpahkan isinya. Sukat jenis itu jauh lebih mahal dan lebih mudah membuat kesalahan tetapi barangkali satu-satunya yang cocok untuk tempat yang jauh letaknya dan jarang dikunjungi. Keuntungannya yang besar, alat itu merekam *kehebatan* curah hujan, faktor yang penting dalam banyak masalah. Karena itulah, beberapa setasiun diperlengkapi dengan kedua jenis sukat, yang baku dan yang swarekam.

Kantor Meteorologi baru-baru ini meripta sederet sukat hujan [1]. Sukat yang baru itu untuk mengukur curah hujan berupa sebuah penangkap lingkar seluas

150 mm² (garis tengah 5,5 inci), dipasang pada ketinggian bibir 300 mm di atas tanah. Sukat yang baru, yang lebih besar dan lebih cermat, luasnya 750 cm² (garis tengah 12,2 inci), juga dipasang pada ketinggian bibir 300 mm di atas tanah. Bahan yang digunakan untuk membuat itu kaca serat. Alat manguk limpah yang baru telah diripta dan tersedia dengan sistem telemetri untuk memungkinkan pembacaan jarak jauh dengan cara rekam-tanggap lewat telefon. Sukat itu tersedia dengan hubungan telefon dan nomor, yang dapat diputar sebagaimana lazimnya. Banyaknya hujan yang terkumpul sejak sukat disetel pada nol diteruskan dengan pertambahan 1 mm dengan tiga kelompok nada yang dapat didengar yang mewakili ratusan, puluhan, dan satuan. Rekam-tanggap itu dapat dibuat sesering diingini, jadi kehebatan hujan dapat diperoleh dengan pengurangan yang sederhana, dengan ketinggalan yang sekecil-kecilnya [2].

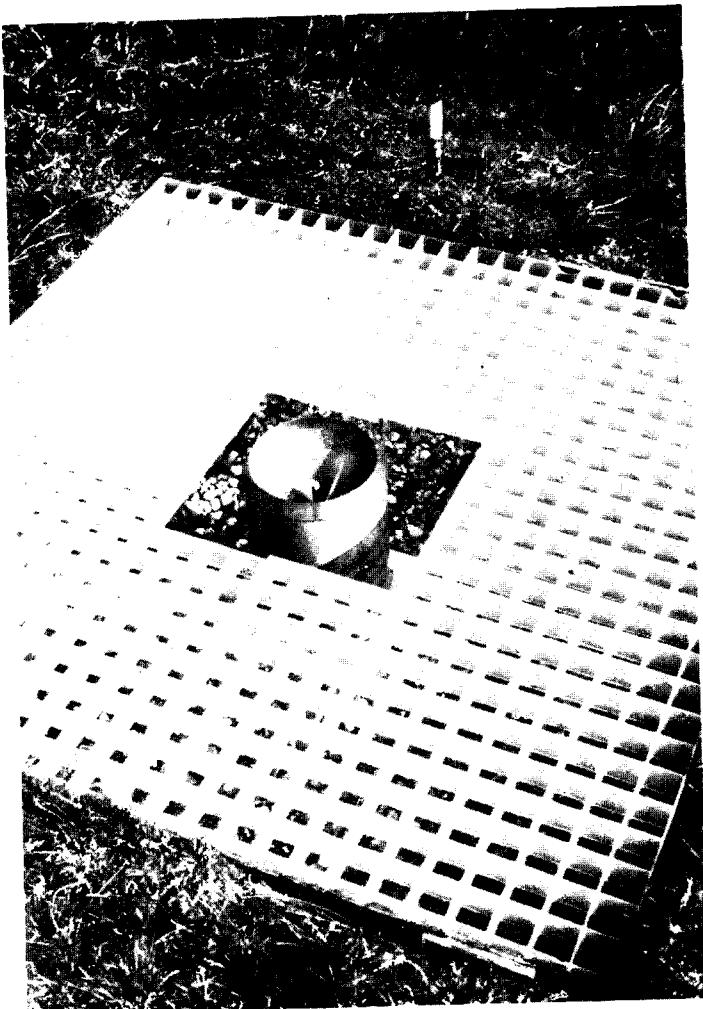
Dalam beberapa tahun terakhir ini orang telah membuat banyak penelitian mengenai pemajaman sukat hujan. Umumnya orang sekarang menganggap, bahwa hasil yang lebih cermat dapat diperoleh dengan perangkat sukat hujan yang bibirnya setinggi permukaan tanah, daripada dengan sukat yang bibirnya beberapa tinggi dari tanah [3]. Adalah perlu pada alat yang setinggi-tanah itu untuk dibuatkan lubang untuk menempatkan sukat dan menutupnya dengan kekisi penolak tempias. Maka dari itu, sukat setinggi tanah lebih mahal memasang dan memeliharanya.

Sebuah alat yang khas dapat dilihat dalam gambar 2.3.

Rekaman tahunan untuk seluruh negara, dianalisis secara statistika dan disajikan dengan gambar, diterbitkan setiap tahun oleh Kantor Meteorologi dalam buku kecil berjudul *British rainfall (Curah hujan Inggris)*, disusul dengan tahun angka tahun tertentu yang bersangkutan. Penggunaan data curah hujan dibicarakan dalam pasal 2.8.

2.6.2 Jejaring sukat hujan Pertanyaan yang sering timbul menyangkut jumlah dan jenis sukat hujan yang diperlukan untuk menjamin taksiran yang cermat mengenai curahan hujan di suatu daerah tadah. Bleasdale [4] menukil tabel 2.2 dan 2.3 sebagai pedoman umum dan memberi pandangannya sbb.:

Beda antara kedua tabel itu tidaklah besar seperti yang mungkin timbul pada pandangan pertama. Yang pertama menunjukkan kerapatan yang tercapai di daerah yang berwaduk dan yang mungkin banyak terlampaui dalam daerah percobaan yang kecil-kecil. Yang kedua menunjukkan kerapatan yang lebih sesuai untuk jejaring yang meliputi seluruh negara. Dalam penerapan pedoman umum yang tertuang dalam tabel 2.3 haruslah dimengerti bahwa daerah aliran



Gambar 2.3 Sukat hujan swarekam terpasang dengan bibir pada permukaan tanah dengan tirai penolak tempias

sungai (DAS) besar yang mana pun hampir selalu saja di dalamnya ada sejumlah anak-DAS dan untuk itu jejaring yang nisbi rapat kiranya dapat dianjurkan. Selain itu, kerapatan minimum yang disarankan sering kiranya bertambah nyata di daerah yang bergunung, dan kiranya hanya diikuti tak jauh di belakangnya di daerah yang bertinggian rendah dan sedang tanpa rupabumi yang rumit.

Tabel 2.2 Jumlah minimum sukat hujan yang diperlukan di daerah rawa yang berwaduk^a

Daerah km ²	Sukat hujan		
	Harian	Bulanan	Jumlah
2	1	2	3
4	2	4	6
20	3	7	10
41	4	11	15
81	5	15	20
122	6	19	25
162	8	22	30

^a Sumber: Laporan Panitia Gabungan Kantor Meteorologi, Royal Meteorological Society, dan Institution of Water Engineers mengenai 'Penentuan curah hujan umum di atas sebarang daerah' (The determination of the general rainfall over any area), *Trans. Institution of Water Engineers*, 42 (1937) 231.

Tabel 2.3 Jumlah minimum sukat hujan untuk taksiran curah hujan persentasi rata-ratā bulanan [4]

Daerah km ²	Jumlah	
	(mil ²)	sukat hujan
26	10	2
260	100	6
1300	500	12
2600	1000	15
5200	2000	20
7800	3000	24

Ada banyak bahan yang berhubungan erat dengan masalah ripta jebarang hidrologi dan pembaca dipersilakan mengacu ke bahan bacaan lebih lanjut pada akhir bab ini.

2.7 Bentuk curahan selain hujan

Salju dan es Salju memiliki kemampuan untuk menambat air dan dengan demikian bertindak sebagai suatu bentuk simpanan. Kerapatan dan karena itu juga banyaknya air yang terkandung di dalamnya, berbeda-beda, dari jumlah sekecil 0,005 untuk salju yang baru jatuh hingga sebesar 0,6 pada salju tua yang sangat termampatkan. Karena kerapatan berbeda-beda dengan kedalaman, maka terokan haruslah diambil pada berbagai lapis pada onggokan salju sebelum tara air dapat dihitung. Untuk menerok biasanya digunakan tabung penerok.

Curahan salju dapat diukur dengan segera dengan sukat hujan yang lazim yang diperlengkapi dengan sistem pemanas, atau dengan tongkat salju yang sederhana jika tumpukan salju itu tidak berpindah-pindah, dan kerapatan ditentukan secara serempak.

Lintasan salju dibuat sebagai sigi lapangan sepanjang garis memotong daerah tadih, untuk menentukan ketebalan salju dan kerapatannya pada kedalaman yang setaranya air dapat dihitung untuk memprakirakan banjir.

Kabut Taksiran mengenai kelengasan yang mencapai tanah dari pembentukan kabut telah dibuat dengan memasang pengumpul kabut di atas sukat-hujan baku. Pengumpul itu terdiri dari silinder sukat-kawat yang padanya terbentuk tetesan kelengasan yang melimpas ke bawah ke dalam sukat hujan itu. Pembandingan kelengasan yang melimpas ke bawah ke dalam sukat hujan itu dengan rekaman sukat hujan baku di tempat yang sama menjukkan selisih yang merupakan ukuran curahan kabut. Untuk menafsirkan data yang demikian itu diperlukan pengalaman dan penggunaan faktor pengalihan, tetapi dapat menyebabkan perbedaan yang besar (dari tingkat 50 hingga 100 persen) pada curahan di daerah hutan.

Embun Pengumpul embun telah lama digunakan di Swedia dan Israel untuk mengukur curahan embun. Alat itu terbuat dari corong runjung dari baja, tersalut plastik, dan dengan bagian datar yang menganjur seluas lebih kurang 1 m^2 . Lopak embun di beberapa negeri terpakai sebagai sumber air. Bentuknya tidak lain berupa lekukan di tanah, yang dilapisi ubin keramik.

Embungan Meskipun kabut dan embun adalah hasil pengembunan, proses itu mengakibatkan pencurahan dari aliran udara lembap di atas bambangan es dan di daerah beriklim sedang karena pengembunan pada lapisan teratas tanah.

Curahan seperti tidak terjadi dalam jumlah yang banyak tetapi mungkin bisa mencukupi untuk mendukung kehidupan tanaman.

2.8 Peluasan dan penafsiran data

2.8.1 Batasan Jumlah hujan tahunan yang jatuh pada suatu titik adalah angka curahan dasar yang biasanya tersedia. Tetapi untuk banyak tujuan, hal itu tidak memadai dan mungkin diperlukan informasi, salah satu atau semua juluk di bawah ini.

- i *Kehebatan* Ini adalah ukuran banyaknya hujan yang jatuh dalam suatu waktu tertentu; misalnya, mm setiap jam.
- ii *Jujuh* Ini adalah lamanya waktu hujan tercurah.
- iii *Kekerapan* Ini mengacu kepada pengharapan bahwa suatu kedalaman curahan hujan tertentu akan jatuh dalam waktu tertentu. Jumlah seperti itu dapat disamai atau dilampaui dalam sejumlah hari atau tahun tertentu.
- iv *Luasan* Ini menyangkut luas daerah yang memungkinkan orang memberlakukan curah hujan titik.

2.8.2 Hubungan kehebatan-jujuh Makin besar kehebatan curah hujan, umumnya makin pendek pula kelanjutan waktunya. Rumus yang kiranya dapat menyatakan hubungan itu adalah dari jenis:

$$i = \frac{a}{t + b}$$

dalam hal ini i = kehebatan (mm/jam), t = waktu (jam), a dan b tetapan setempat, dan untuk jujuh yang lebih besar dari dua jam

$$i = \frac{c}{t^n}$$

dengan c dan n merupakan tetapan setempat.

Angka kehebatan dunia yang terekam adalah pada tingkat 40 mm dalam semenit, 200 mm dalam 20 menit dan 26 m dalam setahun. Informasi lebih rinci tertera pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Curah hujan titik terbesar di dunia yang terekam

Jujuh	Kedalaman (mm)	Tempat	Tahun
1 men	38	Guadeloupe	1970
8 men	126	Bayern	1920
20 men	206	Rumania	1889
42 men	305	Missouri, AS	1947
2 jam	45 men	Texas, AS	1935
12 jam	1340	Réunion, Sam.India	1964
24 jam	1870	Réunion	1952
2 hari	2500	Réunion	1952
4 hari	3721	Cherrapunji, India	1974
8 hari	4130	Réunion	1952
1 bulan	9300	Cherrapunji	1861
6 bulan	22454	Cherrapunji	1861
1 tahun	26461	Cherrapunji	1861

Paulhus [5] menyarankan bahwa, jika curah hujan dirajah melawan jujuh, dan kedua sekala itu bersifat logaritma, curah hujan dunia yang terekam terletak pada atau tepat di bawah garis lurus yang persamaannya adalah

$$R = 16,6 D^{0,475}$$

dengan R adalah curah hujan (inci) dan D adalah jujuh (jam), atau $R = 442 D^{0,475}$ dengan R dalam mm.

Agaknya angka tertinggi Inggris juga terletak di dekat garis lurus pada rajah yang serupa dengan nilai dekat ke seperempat nilai dunia.

Data Inggris disajikan dalam tabel 2.5 dan dirajah pada gambar 2.4. Curah hujan tertinggi yang terekam di Kepulauan Inggris dihampiri dekat dengan

$$R = 106D^{0,46}$$

dengan R curah hujan (mm) dan D jangka waktu (jam).

Tabel 2.5 Peristiwa curah hujan sepalang di Kepulauan Inggris^a

Jujuh	Kedalaman (mm)	Tempat	Tahun ^b
1 men	5,1	Croydon, London	1935
4 men	12,7	Ilkley, Yorkshire Barat	1906a
12 men	50,8	Wisbech, Cambridgeshire	1970b
20 men	63,5	Sidcup, Kent	1958
45 men	97,0	Orra Beg, Irlandia Utara	1980c
1 jam	110,2	Wheatley, Oxfordshire	1910
1 jam	154,7 ^c	Hewenden, Yorkshire	1956d
2 jam	140	Hampstead, London	1975
3 jam	178	Hornastle, Lincolnshire	1960e
8 jam	200	Bruton, Somerset	1917
24 jam	279	Martinstown, Dorset	1955
2 hari	300	Sloy, Strathclyde	1974f
4 hari	329	Sloy, Strathclyde	1974
12 hari	556	Honister Pass, Cumbria	1978
1 bulan	1436	Llyn Llydaw, Gwynedd	1909g
1 tahun	6528	Sprinkling Tarn, Cumbria	1954h

^a Sumber: S.D. Burt, Kantor Meterorologi, Bracknell, Inggris Raya.

^b Huruf mengacu kepada gambar 2.4.

^c Angka ini diragukan oleh sementara pakar.

2.8.3 Hubungan kehebatan-jujuh-kekerapan Dalam 1935, Bilham menerbitkan tulisannya yang sangat terkenal mengenai hubungan ini di Inggris Raya [6], yang mengandung grafik yang terlukis di sini sebagai gambar 2.5. Grafik itu menggunakan ungkapan subjektif ‘sangat jarang’, ‘menarik’ dan ‘patut dicatat’, dan bukan kekerapan pemunculannya. Tetapi, kekerapan itu dapat dihitung dari rumus

$$n = 1,25t(r + 0,1)^{0,282}$$

di sini

n = jumlah kejadian dalam 10 tahun

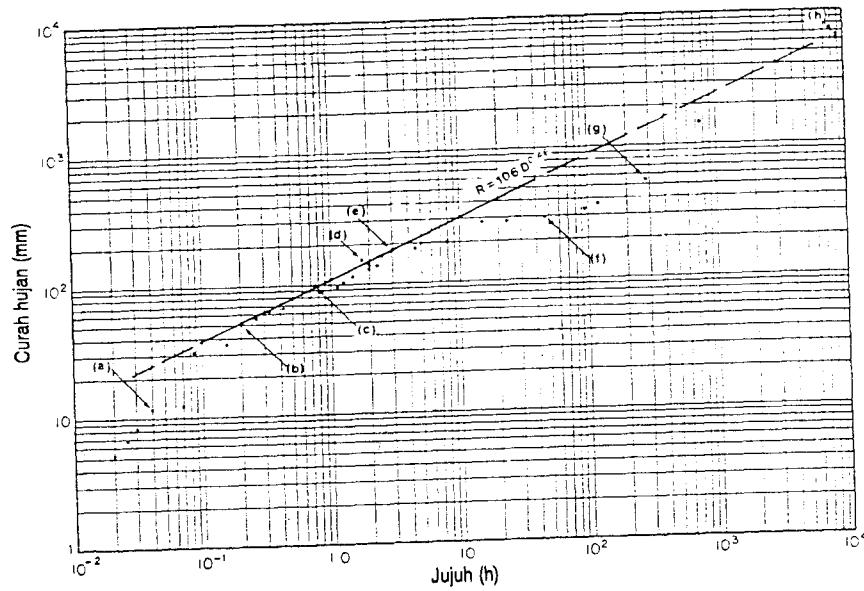
r = kedalaman hujan dalam inci

t = jujuh hujan dalam jam.

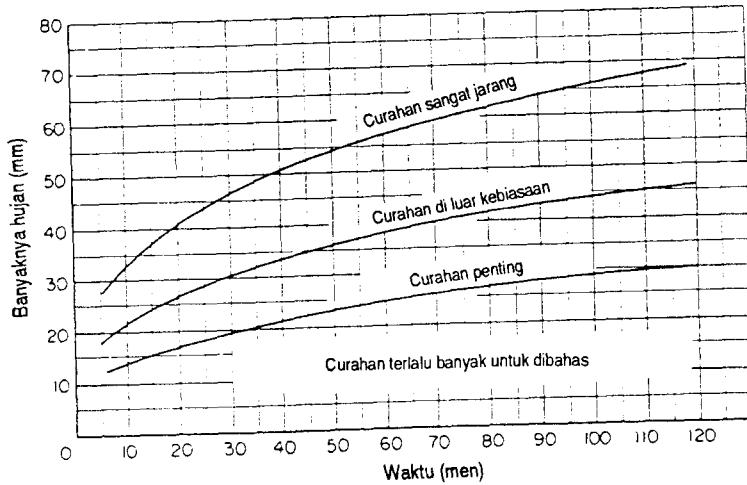
Bentuk SI rumus itu ialah

$$n = 0,5t(P + 2,54)^{0,282} \quad (2.1)$$

dengan P = kedalaman hujan dalam mm, dan n serta t memiliki satuan yang tak berubah-ubah.



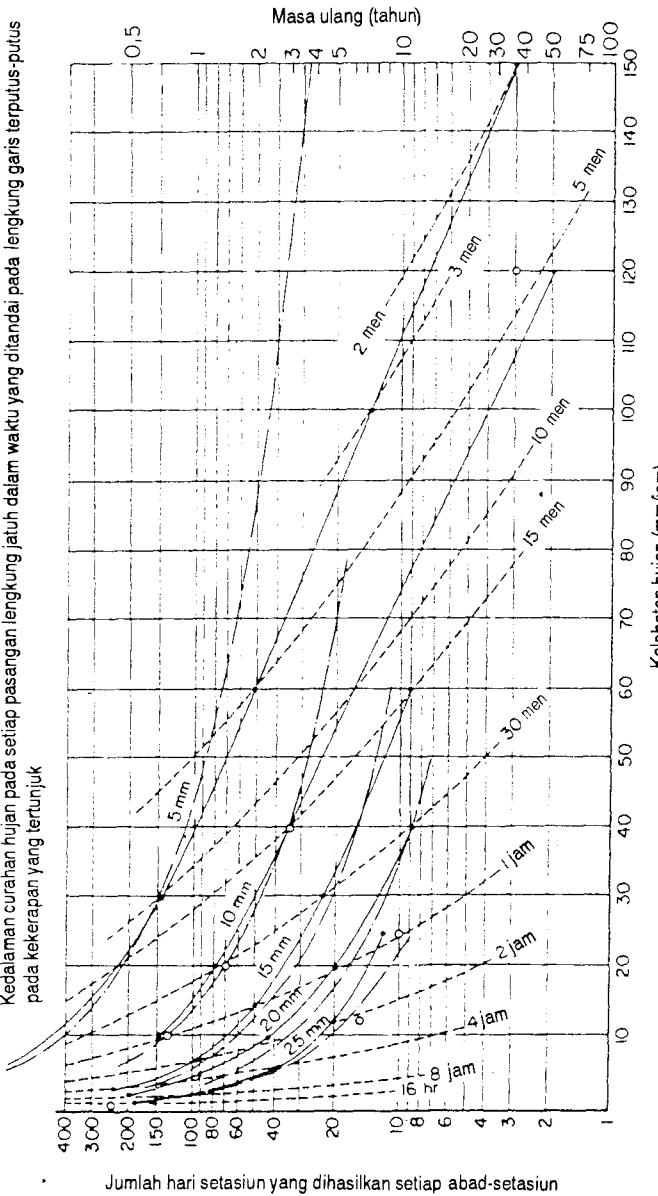
Gambar 2.4 Curah hujan titik terbesar yang terekam di Kepulauan Inggris



Gambar 2.5 Rumpunan curah hujan Billham

Dari hasil pengajukan selama 7 tahun (1956–1962), diperoleh dari 20 stasiun di Inggris
 o Dari hasil pengajukan selama 35 tahun (1926–1960), diperoleh dari kelompok sebanyak 10 buah stasiun
 - - - Dari rumus Billham yang semula.

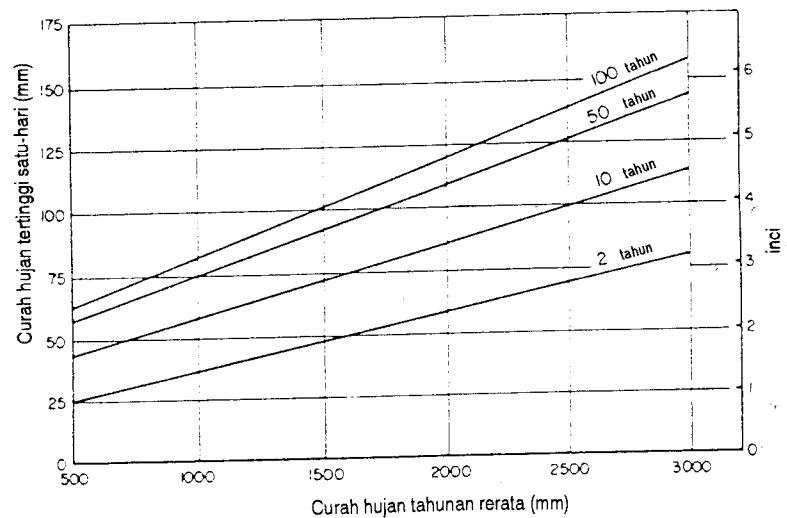
Kedalaman curahan hujan pada setiap pasangan lengkung jatuh dalam waktu yang ditandai pada lengkung garis terputus-putus pada kekerapan yang tertunjuk



Gambar 2.6 Grafik kekerapan-kelebatan hujan [8]. Contoh, curah hujan 20 mm yang jatuh dalam jangka waktu 30 menit dapat diharapkan di mana saja di Inggris, rata-ratanya sekali dalam 11,1 tahun atau 9 kali dalam seabad.

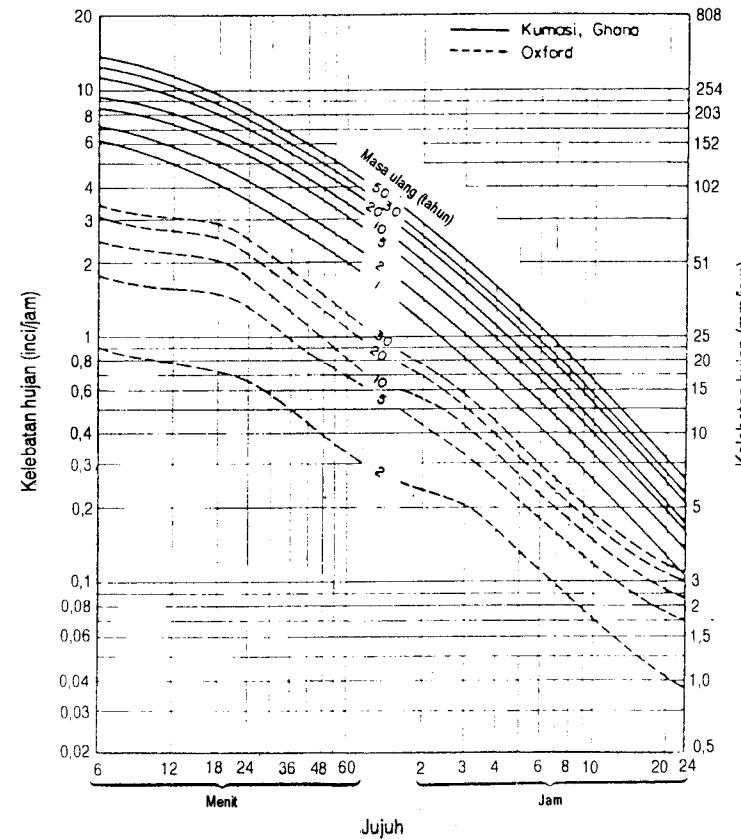
Karya Bilham dipindah dan diperluas oleh Holland [8] yang menunjukkan, bahwa Bilham terlalu berlebihan menaksir peluang curah hujan kehebatan-tinggi; yaitu, di atas 35 mm/jam. Karya itu dapat dilukis sebaik-baiknya dengan grafik dan gambar 2.6 memperlihatkan rumus Bilham (garis rantai-titik) dan rumus Holland (garis penuh). Gambar itu memberi masa ulang untuk kedalaman tertentu dan yang terjadi dalam jangka waktu tertentu, sebagaimana direratakan atas 14 setasiun-dasawarsa di Inggris.

Jalan lain untuk menggambarkan data yang demikian itu, kali ini berdasarkan nasabah (korelasi) antara curah hujan rerata tahunan di Inggris dan maksimum satu-hari kedalaman-hujan bagi berbagai masa ulang diperlihatkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hubungan antara curah hujan maksimum satu-hari untuk masa ulang tertentu dan curah hujan tahunan rerata di Kerajaan Inggris (menurut Lembaga Hidrologi)

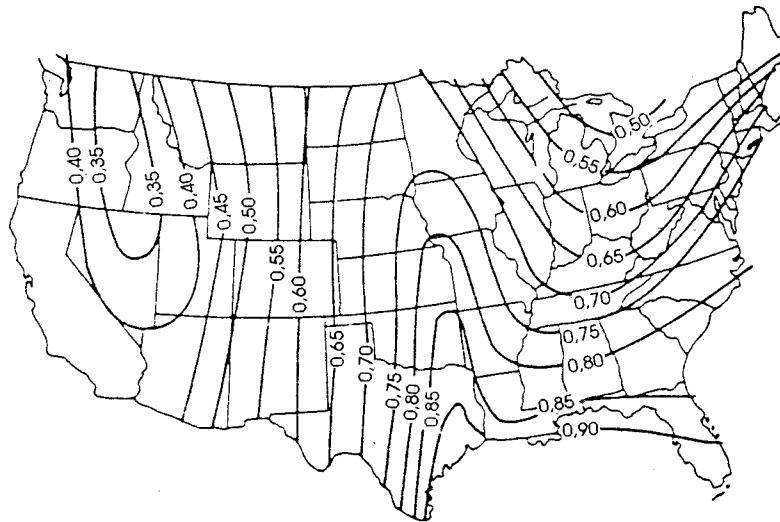
Bagi letak tertentu sering kita dapat membuat lengkung demikian rupa, sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.8 bagi Oxford, Inggris dan Kumai, Ghana. Perbedaan antara iklim pantai daerah sedang dan iklim tropika perlu dicatat.



Gambar 2.8 Hubungan curah hujan jujuh-kekerapan-kelebatan diambil di Kumasi, Ghana (atas kebaikan Jawatan Meteorologi Ghana) dan Oxford (atas kebaikan Institut of Hydrology)

Data tersebut dapat juga disajikan dalam bentuk peta suatu wilayah, dengan garis isohiet yang menunjukkan jumlah kedalaman curah hujan yang dapat diharapkan pada waktu t , pada kekerapannya sekali dalam N tahun. Publikasi Yarnall yang klasik [9] menunjukkan peta yang demikian itu bagi Amerika Serikat. Gambar 2.9 adalah sebuah yang khas, diambil dari tulisan Yarnall dan menunjukkan curah hujan lima-menit yang dapat diharapkan sekali dalam 50 tahun.

2.8.4 Hubungan kedalaman-luasan-waktu Pencurahan jarang terjadi seragam di atas suatu daerah. Keragaman dalam kehebatan dan jumlah kedalaman



Gambar 2.9 Curah hujan lima-menit, dalam inci, yang boleh diharapkan sekali dalam 50 tahun di Amerika Serikat [9]

curahan terjadi dari pusat ke tepi badai [10]. Bentuk keragaman itu terlukis pada gambar 2.10 yang menunjukkan untuk badai tertentu, perkiraan kedalaman rerata curahan menurun dari maksimumnya sejalan dengan bertambahnya luasan yang diperhatikan.

Tetapi bagi kita berguna jika hal itu dinyatakan dengan angka dan Holland [11] menunjukkan bahwa nisbah antara curah hujan titik dan luasan di atas daerah sampai 10 km^2 dan untuk badai yang berlangsung antara 2 dan 120 menit dinyatakan dengan

$$\frac{\bar{P}}{P} = 1 - \frac{0.3 \sqrt{A}}{t^*} \quad (2.2)$$

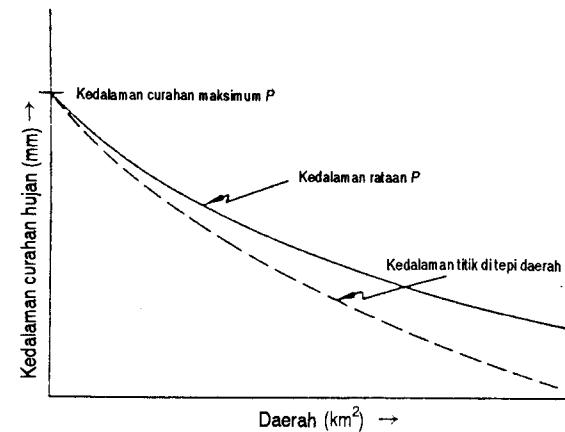
di sini

\bar{P} = kedalaman hujan rata-rata di atas luasan

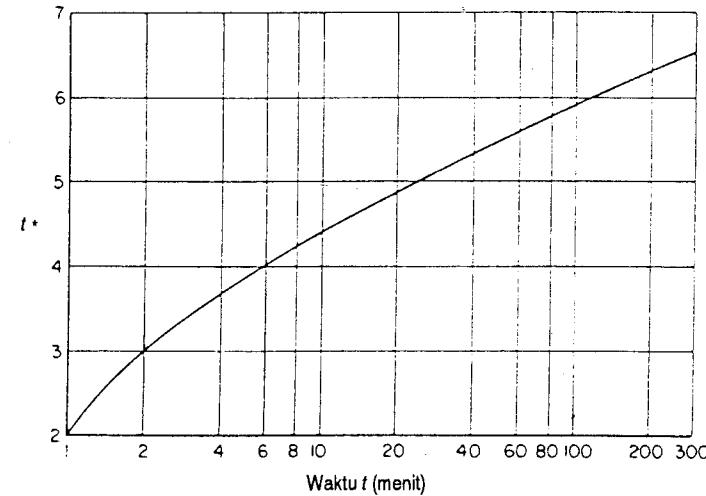
P = kedalaman hujan titik yang diukur di pusat luasan

A = luasan dalam km^2

t^* = fungsi ‘gama balik’ waktu badai yang diperoleh dari nasaban dalam gambar 2.11.



Gambar 2.10 Lengkung kedalaman-luasan curah hujan



Gambar 2.11 Nasaban antara badai t dan t^* [12]

Contoh 2.1 Berapakah kehebatan curah hujan rata-rata di Inggris di atas suatu daerah seluas 5 km^2 selama badai 60 menit dengan kekerapan sekali dalam 10 tahun?

Dari gambar 2.6 garis kekerapan sekali dalam 10 tahun memotong kedalaman 25 mm tepat pada sekitar 1 jam; maka $P = 25$ mm. Jika diberikan $t = 60$ menit, maka dari gambar 2.11, $t^* = 5,6$, jadi

$$\frac{\bar{P}}{P} = 1 - \frac{0,3\sqrt{5}}{5,6} = 1 - 0,12 = 0,88.$$

Maka

$$\bar{P} = 0,88P = 0,88 \times 25 = 22 \text{ mm dalam sejam}$$

Periksa dari angka Oxford: dari gambar 2.8 kekerapan 10 tahun untuk jujuh 60 menit menunjukkan 21 mm dalam sejam. Maka itu:

Maka

$$\bar{P} = 0,88P = 0,88 \times 21 = 18,5 \text{ mm dalam sejam}$$

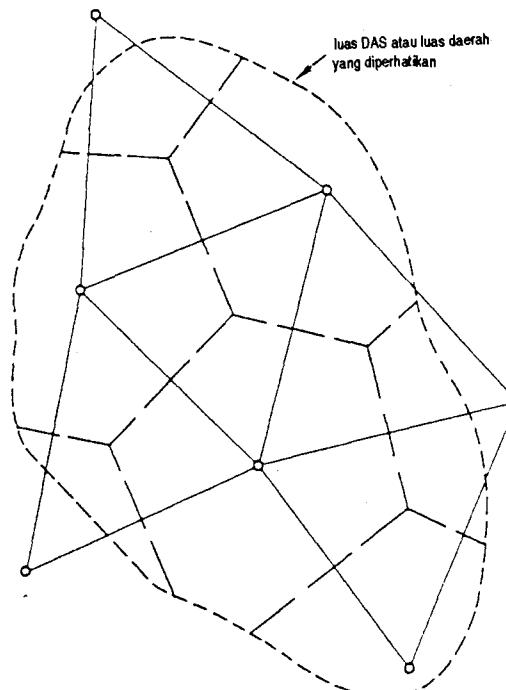
Berkurangnya kehebatan rerata ini dengan pertambahan luasan, atau *faktor susutan luasan* diperhitungkan dalam Jilid II Laporan Kajian Banjir [13] dan setelah itu [14], menggunakan data yang lebih banyak ketimbang yang tersedia pada Holland. Agar taatasas, catatan lebih lanjut mengenai itu ditempatkan dalam pasal 2.9, dalam pembahasan umum mengenai meteorologi, Lampiran Kajian Banjir.

2.8.5 Mereratakan kedalaman curahan di atas sebuah luasan Pada penggambaran jumlah menyeluruh curah hujan di atas daerah yang luas, terjadinya badi tertentu dan tagan (saham) kepada sukat tertentu tidaklah diketahui, dan merupakan hal yang perlu untuk mengubah banyak nilai titik untuk memberikan kedalaman curah hujan rerata di atas luasan tertentu. Jalan yang paling sederhana untuk melakukan ini ialah mengambil rataan hitung dari besar curahan yang diketahui untuk semua titik di luasan itu. Jika sebaran titik di atas luasan itu scragam dan keragaman dalam besar curahan setiap sukat tidak seberapa, maka cara ini memberi hasil yang lumayan baik.

Cara yang lain, menurut Thiessen [15], memberi batasan daerah pengaruh setiap stasiun dengan menggambar sejumlah garis di antara pasangan sukat yang ada, membagi dua semua garis itu dengan garis tegak lurus, dan menganggap bahwa semua daerah yang terlingkungi oleh perbatas yang terbentuk oleh garis tegak yang memotong itu memiliki curah hujan yang sama dengan sukat yang terkurung.

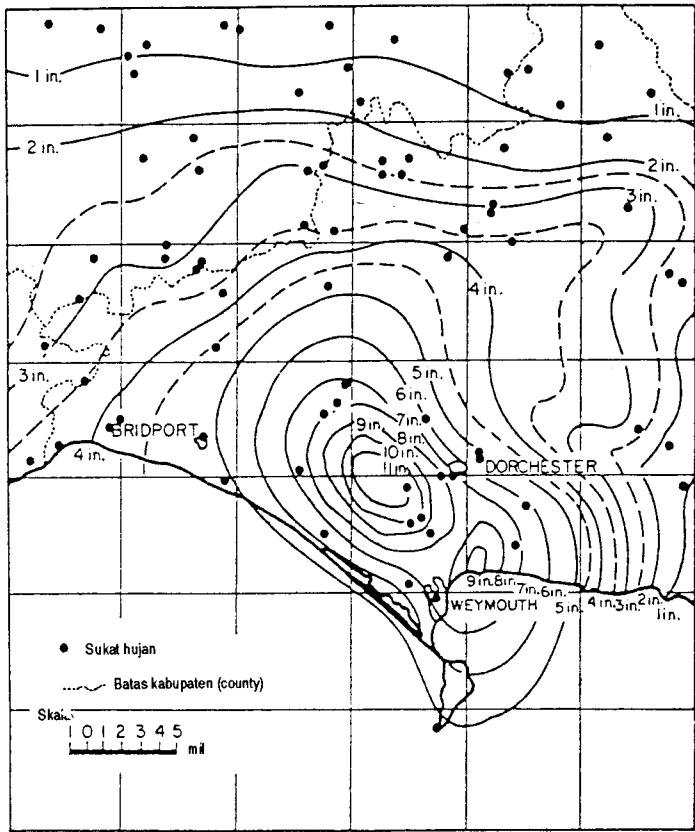
Ragam kiat ini ialah menggambar garis tegak lurus itu kepada garis yang menghubungkan sukat pada semua titik berketinggian tengahan, alih-alih pada setengah panjang. Analisis *ketinggian terpindah* ini terkadang dianggap

pendekatan yang lebih masuk akal, tetapi umumnya memberikan sedikit selisih dalam hasil. Kedua cara itu lebih cermat ketimbang rataan hitung yang sederhana tetapi menyita banyak kerja. Segibanyak (poligon) Thiessen tertera pada gambar 2.12.



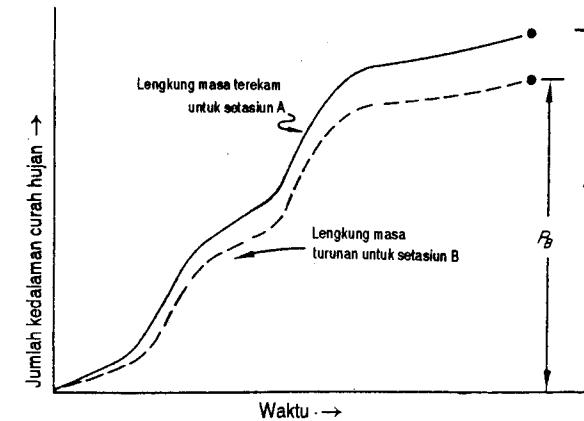
Gambar 2.12 Segibanyak Thiessen

Cara ketiga ialah menggambar *isohiet*, atau kontur kedalaman curah hujan yang sama. Luasan antara isohiet berturut-turut diukur dan diberi nilai rerata curah hujan. Jadi rerata seluruhnya untuk luasan tadi diturunkan dari rerata terbobot. Cara ini mungkin yang terbaik di antara ketiga cara tersebut dan ada keuntungannya bahwa isohiet boleh digambar untuk mempertimbangkan akibat setempat seperti angin yang terbanyak dan rupabumi yang tidak rata. Peta isohiet yang khas diperlihatkan pada gambar 2.13, meskipun curahan yang terekam jauh dari bersifat khas, karena hal itu merupakan curahan harian terbesar yang direkam di Inggris Raya.



Gambar 2.13 Curah hujan di sebagian daerah Dorset, 18 Juli 1955 (disalin dari British Rainfall, HMSO, London, 1957)

2.8.6 Memperlengkap rekaman curah hujan Sering terjadi pada waktu orang menghimpun data curah hujan bahwa ada daerah yang rekamannya tidak memadai, terutama menyangkut kehebatan curah hujan. Sebagai misal, andaikan pada dua setasian curah hujan A dan B, ada sukat swarekam di A dan sukat biasa di B. Andaikan lengkung masa curah hujan pada A ditunjukkan berupa garis penuh pada grafik gambar 2.14. Jumlah curah hujan di B diketahui dan tampak sebagai sebuah titik pada grafik ini. Jika letak B secara nyata di dekat A dan curah hujannya mungkin dari jenis dan kekerapan yang sama, maka dibolehkan untuk mengandaikan bahwa lengkung masa B akan tampak sebagai garis terputus-putus pada grafik. Jenis luasan data seperti itu harus digunakan dengan berhati-hati tetapi dapat sangat berguna.



Gambar 2.14 Menurunkan data curah hujan

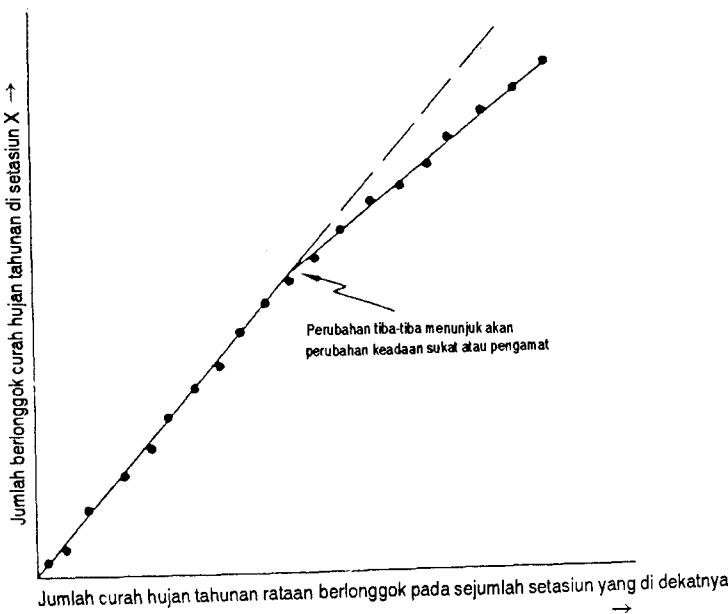
Contoh yang lain untuk itu ialah mengisi yang tidak ada pada rekaman sebuah setasian, bilamana rekaman untuk setasian yang berdekatan telah memberi data untuk jangka waktu (yang tanpa rekaman) itu. Andaikan untuk tahun tertentu tidak ada rekaman curahan di A. Pada tahun yang sama jumlah pada B adalah 650 mm.

Dengan menganggap bahwa curahan tahunan rataan pada A dan B masing-masing adalah 700 mm dan 600 mm, maka dengan menyebandingkan yang sederhana dengan mengandaikan hubungan rerata itu juga berlaku bagi tahun yang tanpa rekaman tadi, curahan di A untuk tahun-tahun tanpa rekaman akan menjadi $700/600 \times 650 = 758$ mm. Hasil ini dapat diperiksa dengan acuan serupa terhadap setasian C.

2.8.7 Arah kecenderungan nyata pada data teramat Dari rekaman beberapa tahun mungkin terlihat bahwa curah hujan tahunan, katakan saja, menurun. Adalah penting untuk mengetahui, bahwa arah kecenderungan ini tak bergantung pada penyukatan, dan semata-mata hanya disebabkan oleh keadaan meteorologi. Hal ini dapat diperiksa dengan merajah lengkung masa-ganda seperti yang tampak pada gambar 2.15.

Lencongan tiba-tiba dari nasaban garis-lurus, yang diperlihatkan dengan garis putus-putus pada gambar, menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan dalam penyukatan dan bahwa meteorologi wilayah itu boleh jadi bukan penyebab penurunan itu. Perubahan seperti itu mungkin disebabkan oleh didirikannya sebuah bangunan atau pagar yang mengubah pola angin di sekitar sukat,

penanaman pohon, penggantian bejana ukur yang satu dengan yang lain, bahkan pergantian seorang pengamat dengan yang lain yang menggunakan tatakerja yang berbeda.

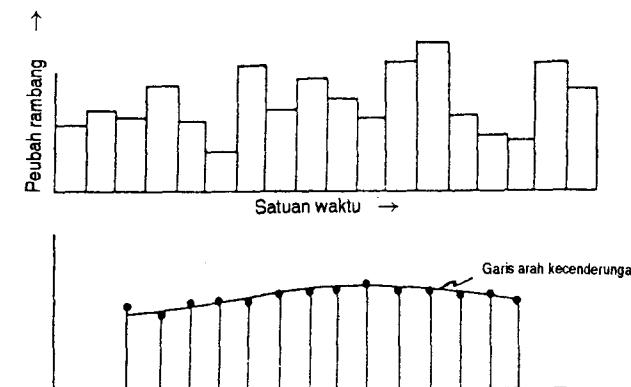


Gambar 2.15 Memeriksa setasian dengan lengkung masa-ganda

2.8.8 Arah kecenderungan dari rerata bergerak Arah kecenderungan bisa disifati lebih jelas dengan penggunaan kiat statistika sederhana yang memeriksa nilai rerata yang meliputi jangka waktu yang lebih panjang, dan menggerakkan rerata tahunan kelompok setiap kali.

Andaikan rekaman curah hujan pada sebuah setasian yang meliputi sejumlah tahun diperlihatkan sebagaimana pada gambar 2.16. Angka lima tahun yang pertama pada rekaman direratakan dan rerata itu dirajah pada titik-tengah kelompok tersebut. Titik berikutnya diperoleh dengan mengabaikan tahun pertama dan meratakan tahun ke-2 sampai ke-6, sekali lagi merajah rerata itu pada titik-tengah kelompok yang bersangkutan. Dengan jalan itu keragaman yang besar pada tahun-tahun tertentu dilicinkan dan arah kecenderungan jangka panjang dapat diketahui.

Kiat yang sama itu dapat diterapkan pada suhu, jam lamanya penyinaran surya, kecepatan angin, liputan awan dan data yang lain.



Gambar 2.16 Arah kecenderungan dari rerata maju

2.9 Peluang curahan terbesar (PCT)

Batas tertinggi curahan, andaikata saja ada, disebut peluang curahan terbesar (PCT). Batasannya sebagaimana tercantum pada [16], menurut teori kedalaman terbesar curahan dengan jujuh tertentu, yaitu secara nyata mungkin terjadi pada daerah badai dengan ukuran tertentu, untuk tempat tertentu dan waktu dalam setahun.

Anggitan mengenai batas tertinggi curahan yang mungkin ini dulu (sebelum 1950) dikenal sebagai curahan mungkin tertinggi tetapi kini orang lebih menyukai PCT. Hal itu disebabkan karena angkanya merupakan taksiran, sehingga memiliki derajat ketakpastian.

2.9.1 Cara bendawi Yang paling pokok, pencurahan memerlukan penyediaan air. Kadar air di udara diukur dengan suhu dan titik embunnya, kedua-duanya diperoleh lewat pengamatan meteorologi baku. Maka dari itu, di DAS yang hanya memiliki sedikit rekaman pun, orang sering dapat memperoleh nilainya. Banyaknya air di udara di atas suatu DAS dapat ditemukan dengan mengandaikan adanya rosotan adiabat jenuh (lihat pasal 2.3) atau pengamatan balon cuaca yang sebenarnya. Biasanya, angka itu menunjuk pada kedalaman antara 10 dan 60 mm. Air itu tercurah sebagai akibat pendinginan, yang hampir selalu berhasil dari pergerakan menegak. Masa udara mengembang secara

adiabat sehingga mencurahkan lengas, yang pada gilirannya melepaskan bahang terpendam, dan dengan demikian gerakan menegaknya dipercepat. Proses itu terpicu-diri dan dalam hal yang sepaling menjadi hujan lebat tiba-tiba pada badai dengan halilintar yang menyambar-nyambar. Naiknya udara itu mungkin juga disebabkan sebagai akibat adanya pegunungan atau perenggan seperti telah dibicarakan dalam pasal 2.6

Pengaliran masuk udara lengas di dasar turus (tiang) badai yang membubung dapat diukur dengan pengamatan laju angin di sekitar tepi badai. Pengamatan itu menghasilkan data mengenai banyaknya air yang dapat terbawa ke dalam badai, dan karena itu tercurah. Data itu juga dapat disimpulkan dari peta cuaca sinopsis, jika data tersebut berdasarkan jaringan rapat setasiun pengamatan yang cukup.

Ada hubungan yang telah mapan antara mengumpulnya masa udara, gerak menegaknya setelah itu, dan pengembunan uap air di dalamnya. Jadi setiap penelitian mengenai PCT dimulai dari data mengenai curah hujan yang direratakan sedaerah, dari hasil pengamatan. Curah hujan sepaling di suatu daerah memberi pedoman ke arah kecepatan mengumpul dan laju udara menegak, yang pada gilirannya, menghasilkan laju maksimum pengembunan dan pencurahan. Tatakerja untuk menentukan PCT menyangkut pemaksimuman curah hujan badai teramat dengan menyelesaikan faktor air yang sebenarnya pada kejadian yang teramat hingga nilai pembatas, yang kiranya telah terbawa oleh udara dan suhunya. Caranya, dengan mengubah badai yang telah terjadi di daerah ybs ke DAS yang sebenarnya jadi perhatian, dan dengan memastikan bahwa telah digunakan *pembungkus*. Makna istilah itu ialah, penggunaan lengkung pembungkus bagi semua data kedalaman, luas daerah dan jujuh yang digunakan dalam penurunan nilai pada penelitian tsb. Uraian rinci cara tersebut diberikan dalam *Operational Hydrology Report No. 1, WMO, Organisasi Meteorologi Sedunia* [17].

Setelah itu, dapatlah diturunkan maksima untuk musim atau bulan yang terpisah-pisah dengan mengambil maksima nilai kelengasan udara dan pengaliran udara musiman atau bulanan yang terekam, dan mengandaikan bahwa semua itu terjadi secara serempak. Nilai itu dapat diperbandingkan dengan badai yang pernah terjadi di DAS tersebut dan di wilayah yang berdekatan, yang dari segi meteorologi serupa. Dengan cara ini dapatlah disusun sederet data mengenai badai yang pernah terjadi dan diperbandingkan dengan maksima menurut hipotesis.

PCT itu dapat diturunkan dari maksima berdasar hipotesis dengan mengambil puncak lengkung pembungkusnya. Kadang-kadang orang memperdebatkan,

bahwa semua unsur itu sendiri yang digunakan untuk memberi batasan harus diteliti akan kekerapannya, sebelum orang menerima PCT. Tetapi untuk ini orang mempraanggap, bahwa proses fisika hujan yang menghasilkan badai adalah kejadian rambang (acak) yang dapat muncul dalam besaran yang sangat berbeda-beda. Ini mungkin tidak betul sampai batas yang sama seperti halnya curahan yang terekam pada sukat hujan atau dalam hal banjir di sungai. Selain itu, dengan mengambil nilai maksimum faktor penentunya dan menggabungkannya di ruang DAS ybs, anggitan mengenai masa ulang jadi tak berlaku. Pendekatan itu lebih bersifat pasti ketimbang bersifat kestatistikaan. PCT berbeda-beda sesuai dengan letak daerah, musim, daerah dan ketinggian DAS, dan jujuh badai.

2.9.2 Cara yang bersifat kestatistikaan Kadang-kadang, bila tersedia cukup data curahan, yang digunakan orang jalan kestatistikaan lain. Jalan itu teristimewa berguna bila tersedia keterangan meteorologi lain mengenai titik embun, laju angin, dst. Penggunaan cara itu juga lebih cepat.

Tatakerja menurut Hershfield [18, 19] didasarkan pada kekerapan umum persamaan [20]

$$X_t = \bar{X}_n + K \sigma_n$$

di sini X_t adalah curah hujan dengan jujuh yang ditentukan untuk masa ulang t , \bar{X}_n dan σ_n masing-masing adalah rataan dan simpangan baku untuk sederet nilai maksimum tahunan curah hujan dengan jujuh tersebut.

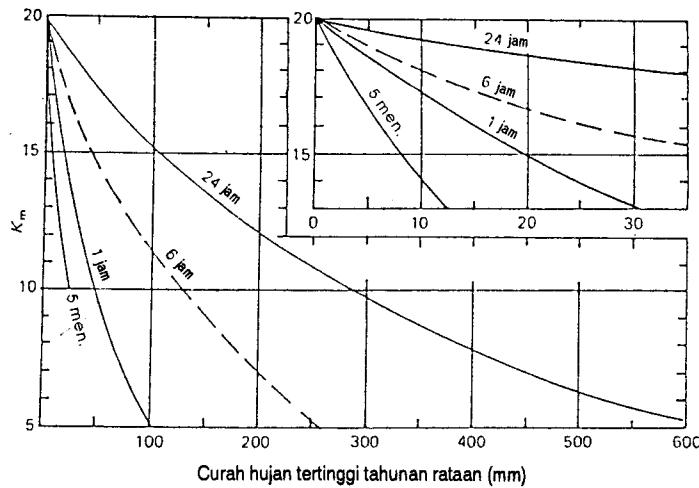
Jika X_m adalah curah hujan maksimum yang teramat

$$X_m = \bar{X}_n + K_m \sigma_n$$

maka K_m adalah jumlah simpangan baku yang harus ditambahkan kepada rataannya jika orang mau menemukan maksimumnya.

Ada penelitian di Amerika Serikat [18] yang menggunakan rekaman curah hujan 24 jam dan meliputi lebih dari 2700 setasiun dengan waktu perekaman paling tidak 10 tahun. X_m dan σ_n dihitung seperti lazimnya tetapi tiap hujan maksimum yang terekam dihilangkan. Nilai terbesar K_m temuan yang memenuhi maksimal yang dihilangkan itu adalah 15.

Nilai K_m untuk jujuh lain di luar yang 24 jam ditentukan [19], dan besarnya seperti terlukis dalam gambar 2.17.



Gambar 2.17 K_m sebagai fungsi jujuh curahan hujan dan rataan deret tahunan
(Dicetak ulang dari Journal American Water Works Association, Vol. 57, No. 8, (Agus 1965), dengan izin. Hak Cipta 1965 American Water Works Association)

Dapat dicatat, bahwa angka ini memiliki nilai maksimum 20, tetapi peneliti lain menemukan nilai yang bahkan lebih tinggi di daerah lain [21]. Agaknya, K_m berbeda-beda secara berbalik dengan kelebatan. Jadi makin besar curah hujan di suatu iklim tertentu, makin kecil peluang K_m melebihi 15. Makin kersang daerahnya, makin besarlah peluang itu.

Uraian rinci mengenai cara itu tertera dalam *Operational Hydrology Report No. 1, WMO* [17].

2.9.3 Penggunaan data secara umum Banyak badai besar-besaran telah dibuat analisisnya, terutama di Amerika Serikat. Orang juga menerbitkan nilai maksimum kedalaman curahan hujan untuk berbagai jujuh dan daerah [16, 21]. Data yang seperti itu biasanya disajikan sebagai perangkat lengkung, dengan setiap lengkung menggambarkan kedalaman curahan yang dirajah pada kordinat tegak lurus, jujuh badai dalam jam dan luas daerah badai dalam mil persegi. Lengkung seperti itu menjadi pedoman yang berguna dalam membatasi nilai. Tetapi orang harus menggunakan dengan pertimbangan bagi DAS tertentu. Sebabnya, di daerah lain, rupabumi (topografi) dan dongak (ketinggian), demikian pula iklim, dapat banyak mengubah hasilnya.

Dari sudut pandangan pasal ini adalah menarik jika kita melihat lagi pada curah hujan-titik maksimum sedunia yang sudah dikutip pada ayat 2.8.2. Di dalamnya sudah diberi gambaran, jika curah hujan dirajah lawan jujuh, dengan kedua sekalan sama-sama bersifat log, curah hujan-titik terbesar sedunia yang teramat terdapat pada atau tepat di bawah garis lurus yang persamaannya adalah

$$R = 16,6D^{0,475}$$

Dalam hal ini, R adalah curah hujan dalam inci dan D adalah jujuh dalam jam. Dengan mengacu pada gambar 2.4 tampak, bahwa curah hujan-titik sepaling yang terekam di Kepulauan Inggris, yang disarikan dari lebih setengah juta data tahunan setasiun terletak dekat dengan garis persamaan

$$R = 106D^{0,46}$$

Dalam hal ini, R dinyatakan dalam mm dan D dalam jam. Yang teristimewa paling cocok pada wilayah itu adalah jangka dari 0,2 hingga 20 jam. Jangka itu boleh jadi yang gawat untuk penggunaan hidrograf satuan.

Acuan

- 1 Maidens, A. L. New Meteorological Office rain-gauges. *Meteorological Magazine*, **94**, No. 1114 (Mai 1965) 142
- 2 Goodison, C. E. dan Bird, L. G. Telephone interrogation of rain-gauges. *Meteorological Magazine*, **94**, No. 114 (Mei 1965) 144
- 3 Green, M. J. Effects of exposure on the catch of rain gauges. *Technical Publication 67, Water Research Association*, Juli 1969
- 4 Bleasdale, A. Rain gauge networks development and design with special reference to the United Kingdom. *International Association of Scientific Hydrology Symposium on Design of Hydrological Networks, Quebec*, 1965
- 5 Paulhus, J.L.H. Indian ocean and Taiwan rainfalls set new records. *Monthly Weather Rev.*, **93** (Mei 1965) 331
- 6 Bilham, E. G. *The Classification of Heavy Falls of Rain in Short Periods*, H.M.S.O., London, 1962 (diterbitkan kembali)
- 7 A guide for engineers to the design of storm-sewer systems. *Road Research Laboratory, Road Note 35*, H.M.S.O., London, 1963
- 8 Holland, D. J. Rain intensity-frequency relationships in Britain. *British rainfall 1961*, H.M.S.O., London 1967

- 9 Yarnall, D. L. Rainfall intensity-frequency data. U.S. *Department of Agriculture Miscellaneous Publication*, **204**, Washington D.C., 1935
- 10 Linsley, R. K. dan Kohler, M. A. Variations in storm rainfall over small areas. *Trans. Am. Geophys. Union*, **32** (April 1951) 245
- 11 Holland, D. J. The Cardington rainfall experiment. *Meteorological Magazine*, **96**, No. 1140 (Juli 1967) 193-202
- 12 Young, C. P. Estimated rainfall for drainage calculations. *LR 595, Road Research Laboratory*, H.M.S.O., London 1973
- 13 Natural Environmental Research Council. *Flood Studies Report*, Vols. I-V, NERC, 1975
- 14 The areal reduction factor in rainfall frequency estimation. *FSR Suppl. Report No. 1*, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom, 1977
- 15 Thiessen, A. H. Precipitation for large areas. *Monthly Weather Rev.*, **39**, (Juli 1911) 1082
- 16 Hansen, E.M., Schreiner, L.C., Miller, J.F. Application of probable maximum precipitation estimates - United States east of the 105th meridian. *Hydrometeorological Report No. 52*, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Dept. of Commerce, Washington, D.C., 1982
- 17 Manual for estimation of maximum probable precipitation, *Operational Hydrological Report No. 1*, ed. 2, World Meteorological Organisation, 1986
- 18 Hershfield, D.M. Estimating the probable maximum precipitation. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., Journal of Hydraulics Division*, **87** (1961) 99
- 19 Hershfield, D.M. Method for estimating probable maximum precipitation, *Journal American Waterworks Association*, **57** (1965) 965
- 20 Chow, V.T. A general formula for hydrologic frequency analysis, *Trans. Am. Geophys. Union*, **32** (1961) 231
- 21 McKay, G.A. *Statistical estimates of precipitation extremes for the Prairie Provinces*, Canada Dept. of Agriculture, PFRA Engineering Branch, 1965
- 22 Glasspoole, J. Heavy falls in short periods (two hours or less). *Quart. J. Roy. Meteorological Soc.*, **58** (1931) 57-70
- 23 Guide to hydrometeorological practices. *U.N. World Meteorological Org. No. 168. Technical Publication* 82, United Nations, Geneva, 1965
- 24 *Handbook of Meteorology* (suntingan Berry, Bollay, dan Beers), McGraw-Hill, New York, 1949, 1024 h.
- 25 Herschfield, D. dan Wilson, W. T. Generalising of rainfall intensity-frequency data. *Proc. Int. Assoc. Sci. Hydrol., General Assembly of Toronto*, **1** (1957) 499-506
- 26 Jennings, A. H. World's greatest observed point rainfalls. *Monthly Weather Rev.*, **78**, (Januari 1950) 4
- 27 Langbein, W. B. Hydrologic data networks and methods of extrapolating or extending available hydrologic data. *Flood Control Series No. 15*, United Nations, 1960
- 28 Parthasarathy, K. dan Gurbachan Singh. Rainfall intensity-duration-frequencies for India, for local drainage design. *Indian J. Meteorology Geophys.*, **12** (1961) 231-42
- 29 Peterson, K.R.A. A precipitable water nomogram. *Bull Am. Meteorological Soc.*, **42** (1961), 199
- 30 Solot, S. Computation of depth of precipitable water in a column of air. *Monthly Weather Rev.*, **67** (1939) 100
- 31 Standards for methods and records of hydrologic measurements. *Flood Control Series no. 6*, United Nations, 1954

Soal

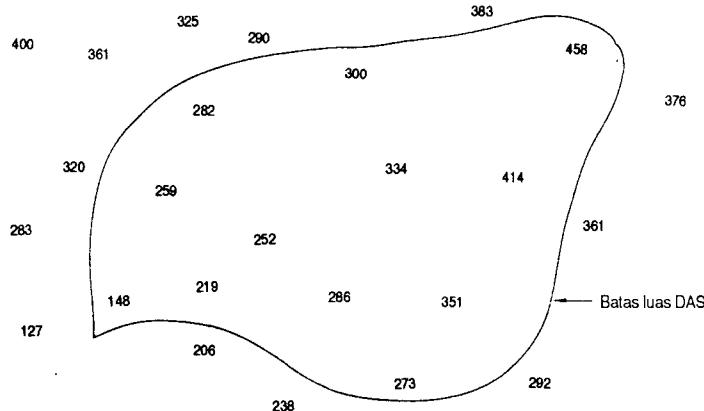
- 2.1 Suatu masa udara ada pada suhu 28°C dengan kelembapan nisbi 70 persen. Tentukan: **a** tekanan udara jenuh, **b** kekurangan jenuh, **c** tekanan uap sebenarnya dalam mbar dan mm Hg, **d** titik-embun, dan **e** suhu bola-basah.
- 2.2 Uraikan hubungan antara kedalaman, jujuh, dan luasan hujan untuk badai tertentu.
- 2.3 Yang di bawah ini adalah angka tahunan untuk setasian di Derbyshire. Nilai rerata untuk Cubley dan Biggin School belum ditentukan.

Bacaan lebih lanjut

Binnie, G.M. dan Mansell-Moullin, M. The estimated probable maximum storm and flood on the Jhelum River - a tributary of the Indus. *Symposium on River Flood Hydrology, Inst. Civ. Eng., London*, 1966, Paper No. 9.

	Rerata (inci)	1959	1960
Wirksworth	35,5	26,8	48,6
Cubley		19,5	42,4
Rodsley	331,3	21,6	42,1
Biggin School		33,1	54,2

- a Andaikan tolakan dari keadaan normal sama untuk semua setasiun. Prakirakan ‘rerata tahunan’ Rodsley dari angka di Wicksworth meliputi kedua tahun rekaman. Bandingkan hasilnya dengan rekaman yang telah dibuat.
- b Prakirakan rerata tahunan untuk Cubley dan Biggin School dengan menggunakan baik data Wirksworth maupun data Rodsley.
- c Ulas andaian pada bagian a. Wajarkah?
- 2.4 Sebuah di antara empat sukat hujan yang dibaca setiap bulan pada suatu daerah tadi menunjukkan cacat dalam bulan ketika yang tiga lainnya masing-masing merekam 37, 43, dan 51 mm. Jika jumlah curahan tahunan rerata ketiga sukat itu masing-masing adalah 726, 752, dan 840 mm, dan angka rerata sukat yang rusak itu 694 mm, taksir rerata bulanan pada sukat tersebut.
- 2.5 Hitung curah hujan tahunan rerata, dalam kedalaman inci, pada daerah tadi yang terlukis di bawah i dengan rerata hitung, ii dengan cara Thiessen, dan iii dengan merajah isohiet. Ulas mengenai kemungkinan menerapkan cara itu.



- 2.6 Bicarakan penempatan sukat hujan di tanah dan ulas mengenai pengaruh angin dan hujan yang mengenai tempat penangkap secara tidak menegak.
- 2.7 Curahan tahunan pada sukat X dan curahan tahunan rerata pada dua puluh sukat hujan yang mengelilinginya disenaraikan pada tabel berikut:

Tahun	Curahan tahunan (mm)		Curahan tahunan (mm)	
	Sukat X	Rerata 20 setasiun	Tahun	Rerata 20 setasiun
1972	188	264	1954	223
1971	185	228	1953	173
1970	310	386	1952	282
1969	295	297	1951	218
1968	208	284	1950	246
1967	287	350	1949	284
1966	183	236	1948	493
1965	304	371	1947	320
1964	228	234	1946	274
1963	216	290	1945	322
1962	224	282	1944	437
1961	203	246	1943	389
1960	284	264	1942	305
1959	295	332	1941	320
1958	206	231	1940	328
1957	269	234	1939	308
1956	241	231	1938	302
1955	284	312	1937	414
				343

- a Periksa ketaatasasan data setasiun X.
- b Bilamanakah terjadi perubahan polah hujan? Bicarakan penyebab yang mungkin.
- c Sesuaikan data itu dan tentukan perbedaan apa yang dibuat olehnya kepada curahan rerata tahunan 36-tahun pada setasiun X.
- 2.8 Rajah data untuk angka rata ke-20 setasiun pada 2.7 sebagai deret waktu. Setelah itu rajah rerata bergerak 5-tahun dan tolakan tahunan terlonggok dari rerata 36-tahun. Adakah bukti tentang keberdauran atau arah kecenderungan yang khas?
- 2.9 Pada tapak tertentu terdapat rekaman kecepatan angin jangka panjang untuk hasil pengukuran pada ketinggian 10 m dan 15 m di atas tanah.

Untuk pengukuran tertentu hasil penguapan diperlukan kecepatan pada 2 m; jadi diperlukan untuk meluaskan rekaman jangka panjang hingga ke paras 2 m. Untuk satu perangkat data, angka kecepatan pada 10m dan 15 m masing-masing adalah 9,14 dan 9,66 m/detik.

- a Berapakah nilai untuk pangkat yang berhubungan dengan kedua kecepatan dan ketinggian itu?
 - b Kecepatan apakah yang anda prakirakan untuk paras 2m?
- 2.10 Sebuah sukat hujan mencatat curahan sebanyak 9 mm dalam 10 menit.
- a Berapa banyakkah anda mengharapkan curahan yang seperti itu terjadi di suatu tempat di Inggris?
 - b Berapakah besar volum air hujan yang dapat diharapkan tercurah pada luasan 3km^2 di sekitarnya?
- 2.11 Berapakah curah hujan maksimum 1 hari yang dapat diperkirakan terjadi di Inggris untuk jangka waktu 50 tahun pada tempat X (curah hujan tahunan rerata 1000 mm) dan untuk jangka waktu 30 tahun untuk Y (curah hujan tahunan rerata 1750 mm)?
- 2.12 Berapakah curah hujan rerata pada luasan 8 km^2 selama badai yang berlangsung 30 menit dengan kekerapan sekali dalam 20 tahun di a Oxford, b Kumasi? Adakah jawaban anda untuk b memerlukan persyaratan?
- 2.13 Daftar di bawah menyenaraikan curah hujan tertinggi tahunan pada jangka waktu 6-jam, di sebuah setasiun pengamatan, selama 20 tahun. Buatlah taksiran pertama Peluang Curahan Tertinggi dengan jujuh 6 jam di setasiun itu.

Kedalaman dalam mm

146	193
203	124
194	176
102	210
173	102
151	131
182	165
115	187
143	121
180	98

3

Penguapan dan pemeluhan

3.1 Faktor meteorologi

Penguapan penting dalam semua penelitian sumber daya air. Proses itu berpengaruh pada daerah aliran sungai, kemampuan yang diperlukan bagi suatu waduk, ukuran kilang pemompaan, pemakaian-habis oleh tanaman, dan serahan persediaan air bawah tanah, sekedar menyebut beberapa faktor saja.

Air menguap dari tanah, entah tanah itu gundul entah tertutup tumbuhan, dan juga dari pepohonan, permukaan kedap seperti atap dan jalan, perairan terbuka atau sungai yang mengalir. Laju penguapan berbeda-beda sesuai dengan warna dan daya pantul permukaannya (*albedonya*) dan untuk permukaan yang terpajang langsung pada penyinaran surya berbeda dengan yang terlindung daripadanya.

Yang khas bagi daerah beriklim sedang yang lembap, setiap tahun air yang hilang lewat penguapan dari perairan terbuka sekitar 600 mm dan barangkali 450 mm dari permukaan daratan. Di daerah yang beriklim kerontang, misalnya Irak, angka itu mungkin saja 2000 mm dan 100 mm, dan kesenjangan yang besar itu disebabkan oleh tiadanya curahan hujan pada sebagian besar waktu dalam setahun.

Beberapa di antara faktor meteorologi yang penting-penting yang berpengaruh pada penguapan dibicarakan di bawah ini.

Penyinaran surya Penguapan adalah beralihnya air ke dalam wujud uap. Ini adalah proses yang berlangsung hampir tak putus-putusnya selama ada cahaya matahari dan sering juga pada malam hari. Karena perubahan wujud molekul air dari cair ke dalam gas memerlukan masukan energi (dikenal sebagai bahang-terpendam penguapan), proses itu sangat kuat di bawah penyinaran

langsung surya. Hal itu berarti, bahwa awan yang merintangi spektrum lengkap matahari mencapai bumi, dapat mengurangi masukan energi dan dengan demikian memperlambat proses penguapan.

Angin Pada waktu air menguap ke dalam atmosfer, lapisan perbatas antara bumi dan udara menjadi jenuh dan lapisan ini perlu dipindahkan dan terus-menerus diganti oleh udara yang lebih kering jika penguapan itu harus berjalan. Pergerakan udara pada lapisan perbatas ini bergantung pada angin, jadi kecepatan angin adalah penting.

Kelembaban nisbi Faktor ketiga yang mempengaruhi penguapan adalah kelembaban nisbi udara. Bila udara makin lembap, kemampuannya untuk menyerap uap air menurun lebih banyak, dan laju penguapan pun berkurang. Penggantian lapisan perbatas udara jenuh oleh udara dengan kelembaban yang sama tidak dapat mempertahankan laju penguapan itu: hal ini hanya akan terjadi jika udara yang masuk itu lebih kering daripada udara yang dipindahkan itu.

Suhu Sebagaimana dikatakan di atas, masukan energi perlu untuk memungkinkan berlangsungnya penguapan. Ini berarti, bahwa jika suhu-sekitar udara dan tanah adalah tinggi, penguapan dapat berlangsung lebih cepat daripada jika suhu itu lebih rendah, karena lebih segera tersedianya energi. Karena kemampuan udara untuk menyerap uap air meningkat dengan naiknya suhu, maka suhu udara mempunyai dua pengaruh terhadap banyaknya penguapan yang terjadi, sedangkan suhu tanah dan air hanya memiliki pengaruh tunggal.

3.2 Pemeluhan

Menanam segala macam tumbuhan memerlukan air untuk menopang hidupnya, meskipun tumbuhan yang satu sangat berbeda dengan tumbuhan yang lain. Hanya sebagian kecil dari air yang dibutuhkan oleh tumbuhan itu tertambat dalam sosok tumbuhan. Sebagian besar daripadanya melewati akar ke batang dan *dipeluhkan* ke dalam atmosfer melewati bagian tumbuhan yang berdaun.

Dalam keadaan di lapangan, boleh dikatakan tidak mungkin untuk membedakan antara penguapan dan pemeluhan jika tanah tertutup oleh tetumbuhan. Kedua proses itu umumnya saling berhubungan dan disebut sebagai *penguappeluhan*.

Banyaknya kelengasan yang hilang dari suatu daerah oleh penguappeluhan bergantung pertama-tama pada jatuhnya curahan, kedua pada faktor iklim suhu, kelembapan dst dan ketiga pada jenis, cara penanaman luasnya tetumbuhan. Banyaknya itu dapat bertambah, misalnya karena pohon besar-besar yang akarnya masuk ke dalam tanah dalam-dalam, menaikkan air dan

memeluhkannya, yang dalam keadaan yang lain, tidak terjangkau oleh penguapan permukaan.

Pemeluhan berlangsung seluruhnya pada siang hari karena pengaruh penyinaran surya. Pada malam hari pori atau *stomata* tumbuhan menutup dan hanya sedikit kelengasan yang meninggalkan permukaan tumbuhan. Sebaliknya, pemeluhan berlangsung selama tersedia masukan bahang, dan karena itu pertama-tama berlangsung selama siang hari. Faktor yang lainnya yang penting adalah ketersediaan air yang banyak. Jika air selalu tersedia banyak untuk digunakan tumbuhan dalam pemeluhan, lebih banyak yang akan terpakai ketimbang pada waktu-waktu air itu kurang daripada yang dapat digunakan. Maka dari itu, haruslah dibuat perbedaan antara *kemungkinan (potensial) penguappeluhan* dan apa yang terjadi sebenarnya. Sebagian besar cara menaksir mau-tidak-mau mengandaikan adanya air yang melimpah sehingga memberikan angka kemungkinan itu.

3.3 Cara menaksir penguapan

3.3.1 Anggaran air dan pendekatan persamaan simpanan Cara ini terdiri dari pengumpulan data semua air yang masuk dan yang keluar daerah tадah atau DAS tertentu. Jika pada seluruh daerah itu curah hujan diukur secara teratur dan bersistem, maka kita dapat membuat hampiran yang mendekati kepada banyaknya air yang datang dari atmosfer. Hasil yang diperoleh dari penyukatan secara teratur semua sungai yang menyalirkан daerah itu, dan lengkung tingkat aliran yang dibuat dengan cermat, dapat menunjukkan air yang meninggalkan daerah tersebut lewat jalur permukaan. Selisih antara nilai sukatan dan lengkung itu hanya dapat tersebut oleh tiga jalan:

- i oleh perubahan dalam simpanan di dalam daerah tадah, entah dalam waduk dan lekuk, entah dalam lapisan pembawa air di bawah tanah;
- ii oleh selisih, dalam aliran bawah tanah, ke dalam dan ke luar daerah tадah;
- iii oleh penguapan dan pemeluhan.

Persamaan simpanan itu secara umum dapat ditulis sebagai

$$E = P + I \pm U - O \pm S$$

E = penguappeluhan

P = jumlah curahan

I = aliran masuk permukaan (jika ada)

U = aliran keluar bawah tanah

O = aliran keluar permukaan

S = perubahan dalam simpanan (baik di permukaan maupun di bawah permukaan).

Jika pengamatan dibuat sepanjang kurun waktu yang cukup lama kebenaan S , yang tidak melonggok, akan susut dan dapat diabaikan jika titik awal dan titik akhir penelitian itu dipilih bersesuaian sedekat mungkin dengan keadaan iklim yang sama. Kebenaan U tidak dapat dirampatkan tetapi dalam banyak hal dapat diberi nilai lebih rendah, karena diketahuinya keadaan geologi yang menghalangi pengaliran bawah tanah secara besar-besaran. Dalam hal seperti itu penaksiran penguapan yang baik menjadi mungkin dan cara itu memberikan sarana untuk mencapai hampiran pertama.

3.3.2 Cara anggaran energi Cara ini, sama halnya dengan pendekatan anggaran air tadi, menyangkut penyelesaian suatu persamaan yang menyenaraikan semua sumber dan gentat energi bahang dan menyisakan penguapan sebagai satu-satunya yang tidak diketahui. Cara ini melibatkan banyak peralatan dan kini masih sedang diusahakan orang dengan giat. Orang tidak dapat menggunakan secara langsung tanpa ada banyak data yang secara normal tersedia, maka dari itu merupakan pendekatan seorang pakar.

3.3.3 Rumus empiris Banyak usaha telah dilakukan orang untuk menghasilkan beberapa rumus yang memuaskan untuk menaksir penguapan. Umumnya rumus itu untuk penguapan dari permukaan air terbuka, yang sesungguhnya memang cara lebih umum untuk diikuti. Sebabnya sederhana saja. Penguapan jika memang terjadi mengandaikan adanya penyediaan air. Apapun keadaan meteorologinya, jika tidak tersedia air, maka tidak akan ada penguapan. Sebab itu, cara menaksir dengan menggunakan data meteorologi bekerja atas dasar andaian bahwa air tersedia melimpah; yaitu, terdapat permukaan air bebas. Maka dari itu, hasil yang diperoleh tidak harus merupakan ukuran penguapan yang sebenarnya melainkan *kemungkinan penguapan*. Sering kedua-duanya sama, seperti misalnya dalam waduk dengan permukaan air bebas. Bila menyangkut penguapan dari permukaan daratan, hilangnya air dengan cara ini jelas bergantung pada ketersediaan: curah hujan, muka airtanah, tanaman atau tetumbuhan, dan jenis tanah, semua itu ada pengaruh, yang dapat dinyatakan dengan menerapkan faktor empiris, umumnya kurang dari satuan, pada penguapan permukaan air bebas.

Ada dua perkara yang harus dipertimbangkan:

i bila suhu permukaan air adalah sama dengan suhu udara;

ii bila suhu udara dan air berbeda.

Hal i jarang terjadi dan secara empiris diperlakukan dengan persamaan

$$E_a = C(e_s - e)f(u) \quad (3.1)$$

E_a = penguapan air terbuka setiap satuan waktu (untuk suhu udara dan air tC yang sama) dalam mm/hari

C = tetapan empiris

e_s = tekanan uap jenuh dari udara pada tC (mm Hg)

e = tekanan uap sebenarnya di udara di atasnya (mm Hg)

U = Kecepatan angin pada ketinggian baku tertentu (m)

Persamaan berikut ini diperoleh secara empiris untuk perkara ini dan berlaku umum:

$$E_a = 0,35(e_s - e)(0,5 + 0,54u_2) \quad (3.2)$$

u_2 menunjukkan kecepatan angin dalam m/det pada ketinggian 2 m; E_a dalam mm/hari.

Perkara (ii) yang biasanya terjadi. Lagi-lagi, rumus harus memiliki bentuk

$$E_o = C(e'_s - e)f(u) \quad (3.3)$$

tetapi sekarang e'_s adalah tekanan uap jenuh lapisan udara antara udara dan air, yang suhu t'_s nya tidak sama dengan udara maupun air dan pada hakikatnya tak mungkin diukur. Oleh sebab itu, rumus empiris dikembangkan dalam bentuk persamaan 3.1, yang bekerja cukup baik untuk letak tertentu yang tetapannya telah diturunkan, tetapi tidak memiliki keberlakuan umum.

Rumus yang demikian itu, yang diturunkan untuk Danau Ijsel di Negeri Belanda, dan hanya berlaku untuknya serta keadaan yang serupa, adalah

$$E_o = 0,345(e_w - e)(1 + 0,25u_6)$$

dengan E_o = penguapan danau itu dalam mm setiap hari

e_w = tekanan uap jenuh pada suhu t_w air permukaan danau dalam mm Hg

e = tekanan uap sebenarnya dalam mm Hg

u_6 = kecepatan angin dalam m/det pada ketinggian 6 m di atas permukaan

3.3.4 Teori Penman

Yang digunakan adalah tatanama berikut:

- E_o = penguapan dari air terbuka (atau setaranya dalam energi bahang)
- e_w = tekanan uap udara jenuh pada suhu permukaan air t_w
- e = tekanan uap air dari udara sebenarnya pada suhu t = tekanan uap jenuh pada titik embun t_d
- e_s = tekanan uap jenuh dari udara pada suhu t
- e'_s = tekanan uap jenuh dari udara pada suhu lapisan perbatas t_s'
- n/D = nisbah keberawanan = jam peninjaman surya sebenarnya/yang mungkin
- R_A = nilai sinaran surya Angot yang tiba di atmosfer
- R_C = sinaran surya dan langit sebenarnya yang diterima pada permukaan bumi pada hari cerah
- R_I = jumlah sinaran bersih yang diserap di permukaan setelah pemantulan
- R_B = sinaran dari permukaan bumi.

Pada 1948 Penman [1] menyajikan teori dan rumus untuk menaksir penguapan dari data cuaca. Teori itu didasarkan pada dua persyaratan yang harus dipenuhi jika berlangsung penguapan terus menerus. Persyaratan itu ialah: i harus ada penyediaan energi yang memberi bahang penguapan laten; ii harus ada suatu mekanisme untuk memindahkan uap jika hal itu terjadi.

Penyediaan energi Selama siang hari ada sejumlah tertentu sinaran gelombang pendek yang tiba pada permukaan bumi. Jumlah itu bergantung pada garis lintang, musim, waktu sehari-harinya, dan derajat keberawanannya. Dengan andaian tidak ada awan dan atmosfer benar-benar cerah, jumlah sinaran yang diperkirakan, diberikan oleh Angot dalam bentuk senarai, dan disajikan dalam tabel 3.1 sebagai nilai R_A .

Jika R_C = sinaran gelombang pendek yang sebenarnya diterima di bumi dari surya dan langit dan n/D nisbah jam peninjaman surya sebenarnya/yang mungkin, maka Penman memberikan (untuk Inggris bagian selatan)

$$R_C = R_A(0,18 + 0,55n/D)$$

dan mengutip Kimball (untuk Virginia, AS)

$$R_C = R_A(0,22 + 0,54n/D)$$

dan Prescott (untuk Canberra, Australia)

$$R_C = R_A(0,25 + 0,54n/D)$$

Tabel 3.1 Nilai Angot sinaran gelombang pendek R_A pada tepi luar atmosfer dalam g kal/cm²/hari sebagai fungsi bulan dalam tahun dan garis lintang^a

	Garis lintang (derajat)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Agust.	Sept.	Okt.	Nop.	Des.	Tahun
U	90	0	0	55	518	903	1077	944	605	136	0	0	0	3540
	80	0	3	143	518	875	1060	930	600	219	17	0	0	3660
	60	86	234	424	687	866	983	892	714	494	258	113	55	4850
	40	358	538	663	847	930	1001	941	843	719	528	397	318	6750
	20	631	795	821	914	912	947	912	887	856	740	666	599	8070
Katulistiwa	844	963	878	876	803	803	792	820	891	866	873	829	8540	
	20	970	1020	832	737	608	580	588	680	820	892	986	978	8070
	40	998	963	686	515	358	308	333	453	648	817	994	1033	6750
	60	947	802	459	240	95	50	77	187	403	648	920	1013	4850
	80	981	649	181	9	0	0	0	113	459	917	1094	3660	
S	90	995	656	92	0	0	0	0	30	447	932	1110	3540	

^a Dari *Physical and Dynamical Meteorology* oleh David Brunt, h. 112 (Cambridge University Press, 1944). Satuan SI untuk R_A adalah joule/m²/hari. Tabel dalam g kal/cm²/hari ditunjukkan setinggi cocok dengan nomogram Rijkoort. Pengalihan ini adalah $1 \text{ g ka/cm}^2 = 41,9 \text{ kJ/m}^2$.

Jadi bahkan pada hari-hari dengan tutupan awan sempurna ($n/D = 0$), sekitar 20 persen sinaran surya mencapai permukaan bumi, sedangkan pada hari-hari tanpa awan 75 persen sinaran lolos.

Sebagian R_C terpantul sebagai sinaran gelombang pendek; jumlah tepatnya bergantung pada kepantulan permukaan, atau, koefisien pantul r .

Jika $R_I =$ jumlah sinaran bersih yang terserap, maka (untuk Inggris bagian selatan)

$$R_I = R_C(1-r) = R_A(1-r)(0,18 + 0,55n/D)$$

Pada gilirannya ada R_I yang dipancarkan kembali oleh bumi sebagai sinaran gelombang panjang, khususnya, pada malam hari ketika udara kering dan langit cerah. Pengaliran bersih ke luar R_B dapat dinyatakan secara empiris sebagai

$$R_B = \sigma T_a^4 (0,47 - 0,077\sqrt{e})(0,20 + 0,80n/D)$$

dalam hal ini

σ = tetapan Lummer dan Pringsheim = $117,74 \times 10^{-9}$ g kal/cm²/hari

T_a = suhu bumi mutlak = $t^\circ C + 273$

e = tekanan uap sebenarnya dari udara dalam mm Hg.

Jadi jumlah energi bersih yang akhirnya tertinggal pada permukaan air bebas ($r = 0,06$) diberikan dengan H ,

$$\begin{aligned} H &= R_I - R_B \\ &= R_C - rR_C - R_B \\ &= R_C(1-r) - R_B \\ &= R_A(0,18 + 0,55n/D)(1-0,06) - R_B \end{aligned}$$

Maka dari itu

$$\begin{aligned} H &= R_A(0,18 + 0,55n/D)(1-0,06) - (117,4 \times 10^{-9}) \\ &\quad T_a^4 (0,47 - 0,077\sqrt{e})(0,20 + 0,80n/D) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Bahang ini terpakai dalam empat jalan, yaitu

$$H = E_o + K + S + C$$

E_o = bahang yang tersedia untuk penguapan dari air terbuka

K = pengalihan bahang mengolakgalik dari permukaan

S = pertambahan dalam bahang massa air itu (yaitu simpanan)

C = pertambahan dalam bahang lingkungan tsb. (bahang terlata negatif)

Dalam jangka waktu beberapa hari dan sering dalam satu hari, simpanan bahang itu kecil saja jika dibandingkan dengan perubahan yang lain, dan hal yang sama itu benar pula untuk simpanan lingkungan, sehingga sampai batas galat yang kecil

$$H = E_o + K$$

Penyingkiran uap. Telah ditunjukkan bahwa penguapan dapat dinyatakan dengan

$$E_o = C(e_s' - e)f(u)$$

tetapi bahwa e_s' tidak bisa dinilai jika udara dan air berbeda suhunya.

Penmanlah yang kemudian membuat andaian bahwa pengangkutan uap dan pengangkutan bahang oleh perbauran olakan pada pokoknya tidak dikendalikan oleh mekanisme yang sama (yaitu golakgalikan atmosfer), karena yang satu dikuasai oleh $(e_s' - e)$, sedangkan yang lain oleh $(t_s' - t)$. Maka dari itu, sampai hampiran dekat

$$\frac{K}{E_o} = \beta = \frac{\gamma(t_s' - t)}{e_s' - e}$$

di sini γ = tetapan psikrometer

= 0,66 jika t dalam $^\circ C$ dan e dalam mbar

Sekarang karena

$$H = E_o + K = E_o(1 + \beta)$$

maka

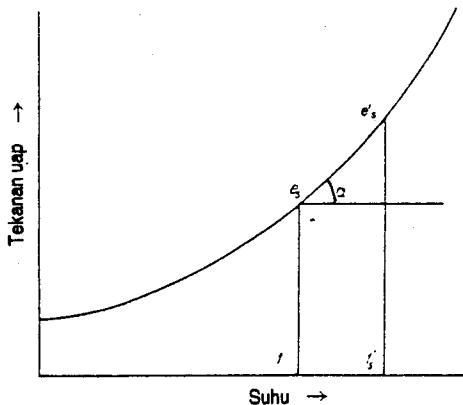
$$E_0 = \frac{H}{1 + \beta} = \frac{H}{1 + \gamma \frac{t_s' - t}{e_s' - e}}$$

Sekarang buang $t_s' - t$ dengan penyulihan, karena $t_s' - t = (e_s' - e)/\Delta$

dalam hal ini

e_s = tekanan uap jenuh pada suhu t

Δ = kemiringan lengkung tekanan uap pada t , = $\tan \alpha$ (lihat gambar 3.1).



Gambar 3.1 Lengkung tekanan uap jenuh

Ini masuk akal karena t_s' tidak pernah terlalu jauh dari t .

Jadi

$$E_o = \frac{H}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} \cdot \frac{e_s' - e_s}{e_s' - e}} \quad (3.5)$$

Sekarang e_s harus dihilangkan

Karena

$$e_s' - e_s = (e_s' - e) - (e_s - e) \quad (3.6)$$

dan dari persamaan 3.1

$$E_a = C(e_s - e)f(u)$$

sedangkan dari persamaan 3.3

$$E_o = C(e_s' - e)f(u)$$

kemudian

$$\frac{E_a}{E_o} = \frac{e_s - e}{e_s' - e} \quad (3.7)$$

E_a = penguapan (dalam arti energi) untuk hal yang bersifat hipotesis mengenai udara dan air yang suhunya sama.

Kemudian dengan nilai persamaan 3.6 dan 3.7 ke dalam persamaan 3.5, diperoleh

$$E_o = \frac{H}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} \left[\frac{(e_s' - e) - (e_s - e)}{e_s' - e} \right]}$$

dan

$$E_o = \frac{H}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} \left(1 - \frac{E_a}{E_o} \right)}$$

yang memberi

$$E_o = \frac{\Delta H + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

Δ mempunyai nilai yang diperoleh dari lengkung tekanan uap jenuh, secara khas dinyatakan

$t = {}^\circ\text{C}$	$\Delta = 0,36$
10	0,61
20	1,07
30	1,80

Dengan mengacu kepada persamaan 3.2 dan 3.4, masing-masing untuk E_a dan H , dapat dilihat bahwa E_o sekarang dihitung dari hasil pengamatan meteorologi baku atas suhu udara rata-rata, kelembaban nisbi, kecepatan angin pada ketinggian baku dan jam-jam penyinaran surya. Rumus itu telah diperiksa di banyak bagian dunia dan memberi hasil yang sangat baik. Karena didasarkan pada dasar fisika, rumus itu dapat diterapkan secara umum dan memberi nilai yang kiranya dapat berguna bagi banyak penelitian projek sampai dilengkapi dengan hasil pengukuran penguapan yang sebenarnya (lihat pasal 3.6).

Untuk menghindari kerja penghitungan yang terlalu banyak dalam penyelesaian persamaan Penman, maka oleh P.J. Rijkort dari Lembaga Meteorologi Kerajaan Belanda telah dirancang sebuah nomogram yang memungkinkan pembuatan penilaian dengan cepat. Nomogram itu tergambar sebagai lampiran C pada bagian belakang buku ini dengan seizin pembuatnya. Gambar itu dilukis untuk nilai R_c yang sedikit berbeda dengan yang digunakan oleh Penman, yaitu

$$R_c = R_A(0,20 + 0,48n/D)$$

Tabel 3.2

Garis lintang (derajat)	Utara	Jan.	Peb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Agust.	Sept.	Okt.	Nop.	Des.
	Selatan	Jul.	Agust.	Sep	Okt.	Nop.	Des.	Jan.	Peb.	Mart.	Apr.	Mai	Jun.
50°	8,5	10,1	11,8	13,8	15,4	16,3	15,9	14,5	12,7	10,8	9,1	8,1	8,3
48°	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3	8,7
46°	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7	8,9
44°	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14,0	12,6	11,0	9,7	9,1	9,1
42°	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,5	11,1	9,8	9,1	9,1
40°	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,3	9,3
35°	10,1	11,0	11,9	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8	9,8
30°	10,4	11,1	12,0	12,9	13,6	14,0	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2	10,2
25°	10,7	11,3	12,0	12,7	13,3	13,7	13,5	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6	10,6
20°	11,0	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9	10,9
15°	11,3	11,6	12,0	12,5	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2	11,2
10°	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5	11,5
5°	11,8	11,9	12,0	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1

sebagai pengganti rumus Penman $R_A(0,18 + 0,55n/D)$, tetapi selisih yang manapun akan lebih kecil daripada batas yang boleh terjadi untuk sembiran galat yang mungkin dalam penaksiran tutupan awan, sehingga hal itu dapat diabaikan.

Nilai untuk R_A dapat diturunkan untuk sebarang garis lintang dari tabel 3.1.

Di tempat tersedia data sebenarnya mengenai sinaran matahari, maka dapatlah digunakan tabel 3.2 untuk menentukan lebih cermat n/D . Di tempat data itu tidak tersedia, n/D dapat ditaksir dari memperkirakan tutupan awan dalam persepuhulan; yaitu, sepuluh-persepuluh adalah tutupan sempurna dan O persepuhulan adalah cerah sempurna. Nilai satuan dikurangi pecahan itu dapat digunakan untuk n/D . Misalnya, pada hari ketika sekitar tujuh-persepuluh langit tertutup awan, maka

$$n/D = (1 - 7/10) = 0,3$$

Orang harus membuat beberapa kali pengamatan setiap hari.

3.4 Penguapan dari permukaan daratan dengan menggunakan nilai Penman E_o

Penman berturut-turut melaporkan hasil percobaan yang dilakukan pada tanah bergambut dan tanah gundul untuk menentukan laju penguapannya (E_T dan E_B) jika dibandingkan dengan air terbuka (E_o)[2]. Ia menyimpulkan bahwa laju penguapan dari tanah gundul yang baru saja dibasahi ada di sekitar 90 persen daripada permukaan air terbuka yang terpajan pada cuaca yang sama. Yaitu

$$E_B/E_o = 0,90$$

Untuk permukaan berumput, didapat perbandingan yang tak teratur, dan angka sementara untuk gambut dengan air tersedia melimpah adalah sbb.:

Nilai E_T/E_o untuk Inggris bagian selatan

Nopember hingga Pebruari	0,6
Maret hingga April	0,7
September hingga Oktober	0,7
Mai hingga Agustus	0,8
Seluruh tahun	0,75

Semua angka itu kurang dari satu karena keterpantulan yang lebih besar dari tetumbuhan jika dibandingkan dengan air yang terbuka dan juga karena pemeluhan tumbuhan sebenarnya terhenti pada waktu malam.

3.5 Rumus Thornthwaite untuk penguappeluhan

Thornthwaite melakukan banyak percobaan di Amerika Serikat dengan menggunakan lisimeter dan secara luas mempelajari hubungan antara suhu dan penguappeluhan. Dari pekerjaan itu [3], ia mendapatkan cara yang memungkinkan orang membuat taksiran penguappeluhan yang mungkin dari tetumbuhan yang pendek dan yang dekat dengan penyediaan air yang memadai, pada garis lintang di Amerika Serikat.

Jika t_n = suhu bulanan rata-rata, dalam $^{\circ}\text{C}$, bulan berturut-turut dalam tahun (dengan $n = 1, 2, 3, \dots, 12$) dan j = ‘penunjuk bahang’ bulanan, maka

$$j = \left(\frac{t_n}{5} \right)^{1,514} \quad (3.8)$$

dan ‘penunjuk bahang’ tahunan, J , dinyatakan oleh

$$J = \sum_{1}^{12} j \quad (\text{untuk ke-12 bulan})$$

Penguappeluhan yang mungkin untuk sebarang bulan dengan suhu rata-rata $t(\text{C})$ kemudian diberikan sebagai PE_x ,

$$PE_x = 16 \left(\frac{10t}{J} \right)^a \text{ mm setiap bulan}$$

di sini

$$a = (675 \times 10^{-9})J^3 - (771 \times 10^{-7})J^2 + (179 \times 10^{-4})J + 0,492 \quad (3.9)$$

Tetapi PE_x adalah nilai bulanan baku menurut teori yang didasarkan pada penyinaran 30 hari dan 12 jam setiap hari. PE yang sebenarnya untuk bulan tertentu dengan suhu rata-rata $t(\text{C})$ dinyatakan dengan

$$PE = PE_x \frac{DT}{360} \text{ mm} \quad (3.10)$$

di sini

D = jumlah hari dalam bulan

T = jumlah rata-rata jam antara fajar dan matahari terbenam dalam bulan itu.

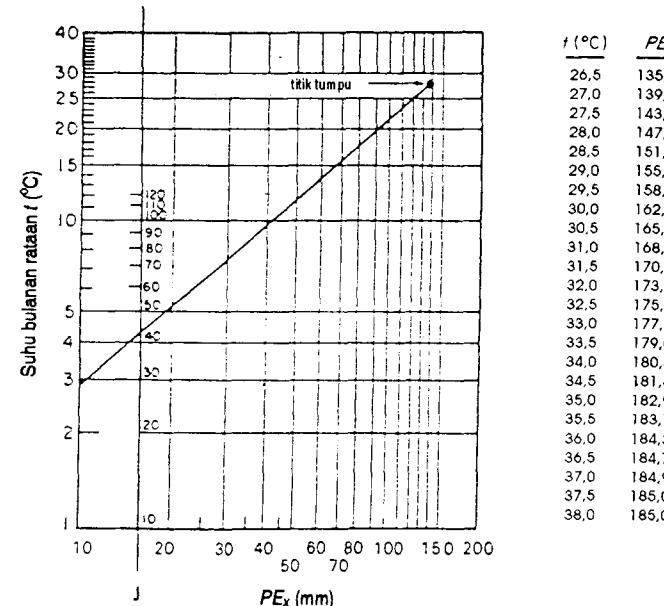
Cara itu telah diuji oleh Serra, yang menyarankan bahwa persamaan (3.8) dan (3.9) dapat disederhanakan sebagai berikut

$$j = 0,09t_n^{3/2}$$

$$a = 0,016J + 0,5$$

Cara menaksir penguappeluhan yang mungkin, bersifat empiris dan rumit dan memerlukan penggunaan nomogram untuk penyelesaiannya. Thornthwaite menerbitkan monogram yang demikian itu yang tertera dalam gambar 3.2.

Langkah pertama adalah memperoleh penunjuk bahang J . Dari gambar 3.2 perolehlah nilai kemungkinan penguappeluhan yang tidak disesuaikan, dengan menggambar sebuah garis lurus dari letak nilai J melewati titik tumpu $t = 26,5\text{C}$.



Gambar 3.2 Nomogram dan daftar untuk menemukan penguappeluhan yang mungkin, PE_x (menurut C.W. Thornthwaite. Atas kebaikan 'Geographical Review'; hak cipta American Geographic Society, New York)

(Jika t lebih besar dari 26,5C, gunakan daftar di samping gambar 3.2.) PE_x untuk bulan ybs kemudian dapat dibaca, yang bersesuaian dengan suhu rata-rata yang diberikan. Untuk setiap bulan dari 12 bulan itu diperoleh 12 nilai. Nilai yang semuanya tak disesuaikan itu kemudian dapat disesuaikan untuk panjangnya hari dan bulan dengan persamaan 3.10 dan dijumlahkan untuk memperoleh penguapan tahunan yang mungkin.

Orang telah menemukan bahwa cara itu memberikan hasil yang wajar, apa pun tutupan tetumbuhannya, meskipun jenis tumbuhan yang berbeda-beda dapat mempengaruhi nilai sebenarnya tempat tertentu. Rumus itu didasarkan pada suhu, yang tidak harus bersesuaian dengan sinaran surya yang masuk langsung, karena ‘kelembaman bahang’ daratan dan air. Tetapi pemeluhan memiliki sifat tanggap langsung terhadap penyinaran surya. Maka dari itu, kita harus berhati-hati jika menggunakan cara itu untuk memastikan bahwa persyaratan tersebut tidak berubah tiba-tiba dalam bulan tertentu meskipun jika digunakan angka-angka untuk bulan yang berturut-turut, boleh jadi selisih yang melonggok itu dapat diabaikan.

Untuk penelitian projek, cara ini merupakan pelengkap yang sangat berguna bagi pendekatan Penman, meskipun akan ditemukan, bahwa umumnya nilai penguappeluhan yang mungkin, adalah lebih tinggi ketimbang hasil dari cara yang kedua itu.

3.6 Pengukuran langsung dengan kancah penguap

Bilamana mungkin, pengamatan penguapan langsung haruslah dilakukan. Untuk itu alat yang digunakan berupa kancah penguap. Di Inggris, kancah baku persegi berukuran $1,83 \text{ m}^2$ (6 kaki kuadrat) dan dalamnya 610 mm (2 kaki) yang diisi air sampai setinggi 550 mm (1 kaki 9 inci) dan ditempatkan di tanah sehingga bibirnya menganjur 76 mm (3 inci) di atas tanah sekitarnya. Di seluruh Inggris, ada sekitar 30 tempat orang mengamati secara teratur penguapan dari kancah [4].

Di Amerika Serikat, kancah baku atau Kelas A bentuknya melingkar dengan garis tengah 1,22 m (4 kaki) dan dalamnya 254 mm (10 inci), yang diisi air sampai setinggi 180 mm (7 inci) yang terpasang pada perancah kayu dengan dasar kancah pada 150 mm (6 inci) di atas permukaan tanah. Pembacaan penguapan secara teratur dilakukan pada lebih dari 400 tempat.

Kancah jenis ketiga, biasanya digunakan di Inggris Raya, yaitu kancah Peirera, yang bentuknya juga melingkar seperti kancah kelas A tetapi lebih dalam dan dimasukkan ke dalam tanah dengan ruang udara tiga inci mengelilinginya.

Paras air dalam kancah penguapan merupakan hal yang ditentukan dan harus disetel setiap hari sehabis pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan sukat kait, dengan memberi kemungkinan bagi curah hujan masukan. Karena jumlah bulanan dan tahunan merupakan jumlahan banyak selisih kecil-kecil, dan masing-masing dengan peluang galat yang sama, maka pengamatannya harus dilakukan dengan sangat berhati-hati.

Kancah kelas A mempunyai jangka suhu harian yang lebih besar daripada kancah yang persegi, tetapi biasanya lebih homogen, sedangkan air dalam kancah yang persegi mungkin berlapis suhunya. Jika kecepatan angin berlipat dua kali, penguapan mungkin meningkat sampai 20 persen.

Kemampuan kancah dibandingkan dengan isi danau atau sungai, nisbi kecil, demikian pula kedalamannya. Letaknya pada atau di dekat permukaan tanah memungkinkan bahang terlata (teradveksi) dari atmosfer, sejumlah perbandingan yang lebih besar, untuk diserap oleh air di dalam kancah melewati tepi dan dasarnya, ketimbang oleh air terbuka di alam. Pada kancah yang satu hal itu terjadi lebih kuat daripada pada kancah yang lain. Maka dari itu penguapan kancah biasanya terlalu tinggi dan koefisien kancah perlu dimasukkan. Koefisien itu berkisar dari 0,65 hingga lebih besar dari satuan, bergantung pada ukuran dan tempat kancah itu. Umumnya kancah Inggris yang baku memiliki koefisien sekitar 0,92, sedangkan kancah kelas A, Kantor Cuaca Amerika Serikat sekitar 0,75, tetapi keragamannya cukup banyak. Law [5] melakukan uji banding selama 14 tahun pada dua tapak di Yorkshire dan menemukan nisbah penguapan dari kancah kelas A terhadap kancah Inggris yang persegi antara 1,17 dan 1,40 dengan rerata 1,32. Houk [6] memberikan laporan lengkap mengenai nilai kancah Amerika dan Olivier [7] mengutip banyak data dari sumber Afrika dan Timur Tengah.

Orang menemukan banyak kesulitan dalam menggunakan kancah untuk mengukur penguapan secara langsung. Hal itu timbul sebagai akibat kesulitan mengukur selisih sangat kecil-kecil pada ketinggian tempat. Dan, setelah itu, kesulitan dalam menggunakan koefisien untuk memperhubungkan hasil pengukuran pada tangki kecil dengan tubuh air yang besar-besar. Meskipun demikian, pengukuran di lapangan yang sebenarnya haruslah merupakan bagian penting dari setiap proyek penelitian penguapan.

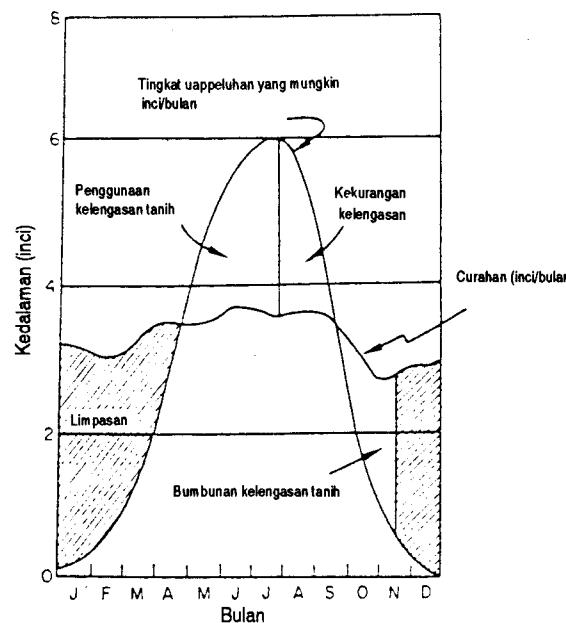
3.7 Pemakaian habis

Penguappeluhan adalah istilah yang digunakan untuk penguapan kelengasan dari permukaan bumi termasuk danau dan sungai dan tetumbuhan yang mungkin menutup daratan. *Pemakaian habis* menunjuk kepada penguapan dan

pemeluhan dari tetumbuhan yang hanya menutup daratan saja, sering dihubungkan dengan kebun dan pertanian dan kebutuhan pengairan. Kedua istilah itu sering dianggap berpadanan.

Pemakaian habis air di suatu daerah bergantung pada banyak faktor, termasuk iklim, penyediaan kelengasan tanah, tetumbuhan yang sedang tumbuh, jenis tanah, dan cara pengelolaan lahan. Faktor iklim mencakup curahan, suhu, kelembapan, angin dan garis lintang tempat ybs (yang berpengaruh terhadap lamanya musim tumbuh). Persediaan kelengasan bergantung selain pada rupabumi dan pengaliran bawah tanah, juga pada pencurahan. Jenis tanah dan pengelolaan lahan sangat beragam pada jarak berdekatan. Tidak ada rumus yang berlaku umum tetapi beberapa rumus empiris dapat digunakan dengan koefisien setempat untuk menentukan penggunaan-air tahunan di sebarang tempat dalam batas-batas yang luas.

3.7.1 Tanaman pertanian Pemakaian habis menunjuk kepada air yang digunakan dengan sebenarnya, sedangkan rumus penguappeluhan menyatakan penggunaan air yang mungkin. Dengan menunjuk kepada gambar 3.3 tampak,



Gambar 3.3 Diagram kekurangan kelengasan tanah tahunan yang khas [8]

bahwa untuk tempat tertentu, kecuali jika hujan jatuh bilamana diperlukan, mungkin akan terjadi kekurangan air di dalam musim tumbuh meskipun ada curah hujan yang cukup tinggi. Dalam hal seperti itu pemakaian habis lebih kecil daripada penguappeluhan yang mungkin dan ada petunjuk perlunya pemberian air pada musim tumbuh.

Menaksir pemakaian habis secara moderen mencakup pengembangan perhitungan penguapan air-terbuka secara Penman dan cara yang lebih empiris yang dikembangkan dari tatakerja Blaney-Criddle dari Bagian Pengairan dan Pelestarian Air, Jawatan Pelestarian Tanah, Departemen Pertanian Amerika Serikat [9].

Baik kedua cara itu maupun cara yang lain disajikan dengan contoh yang telah dikerjakan secara lengkap, dalam publikasi Badan PBB untuk Pangan dan Pertanian (10).

Karena kedua cara itu memerlukan pengacuan ke banyak gambar dan tabel, tidaklah layak untuk menyajikan uraian yang panjang lebar di sini. Meskipun demikian, di bawah ini diberikan ringkasan mengenai kedua pendekatan itu.

3.7.2 Cara Penman yang diubahsuai Cara ini bergantung pada hasil pengukuran meteorologi dan sangat boleh jadi menghasilkan taksiran kebutuhan air yang memuaskan.

Dari persamaan Penman yang asli diperoleh nilai hasil penguapan dari permukaan-air terbuka, E_o , dengan mempertimbangkan kedua suku H dan E_a , yang meliputi energi (sinaran) dan aerodinamika (angin dan kelembapan).

Suku E_o diubah untuk memperoleh hasil penguappeluhan dari permukaan lahan berrumput dengan mengalikan dengan koefisien tanaman sebesar sekitar 0,8. Telah ditunjukkan, bahwa ini adalah pendekatan yang masuk akal. Dalam hal ini yang berlaku adalah keadaan yang tenang, tidak hanya di Inggris, tempat perhitungan itu pertama kali dibuat, melainkan juga di daerah tropika dan daerah yang setengah gersang. Tetapi pada iklim yang lebih berangin, koefisien tanaman itu lebih menyimpang dari 0,8.

Di sini diperkenalkan bukan atau uappeluhan tanaman acuan baru ET_o . Batasannya adalah:

'tingkat uappeluhan dari permukaan yang tertutup rumput hijau setinggi 8 hingga 15 cm yang diluaskan; rumput itu tingginya seragam, tumbuh sehat, samasekali melindungi tanah dan tidak kekurangan air' [10]

Nilai ET_o untuk iklim dan tempat tertentu dihitung dari

$$ET_0^* = W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times (e_s - e)$$

ET_o^* = uappeluhan tanaman acuan yang tak tersesuaikan, mm/hari

w = faktor bobotan terkait-suhu

R = sinaran bersih dalam tara uapan, dalam mm/hari

$f(u)$ = fungsi terkait-angin

$(e_s - e)$ = selisih antara tekanan uap jenuh pada suhu udara rataan dan tekanan uap udara yang sebenarnya dalam mb.

ET_o kemudian ditemukan dari ET_o^* lewat penyesuaian untuk keadaan cuaca siang dan malam hari. Nasabannya disajikan secara grafik untuk berbagai keadaan angin dan kelembapan yang berbeda-beda.

Setelah ditentukan sebuah nilai untuk ET_o , kebutuhan air untuk tanaman $ET_{(tan)}$ ditemukan dari

$$ET_{(tan)} = k_c \times ET_0$$

Di sini k_c adalah koefisien tanaman, menggambarkan hasil penguappeluhan tanaman tertentu yang tumbuh dalam keadaan optimum (bagi iklim dan letaknya) dan memberi hasil optimum.

Nilai k_c daftar panjang berbagai tanaman yang ditanam di bawah keadaan angin dan kelembapan yang berbeda-beda, dan pada berbagai tingkat pertumbuhan tersedia pada [10]. Tabel 3.3 adalah contoh nilai k_c berbagai tanaman yang mewakili.

3.7.3 Cara Blaney-Criddle terubahsuai Cara Blaney-Criddle yang mula-mula, diperkembangkan oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat [9]. Di dalamnya tercakup suhu t dan persen jam hari terang p untuk menurunkan faktor penggunaan habis bulanan f . Kelembapan nisbi tidak diperhitungkan.

Jika yang digunakan inci, f kemudian dikalikan dengan k , koefisien pemakaian habis bulanan untuk tanaman tertentu.

Dalam cara yang terubahsuai, faktor pemakaian habis bulanan f dinyatakan dalam mm dan derajat Celsius:

$$f = p (0,46t + 8,13)$$

Di sini t adalah suhu rataan maksimum dan minimum harian pada bulan yang bersangkutan, dan p adalah rataan persen jam hari terang tahunan. Faktor f

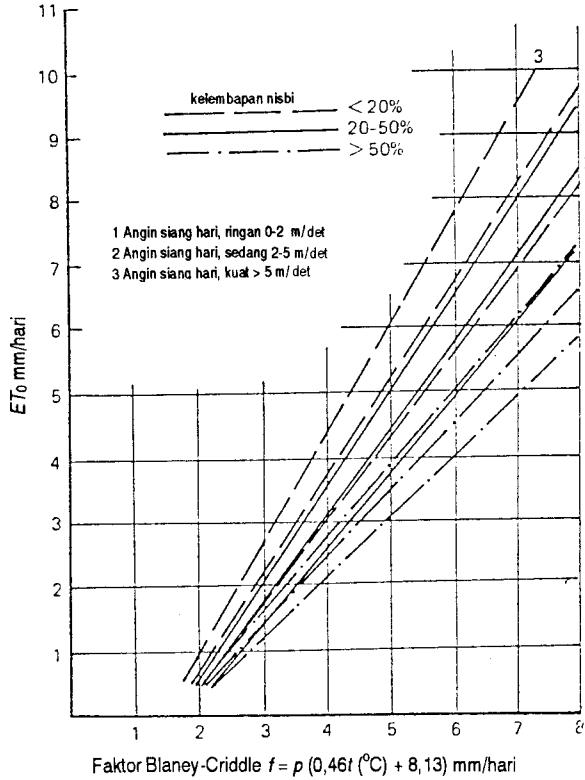
kemudian dinyatakan dalam mm/hari yang menggambarkan nilai rataan bulan ybs.

Dari semua nilai f itu, diberikan hubungan grafik yang menggambarkan nilai ET_0 yang setara untuk tiga tingkat kelembapan nisbi, tiga tingkat kecepatan angin, dan tiga tingkat keberawanhan (n/D).

Tabel 3.3 Koefisien k_c yang khas untuk tanaman pada berbagai tingkat pertumbuhan dan keadaan iklim yang lazim^a

Tanaman	Kelembapan		Kelembapan nisbi min > 70%		Kelembapan nisbi min <20%	
	Angin (m/det)	0–5	5–8	0–5	5–8	
<i>Barley</i>	panen tengah-musim	3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,25	0,25	0,2	0,2
<i>Wortel</i>		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,7	0,75	0,8	0,85
<i>Kapas</i>		3	1,05	1,15	1,2	1,25
		4	0,65	0,65	0,65	0,7
<i>Mentimun</i>		3	0,9	0,9	0,95	1,0
		4	0,7	0,7	0,75	0,8
<i>Flas (rami)</i>		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,25	0,25	0,2	0,2
<i>Melon</i>		3	0,95	0,95	1,0	1,05
		4	0,65	0,65	0,75	0,75
<i>Kacang tanah</i>		3	0,95	1,0	1,05	1,1
		4	0,55	0,55	0,6	0,6
<i>Kentang</i>		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,7	0,7	0,75	0,75
<i>Kedelai</i>		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,45	0,45	0,45	0,45
<i>Tomat</i>		3	1,05	1,1	1,2	1,25
		4	0,6	0,6	0,65	0,65
<i>Gandum</i>		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,25	0,25	0,2	0,2

^a Menurut: Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24 (PBB, FAO, Roma, 1975)



Gambar 3.4 ET_0 lawan f untuk perawanan menengah (n/D : 0,6-0,8), 3 keadaan angin dan 3 kelembapan nisbi. Menurut Kebutuhan-Air Tanaman; Irr. and Drainage Paper 24 (United Nations, FAO, Roma, 1975)

Pada gambar 3.4 terlukis gambaran tiga di antara sembilan gambaran dalam acuan [10].

Pada tabel 3.4 disajikan persenan harian rataan jam penyinaran siang hari untuk berbagai garis lintang.

Nilai ET_0 dan k , baik dengan cara Penman terubahsuai maupun dengan cara Blaney-Criddle adalah cocok, jadi hanya seperangkat nilai k_c yang diperlukan.

Tabel 3.4 Persenan harian rataan (p) jam siang hari tahunan untuk garis lintang yang berbeda-beda [10]

Garis lintang (derajat)	Utara	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Agust.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.	Nop.	Mai	Okt.	Apr.	Sept.	Mart.	Feb.	Jan.	Des. Jun.
60°		0,15	0,20	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13									
58°		0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,40	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15									
56°		0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16									
54°		0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17									
52°		0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17									
50°		0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18									
48°		0,20	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19									
46°		0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20									
44°		0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20									
42°		0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21									
40°		0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21									
35°		0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22									
30°		0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23									
25°		0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24									
20°		0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25									
15°		0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25									
10°		0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26									
5°		0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27									
0°		0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27									

Nilai ET_0 dan k , baik dengan cara Penman terubahsuai maupun dengan cara Blaney-Criddle adalah cocok, jadi hanya seperangkat nilai k_c yang diperlukan.

3.7.4 Hutan Karya pentama mengenai penghutanan kembali daerah tada dengan pembangunan waduk baru diterbitkan oleh Law [11]. Setelah itu, ia mengamati lisimeter seluas 450 m^2 hutan cemara Sitka selama jangka waktu 14 tahun. Beberapa di antara pengamatannya diterbitkan dalam buku ini terbitan yang lebih dahulu. Ringkasnya Law menunjukkan bahwa daerah tada di baruh yang berhutan menghasilkan kehilangan air yang lebih besar daripada jika penutupnya berupa rumput. Ini semula tidak diterima umum tetapi karya Law itu menggerakkan sederet penyelidikan jangka panjang yang lebih mendalam oleh Lembaga Hidrologi. Hal itu berlangsung lebih dari 15 tahun pada beberapa daerah tada di Inggris Raya di antaranya yang paling terkenal dan yang penelitiannya paling mendalam ialah DAS Plynnlinom, termasuk Sungai Severn dan Wye. Penelitian itu dilaporkan dengan selang selama jangka waktu tersebut [12, 13] dan telah menyebabkan timbulnya simpulan yang berharga dan kadang-kadang mengagetkan. Ringkasnya, simpulan itu adalah sbb.:

- 1 Dengan curah hujan tahunan sekitar 2300 mm, ada kehilangan air yang jauh lebih besar dari DAS yang berhutan daripada dari lahan berumput. Kehilangan dari DAS berhutan sekitar dua kali dari lahan berumput reratanya sekitar 850mm lawan 405mm.
- 2 Penyebab kehilangan yang lebih besar adalah cegatan curah hujan oleh sudur hutan dan setelah itu penguapan dari padanya.
- 3 Di bagian negeri lebih kering, dengan curah hujan tahunannya yang sekitar 600mm, DAS yang berhutan tidak lebih mungkin menyebabkan kehilangan daripada lahan yang berumput, dan pada beberapa pengamatan hutan cemara kenyataannya lebih kecil [14].
- 4 Rumus Penman untuk penguappeluhan sesuai benar dengan angka yang sebenarnya untuk DAS berumput tetapi angkanya jauh terlalu kecil untuk DAS berhutan di bagian negeri yang basah dan selama musim basah di daerah dengan curah hujan rendah.
- 5 Meskipun perlindungan pengikisan selalu merupakan tujuan penghutanan kembali, hal itu tidak selalu tercapai. Di tempat orang menerapkan parit untuk mengalirkan daerah hutan, pengikisan mungkin lebih besar daripada di lahan berumput. Hal inilah yang terjadi di DAS Plynnlimon, tempat orang mengukur bahan endapan selama lima tahun.
- 6 Dari pengamatan lisimeter ditemukan bahwa sekitar 50 hingga 55 persen curah hujan pada sudur hutan menembus hingga lantai hutan, sedangkan

12 sampai 23 persen lagi mencapai paras tanah lewat aliran batang pohon, sehingga antara 22 dan 38 persen menguap dari sudur tersebut.

- 7 Tutupan hutan dewasa menyusutkan aliran puncak dengan sekira sepetiga dibandingkan dengan lahan berumput, tetapi di tempat orang telah menggali parit penyalir untuk penanaman pohon mungkin saja ada penambahan aliran dan waktu tanggap yang lebih pendek jika dibandingkan dengan lahan berumput, terutama pada waktu pohon masih belum dewasa.

Para insinyur air yang berhubungan dengan penggunaan lahan di DAS yang berwaduk harus menyadari bahwa jika curah hujan tahunan lebih tinggi daripada rerata, maka penghutanan kembali akan menambah kehilangan air, apa pun manfaatnya.

Acuan

- 1 Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc., A* **193**, (April 1948) 120
- 2 Penman, H.L. Evaporation over the British Isles. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **76** (1950) 372
- 3 Thornthwaite, C. W. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Rev.*, **38** (1948) 55
- 4 *British Rainfall 1939* (dan tahun-tahun berikutnya), H.M.S.O., London
- 5 Law, F. The aims of the catchment studies at Stocks Reservoir, Slaidburn, Yorkshire. Hubungan tak diterbitkan kepada Kelompok Hidrologi Pennine, Institution of Civil Engineers, September 1970
- 6 Houk, I. E. *Irrigation Engineering*, Vol. 1, Wiley, New York, 1951
- 7 Olivier, H. *Irrigation and Climate*, Arnold, London, 1961
- 8 THORNTHWAITE, C. W. The moisture factor in climate. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **27**, No. 1 (February 1946) 41
- 9 Blaney, H. F. dan Criddle, W. D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *Div. Irr. Water Conserv., S.C.S. U.S. Dept. Agr.*, SCS-TP-96, Washington D.C., 1950
- 10 Doorenbos, J. & PRUTT, W.O. Crop Water Requirements, *Irrigation and Drainage Paper 24*, F.A.O., PBB, Roma, 1975
- 11 Law, F. The effect of afforestation upon the yield of water catchment areas. *J. Brit. Waterworks Assoc.*, **38** (1956) 484

- 12 Water balance of the headwater catchments of the Wye and Severn 1970-75. *Report No. 33. Institute of Hydrology*, Wallingford, United Kingdom, December 1976
- 13 Newson, M.D. The results of ten years' experimental study on Plynlimon, Mid-Wales, and their importance for the water industry. *J. Inst. Water Eng. Sci.*, **33** (1979) 321-33
- 14 Gash, J.H.C. and STEWART, J. B. The evaporation from Thetford Forests during 1975. *J. Hydrol.*, **35** (1977) 385-96

Bacaan lebih lanjut

- Blaney, H.F. Definitions, methods and research data, A symposium on the consumptive use of water. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **117** (1952) 949
- Blaney, H.F. dan CriddleE, W.D. Determining consumptive use and irrigation water requirements. *USDA (ARS) Tech. Bull.* 1275, 1952
- Criddle, W.D. Consumptive use of water and irrigation requirements. *J. Soil Water Conserv.*, 1953
- Criddle, W. D. Methods of computing consumptive use of water. Paper 1507. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **84**, (January 1958)
- Fao/Unesco. *International Sourcebook on Irrigation and Drainage of Arid Lands*, Unesco, Paris, Hutchisonson, London, 1973
- Fortier, S. dan Young, A. A. *Bull. U.S. Dept. Agr.* 1340 (1925), 185 (1930), 200 (1930), 379 (1933)
- Hickox, G. H. Evaporation from a free water surface. Paper 2266. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **111** (1946), and discussion by C. Rohwer
- Hill, R. A. Operation and maintenance of irrigatin systems. Paper 2980. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **117** (1952) 77
- Horsfall, R. A. Planning irrigation projects. *J. Inst. Eng. Australia*, 22, No. 6 (June 1950)
- Lowry, R. dan Johnson, A. R. consumptive use of water for agriculture. Paper 2158. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **107** (1942), and discussion by R.E. Rule, E. E. Foster, H. F. Blaney & R. W. Davenport
- Penman, H. L. Estimating evaporation. *Trans. Am. Geophys. Union*, **31** (February 1956) 43

- Rohwer, C. Evaporation from different types of pans. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **99** (1934) 673
- Stewart, J.J. HAGAN, R.M. Functions to predict effects of crop water deficits, *ASCE, J. Irrigation and Drainage Div.*, **99** (1973) 421
- Stewart, J.J., HAGAN, R.M., PRUTT, W.O Fuctions to predict optimal irrigation programs, *ASCE, J. Irrigation and Drainage*, **100** (1974) 179
- White, W.N.A Method of estimating ground water supplies based on discharge by plants and evaporation from soil. Results of investigations in Escalante Valley, Utah. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper 659-A*, Washington D.C., 1932

Soal

- 3.1 Tentukan penguapan dari permukaan air bebas dengan menggunakan nomogram Penman untuk hal yang berikut

Tempat	Bulan	Suhu	jam	n/D	U ₂
Amsterdam (52°U)	Juli	18°C	0,5	0,5	1,2 m/det
Seattle (47°U)	Januari	4°C	0,8	0,3	1,5 m/det
Khartoum (16°U)	Juni	30°C	0,2	1,0	0,9 m/det

- 3.2 Gunakan nomogram itu untuk memecahkan persamaan Penman untuk memprakirakan kemungkinan penguappeluhan dari sebuah ladang pada garis lintang 40°N pada bulan April di bawah persyaratan yang berikut: suhu udara rataan = 20°C; jam rataan = 70 persen; tutupan udara = awan 60 persen; U₂ rataan = 2,5 m/s; nibah kemungkinan penguappeluhan lawan kemungkinan penguapan = 0,7.
- 3.3 Hitung kemungkinan penguappeluhan menurut Thronthwaite untuk dua tempat A dan B dengan hasil data iklim setempat sbb.:

	A	B	Lama hari terang pada tahun di A (persen)		A	B	Lama hari terang pada tahun di A (persen)	
			Januari	Pebruari	Maret	April	Mai	Juní
	-5	-2	6	7	7,5	8,5	10	11
	0	2	7	8	13	9	5	14
	5	3	7,5	8,5	10	8	3	10
	9	7	8,5	9	13	10	7	8,5
	13	10	10	9	17	10	5	7,5
	17	15	11	10	13	10	0	6

- a di A untuk April (suhu rataan 10°C) dan Nopember (suhu rataan 3°C).
 b di B untuk June (suhu rataan 20°C) dan Oktober (suhu rataan 8°C).

Di A banyaknya jam rerata antara fajar dan saat matahari terbenam adalah 13 untuk April dan 9 untuk September. Untuk B angka itu adalah 14 untuk Juni dan 10 untuk Oktober. Gunakan cara penyederhanaan Serra untuk A dan nomogram tadi untuk B.

- 3.4 Air berkerapatan tertinggi pada 4°C ; di atas dan di bawah suhu itu kerapatannya kurang. Gambarkan sebuah danau dalam suatu wilayah yang suhu udaranya menurun di bawah 4°C dalam musim dingin.
 a Uraikan apa yang akan terjadi dalam musim semi dan musim gugur.
 b Apakah akibat dan apakah yang akan terjadi pada i waktu puncak antara suhu udara dan suhu air? ii laju penguapan dalam berbagai musim?
 c Adakah suatu selisih jika suhu musim dingin tidak menurun di bawah 4°C dan jika ada jelaskan mengapa.
- 3.5 Dengan menggunakan cara Blaney-Criddle yang terubahsuai, tentukan kebutuhan air untuk tanaman kapas yang sedang tumbuh di tengah-musim dalam keadaan sangat kering di suatu tempat pada lintang 30°N pada bulan Pebruari, ketika suhu harian rataannya adalah 28°C , dan kecepatan angin rataan 4 m/detik.
- 3.6 Bicarakan keuntungan dan kerugian kancah penguapan yang ditempatkan di atas permukaan tanah (misalnya kancah Kelas A Amerika Serikat) dan diperbandingkan dengan kancah yang dimasukkan ke dalam tanah.
- 3.7 Gambarkan anggaran air untuk 100 satuan curah hujan yang jatuh pada hutan cemara di iklim pantai daerah sedang. Bicarakan proses yang terlibat dan tunjukkan perbandingan hujan yang terlibat dalam masing-masing.
- 3.8 Bicarakan secara lengkap teori penguapan Penman untuk permukaan air terbuka. Tunjukkan bagaimana setiap parameter yang digunakan mempengaruhi penguapan dan bicarakan bagaimana teori itu berbeda dari rumus penguapan lain.
- 3.9 Sebuah waduk besar terletak pada garis lintang $40^{\circ}30'U$. Hitung uapan danau bulanan dan tahunan untuk waduk itu dari data yang diberikan dengan menggunakan nomogram teori Penman. Jika uapan kancah Kelas A pada waduk itu untuk setahunnya adalah 1143 mm, hitung koefisien kancahnnya. Dengan mengandaikan bahwa curahan di danau itu sama dengan yang diberikan dan bahwa limpasan mewakili tumpahan air yang tak dapat dihindari dari curahan tersebut selama banjir, berapakah

kehilangan tahunan bersih yang dapat diharapkan dari waduk tersebut setiap kilometer persegi permukaan, dalam meter kubik setiap hari?

Apa kiranya perubahan hasil *penguapan* untuk bulan Juli jika waduk itu pada 40°S ?

	Suhu udara ($^{\circ}\text{C}$)	Titik embun ($^{\circ}\text{C}$)	Kecepatan angin rerata (m/det)	Tutupan awan sepersepuluh	Curahan (mm)	Limpasan (mm)
Okt	14,4	7,8	0,8	5,9	51	–
Nop	8,3	1,7	1,3	7,2	99	23
Des	3,9	2,2	1,7	9,5	102	43
Jan	2,2	1,9	2,1	8,7	117	58
Peb	2,2	1,4	2,2	6,3	91	20
Mar	4,4	1,1	1,3	5,1	69	12
Apr	8,9	3,3	1,1	3,4	51	–
Mai	15	10	0,9	2,6	28	–
Jun	20	15,6	0,8	0,2	3	–
Jul	23,9	16,7	0,75	0,1	0	–
Agu	22,8	17,8	0,7	0,0	0	–
Sep	17,8	12,8	0,75	1,5	20	8

- 3.10 Ada usul membangun sebuah waduk di daerah pegunungan untuk keperluan persediaan air. Letaknya pada garis lintang 20°U . Ternyata, Juni merupakan bulan yang gawat dan nilai bulan Juni untuk berbagai parameter adalah sbb.:
 suhu udara 24°C ; kelembapan udara 0,6;
 kecepatan angin 2 m di atas permukaan, 2,5 m/det; tutupan awan 10%
 Waduk itu mempunyai luas permukaan 300 km^2 . Ada sungai yang mengalir masuk ke dalam waduk itu dan rerata jangka waktu lama pengaliran masuk untuk Juni adalah $28\text{ m}^2/\text{det}$.
 Hitung pengaliran masuk bersih ke dalam waduk itu untuk rerata bulan Juni.

Peresapan dan penelusan

4.1 Daya resap tanah

Bila hujan jatuh di atas tanah yang terjadi pertama-tama tetumbuhan atau tanah yang gundul menjadi basah. Bila penutup tanah itu telah benar-benar menjadi basah, hujan berikutnya dapat menembus lapisan permukaan, jika permukaan itu memang dapat meluluskan air, atau melimpas lewat permukaan itu dan menuju ke alur sungai, jika permukaan itu ternyata kedap.

Jika lapisan permukaan itu sarang atau dapat ditembus air karena memiliki ‘lorong’ kecil-kecil yang dapat dilewati titik air kecil-kecil, air itu *meresap* ke tanah bawahnya. Sekali air yang yang meresap itu melewati lapisan permukaan, air itu *menelus* ke bawah karena pengaruh gayaberat sampai mencapai lajur jenuh pada *permukaan freatik*.

Tanah yang berbeda-beda menyebabkan air meresap dengan laju yang berbeda-beda pula. Setiap tanah memiliki daya resap yang berbeda, f , yang diukur dalam mm/jam. Misalnya, dapat dibayangkan bahwa hujan yang jatuh pada tanah berkerikil atau berpasir akan cepat meresap ke dalam, dan dengan syarat permukaan freatik ada di bawah permukaan tanah, bahkan hujan yang lebat pun tidak akan menimbulkan limpasan atau larian. Begitu juga, tanah berlempung menolak peresapan dan permukaannya akan tertutup air bahkan pada hujan yang kecil sekali pun. Tingkat curahan hujan, i , pun nyata berpengaruh terhadap berapa banyak air hujan yang dapat meresap dan berapa yang akan melimpas.

4.2 Berbagai faktor yang berpengaruh terhadap f_c

Nassif dan Wilson [1] baru-baru ini melakukan penelitian yang mendalam mengenai peresapan dengan menggunakan penadah laboratorium dengan luas

25m^2 . Mereka berkesimpulan, bahwa bagi sebarang tanah yang terpajan oleh curahan hujan yang tetap, peresapan menurun sesuai dengan persamaan dalam bentuk yang pertama kali digunakan oleh Horton [2].

$$f = f_c + \mu e^{-Kt}$$

di sini

f = laju peresapan pada sebarang waktu t (mm/jam)

f_c = daya resap pada nilai besar t (mm/jam)

μ = $f_o - f_c$

f_o = daya resap mula-mula pada $t = 0$ (mm/jam)

t = waktu sejak awal pencurahan hujan (men)

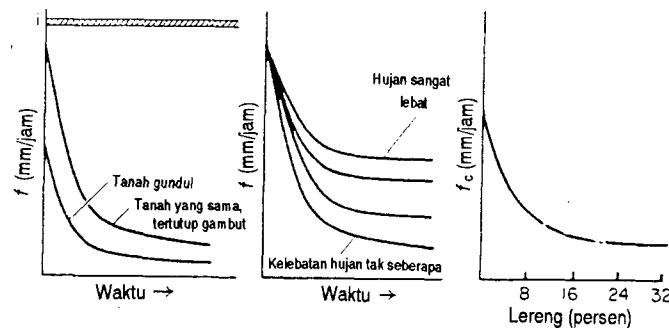
K = tetapan untuk tanah dan permukaan tertentu (men^{-1})

K merupakan fungsi tekstur permukaan: yaitu, jika ada tetumbuhan, K adalah kecil, sedangkan dengan tekstur permukaan yang lebih halus seperti tanah gundul, akan diperoleh nilai yang lebih besar.

f_o dan f_c adalah fungsi jenis tanah dan tutupan. Sebagai misal, tanah berpasir atau berkerikil yang gundul memiliki nilai f_o dan f_c yang tinggi dan tanah berlempung yang gundul memiliki nilai f_o dan f_c yang rendah tetapi kedua nilai itu naik untuk kedua jenis tanah itu jika berakar rumput.

f_c adalah fungsi: i lereng, sampai suatu nilai pembatas (berkisar antara 16 dan 24 persen), ii kadar kelengasan awal -- makin kering tanah pada awalnya, makin besarlah f_c , tetapi keragamannya menurut perbandingan hanya kecil saja, dan iii kelebatan hujan — jika kelebatan i itu naik, f_c pun naik, dan paramater ini memiliki pengaruh yang lebih besar pada f_c ketimbang peubah yang mana pun.

Semua hubungan itu terlukis pada gambar 4.1 untuk tanah pertanian yang khas. Tabel 4.1 menyenaraikan beberapa di antara nilai K , f_o dan f_c yang mewakili



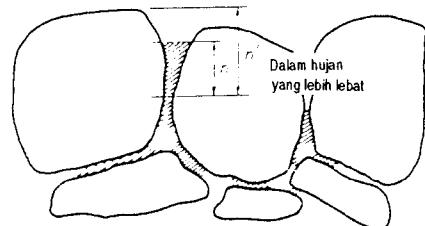
Gambar. 4.1 Keragaman daya resap

untuk berbagai jenis tanah. Parameter K dan f_0 nisbi mantap untuk tanah tertentu dan tidak berbeda-beda secara nyata dengan lereng DAS atau kelebatan hujan; sebaliknya, f_c berbeda-beda besar dengan kedua-duanya dan dengan demikian digambarkan sebagai rentang nilai.

Tabel 4.1 Nilai K , f_0 dan f_c yang mewakili untuk jenis tanah yang berbeda-beda

Jenis tanah	f_0 mm/jam	f_c mm/jam	K menit^{-1}
pertanian baku	gundul	280	1,6
	berakar rumput	900	0,8
gambut		325	1,8
berpasir halus	gundul	210	2,0
	berakar rumput	670	1,4

Hingga akhir-akhir ini umumnya orang mengira bahwa f_c merupakan tetapan untuk tanah tertentu tetapi ini agaknya tidak demikian. Laju peresapan ternyata dikendalikan terutama oleh pori di permukaan. Bahkan pada kenaikan hulu hidrostatik yang kecil pada pori itu dihasilkan kenaikan pengaliran melewati permukaan tanah. Jika lapisan permukaan dibayangkan sebagai terlukis pada gambar 4.2 dengan butiran tanah ditunjukkan pada permukaan, maka faktor pengendali adalah hulu h di atas potongan melintang terkecil pori. Hal itu terus naik dengan kelebatan hujan hingga suatu nilai batas tercapai dan limpasan menghalangi kenaikan lebih lanjut. Agaknya tidak mungkin persyaratan batas ini sering tercapai dalam keadaan alamiah.



Gambar 4.2 Hulu hidraulik pada pori butiran tanah

Para peneliti terdahulu [3] menemukan hasil serupa tetapi menganggap penyebab kenaikan pada f_c itu adalah kelebatan hujan yang lebih tinggi karena ketiadaan keseragaman DAS percobaan mereka. Yang lain juga menekankan secara berlebihan pentingnya *lapisan permukaan tanah* [4].

Tingkat resapan tanah adalah jumlahan telusan dan air yang masuk dalam simpanan di atas muka air tanah. Umumnya tanah jauh dari jenuh, jadi penyimpanan bertambah terus untuk jangka waktu yang lama. Maka dari itu, f_c terus menurun di bawah kelebatan hujan tunak untuk jangka waktu yang sama panjangnya.

Meskipun demikian, tanah akhirnya akan menjadi jenuh juga jika hujan kanjang. Semua tempat dalam ruang antarbutiran pun terisi air. Bila hujan berhenti, tanah berangsur-angsur kehilangan air ‘bebas’-nya sampai tingkat air itu mampu menopang air yang terkandung dalam tanah terhadap gravitasi; artinya, air tidak lagi meniris. Pada tingkat itu orang menyebut tanah ada pada *kapasitas lapang*.

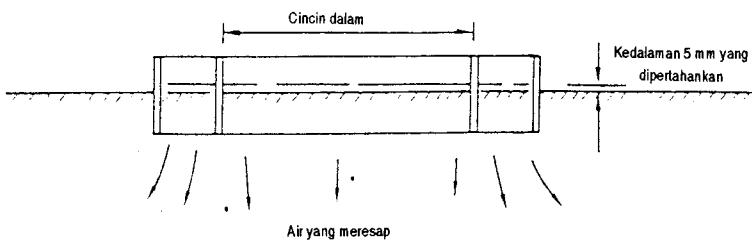
Tanah yang terbuka bisa menjadi hampir kedap akibat benturan tetesan hujan besar-besaran yang memadatkan ditambah lagi kecenderungan air menghanyutkan butiran yang halus dan masuk ke dalam lowong yang ada. Permukaan tanah cenderung menjadi ‘tersumbat’ dan nilai f_c pun merosot tajam. Demikian pula, pemadatan oleh manusia atau hewan yang menginjak-injak permukaan tanah, atau akibat lalulintas kendaraan, dapat sangat menurunkan daya resap tanah.

Tutuhan tetumbuhan yang rapat seperti rumput atau hutan cenderung menyebabkan nilai f_c naik hingga tinggi. Perakaran rapat, yang memungkinkan tanah bawah dapat dicapai, lapisan bahan rombakan tumbuhan berupa lapisan bak-sepon, binatang dan serangga penggali lubang yang membuat jalan ke dalam tanah, penutup tanah yang mencegah pemadatan dan pemeluhuan oleh tetumbuhan yang menghilangkan kelengasan tanah, semua itu cenderung menambah peresapan.

Pengaruh lainnya yang akibatnya tak seberapa pada susutnya peresapan adalah hanyutnya garam yang dapat larut, mengeringnya rekahan yang menambah f_0 , tersekapnya udara di ruang antar-butiran, dan di daerah bergaris lintang tinggi, pembekuan air di dalam tanah yang dalam bahasa Inggris disebut *frost heave* (caduk akibat pembekuan). Suhu ada juga pengaruhnya karena pengaliran dalam ruang antar-butiran bersifat mengari dan karena itu kekentalan ada pengaruhnya langsung terhadap perlawanannya pada pengaliran. Jika semua hal sama, f_0 dan f_c akan memiliki nilai yang lebih tinggi pada musim yang lebih panas.

4.3 Cara menentukan daya resap

4.3.1 Infiltrometer Infiltrometer adalah sebuah tabung pendek yang bergaris tengah lebar, atau perbatas kedap lainnya yang mengelilingi suatu luasan tanah. Biasanya dua cincin yang demikian itu digunakan secara sepusat seperti yang terlukis pada gambar 4.3. Cincin itu tergenang hingga sedalam 5 mm di atas permukaan dan diisi kembali terus-menerus untuk mempertahankan kedalaman tadi, dan pemasukan air ke tabung yang tengah diukur. Tujuan tabung yang luar ialah untuk meniadakan sampai batas tertentu pengaruh pinggiran dari tanah yang lebih kering yang mengelilinginya. Uji yang demikian itu memberikan hasil pembanding yang berguna tetapi tidak mengimak keadaan yang sebenarnya dan kini sebagian besar telah diganti dengan uji pendiris pada luasan tanah yang lebih besar. Di sini pendiris itu mengimak curahan hujan, dan limpasan dari petak yang bersangkutan dikumpulkan dan diukur demikian pula banyaknya air yang masuk; selisihnya dianggap sebagai jumlah resapannya.



Gambar 4.3 Infiltrometer

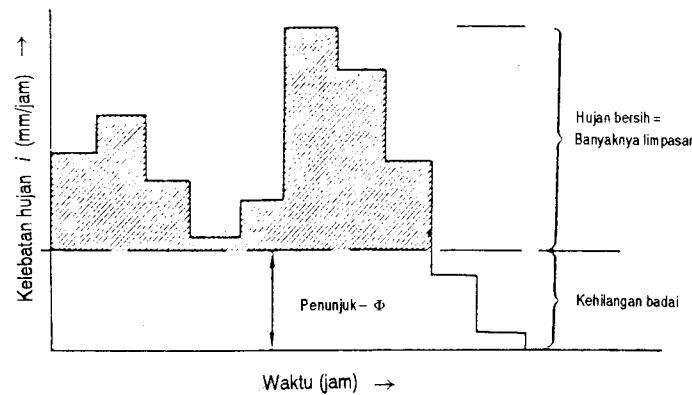
Memang pendiris yang mengimak hujan itu jauh lebih mendekati kenyataan daripada cincin yang digenangi tetapi ada pembatas bagi keandalan hasil yang diperoleh yang biasanya f -nya lebih tinggi daripada dalam keadaan alamiah. Untuk akibat kualitatif, misalnya perbandingan antara keadaan vegetasi, jenis tanah dsb yang berbeda-beda, cara itu sederhana dan kena.

Hasil yang taatasas dan dapat diulang, dapat diperoleh dengan menggunakan gawai penangkap ukuran laboratorium dengan pengimak hujan; banyak serta tebal tanahnya dari alam terwakili secara memadai. Nassif dan Wilson [1] menggunakan 7 ton tanah pada lapisan setebal 200 mm, dan mengukur semua air yang masuk dan keluar dan perubahan dalam simpanan. Alat sebagaimana mereka gunakan adalah pembanding yang sangat baik dan mungkin angkanya untuk resapan mutlak, tetapi keadaan alamiah tidak seluruhnya terimak karena ada tekanan atmosfir pada dasar tanah di laboratorium padahal di alam hal ini tidak ada.

4.3.2 Analisis curahan-limpasan DAS Beberapa peneliti mencoba untuk memperbaiki infiltrometer diris dengan memilih DAS kecil yang ‘serbasama’ dan mengukur secara hati-hati curahan, uapan dan pengaliran keluar sebagai limpasan permukaan. Dengan menghilangkan semua kecuali resapan, nilai f rata-rata dapat diperoleh untuk DAS yang demikian itu dengan cara yang disajikan oleh Horton [5] dan Sherman [6].

Yang masih ada kesulitan ialah memastikan bahwa tidak ada pengaliran bawah tanah yang tak terekam, demikian pula tak ada keragaman dalam simpanan dalam lapisan pembawa air di dalam tanah sehingga meskipun diperoleh hasil kuantitatif, analisis itu rumit dan batas galatnya luas.

4.3.3 Cara penunjuk $-\Phi$ Dalam praktek, kita bisa memperoleh *penunjuk peresapan* yang memungkinkan kita membuat hampiran yang masuk akal mengenai kehilangan oleh resapan. Salah satu di antaranya ialah *penunjuk $-\Phi$* yang ditentukan oleh kelebatan curah hujan rata-rata yang volum curah hujan di atasnya sama dengan volum limpasan. Pada gambar 4.4 terlukis rajahan badai hujan dengan dasar waktu dengan kelebatan jam-jaman rata-ratanya. Daerah gelap di atas garis putus-putus menggambarkan limpasan yang terukur, dalam mm, di atas daerah tadih. Karena daerah yang tak gelap di bawah garis adalah curah hujan terukur tetapi yang tidak tampak sebagai limpasan, daerah itu menggambarkan semua yang hilang, termasuk tangkapan permukaan dari uapan demikian pula resapan. Tetapi resapan itu merupakan kehilangan yang terbesar di banyak daerah tadih dan meskipun ini merupakan cara yang kasar dan cepat (karena tidak memperhitungkan keragaman dalam f sejalan dengan waktu) tetapi

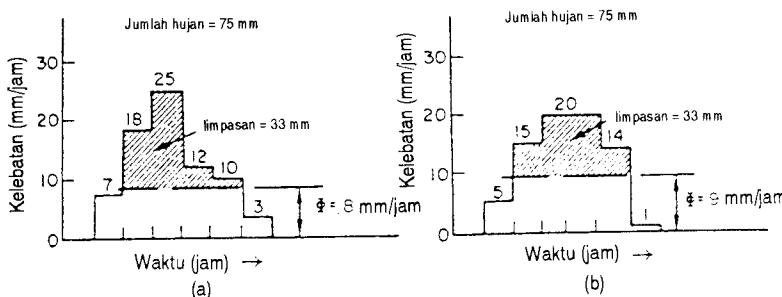


Gambar 4.4 Kehilangan resapan dengan penunjuk- Φ

cara itu terpakai luas sebagai sarana untuk menaksir dengan cepat limpasan yang mungkin dari daerah tadih yang besar untuk badai hujan tertentu.

Contoh 4.1 Diberikan hujan sejumlah 75 mm sebagaimana tertera pada gambar 4.5(a) dan larian permukaan setara 33 mm; tentukan penunjuk Φ untuk daerah tadih itu. Garis penunjuk Φ digambarkan demikian rupa sehingga daerah yang gelap di atasnya memberi limpasan sebanyak 33 mm. Dalam hal ini penunjuk itu adalah 8 mm/jam.

Namun, andaikan bahwa jumlah hujan yang sama itu tersebar sebagaimana terlukis pada gambar 4.5(b). Untuk memperoleh limpasan 33 mm di atas garis penunjuk Φ diperlukan kenaikan garis itu sehingga diperoleh nilai penunjuk sebesar 9 mm/jam. Maka dari itu dapat dilihat bahwa satu penentuan sebuah penunjuk Φ itu nilainya hanya terbatas dan bahwa banyak penentuan yang demikian itu harus dibuat, dan dirata-ratakan, sebelum penunjuk tadi digunakan.



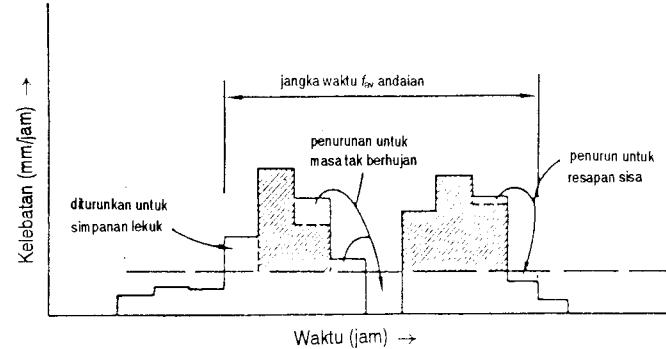
Gambar 4.5 Contoh menghitung penunjuk- Φ

4.3.4 Cara f_{av} Cara ini hasil pengembangan penunjuk Φ , karena dengan cara itu diusahakan untuk memperhitungkan simpanan lekukan dan waktu pendek tak berhujan selama badai, demikian pula penghilangan semua masa hujan dengan kelebatan curahan lebih kecil daripada daya resap yang diandaikan.

Dengan mengacu pada gambar 4.6 kedudukan secara kira-kira garis f_{av} ditentukan dengan mengacu kepada data larian dan lengkung hujan. Garis itu kemudian digeser menegak sampai berbagai kehilangan itu diimbangi dan nilai larian terpenuhi. Perkiraaan kehilangan itu didasarkan pada data apapun yang tersedia dan penilaian orang yang membuat analisis itu dan karena itu tentunya

subjektif, tetapi dari analisis banyak badai, nilai f_{av} dapat diturunkan untuk berbagai keadaan.

Pada penggunaan nilai f_{av} yang diturunkan pada badai hujan untuk memprakirakan limpasan yang diharapkan, masa hujan yang terletak di luar masa f_{av} diandaikan hilang dan hujan bersihnya diperoleh langsung setelah menyisipkan kehilangan menurut taksiran sebagaimana terlukis. Butler [7] memberikan laporan rinci mengenai cara ini.



Gambar 4.6 Contoh sebaran f_{av}

4.4 Kelengasan tanah

4.4.1 Keadaan kelengasan tanah mula-mula Cara untuk menaksir kehilangan yang telah dibahas tadi, pada pokoknya didasarkan pada rekaman curah hujan dan limpasan untuk daerah tadih tertentu dan kelakuannya pada curahan hujan dengan kelebatan yang berbeda-beda. Semua cara itu menunjukkan nilai daya resap yang membatasi secara rata-rata; keterangan itu diperoleh dari daerah tadih secara menyeluruh dan tidak dengan menerok daerah yang sangat kecil-kecil sebagaimana dilakukan dengan infiltrometer. Tetapi cara itu tidak memungkinkan prakiraan dengan sebarang ketelitian tentang banyaknya curah hujan yang akan terserap oleh tanah dan dengan demikian hilang oleh limpasan dalam hal yang khusus, karena ini bergantung di antaranya pada keadaan kebasahan tanah pada awal hujan turun. Selain berpengaruh terhadap limpasan lewat daya simpan, kelengasan tanah mula-mula mempengaruhi daya resap dan demikian juga limpasan pada tahap awal badai. Maka dari itu pengukuran yang lain untuk parameter ini perlu, jika peramalan limpasan memang harus dibuat

dari curah hujan yang ditentukan. Penunjuk- atau cara f_{av} hanya memberi nilai rata-rata yang dalam hal tertentu menyimpang jauh dari kenyataan sebenarnya, dan semua cara itu hanya dapat terpakai sebaik-baiknya setelah kehilangan awal dapat dinilai secara tersendiri.

Ada dua pendekatan terhadap masalah ini yang dibicarakan di sini. Yang pertama adalah *Penunjuk curahan sebelumnya*, yang digunakan di Amerika Serikat, dan yang kedua, *Kekurangan kelengasan tanah yang ditaksir*, yang dipakai di Inggris.

4.4.2 Penunjuk curahan sebelumnya Penunjuk curahan sebelumnya didasarkan pada dalil bahwa kelengasan tanah menyusut dengan laju yang sebanding terhadap banyaknya kelengasan yang tersimpan dalam tanah. Maka dari itu ada hubungan yang bersifat logaritma

$$I_t = I_0 k^t \quad (4.1)$$

di sini

I_0 = nilai awal penunjuk (mm)

I_t = nilai penunjuk t hari kemudian

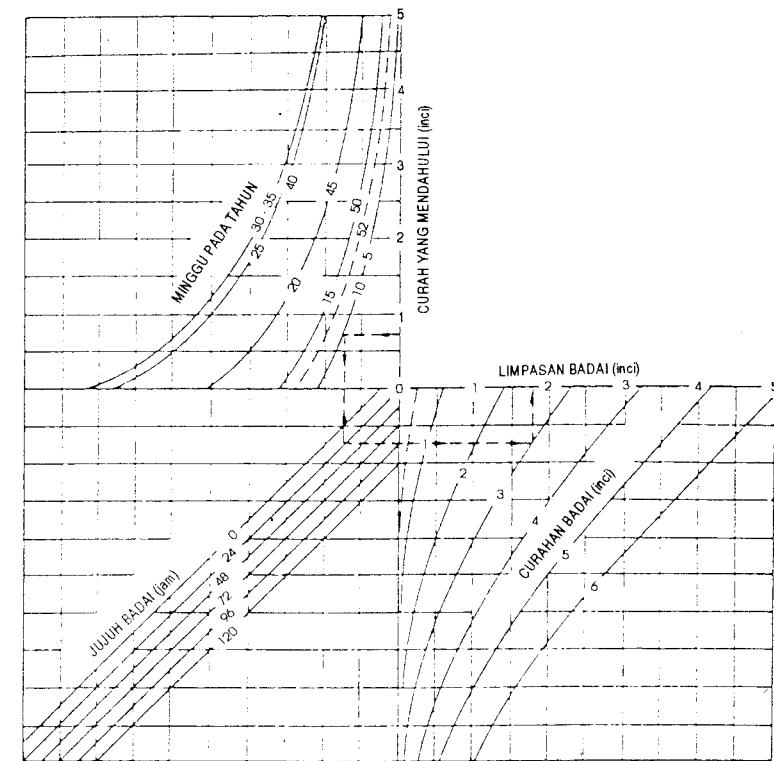
k = tetapan susutan dengan nilai sekitar 0,2 tetapi beragam antara 0,85 dan 0,98

Jika t adalah satuan, maka nilai sebarang hari adalah k kali nilai hari sebelumnya. Jika terjadi pencurahan maka hal itu akan menambah nilai penunjuk dengan jumlah yang tak ditentukan, karena ada hujan yang mungkin meninggalkan daerah tadi sebagai limpasan permukaan. Banyaknya air yang ditambahkan kepada penunjuk itu dengan demikian hanya berupa *imbuh cekungan*, tetapi selisih dalam penunjuk itu dengan menggunakan seluruh curahan umumnya kecil saja.

Susutan harian berangsur-angsur pada penunjuk itu disebabkan oleh pengaruh perluhan yang berubah-ubah sesuai dengan musim, jadi persamaan (4.1) digunakan dengan nilai k yang juga berubah-ubah sesuai dengan musim. Jika penunjuk itu digunakan untuk mengajuk (menaksir) limpasan yang terjadi dari badai tertentu, keragaman itu dapat saja disatukan dalam hubungan grafik sesumbu yang diturunkan dari analisis sejumlah besar curah hujan yang diamati dan data limpasan pada daerah tadi tertentu. Linsley drr. (8) memberikan uraian rinci mengenai cara menurunkan hubungan yang demikian itu, dan gambar 4.7 disalin untuk menggambarkan kiat tersebut.

Diagram itu kita pakai pada penunjuk curahan sebelumnya; kita ambil sebuah garis mendatar, kita ikuti sampai kita temukan lengkung jumlah minggu tertentu yang bersesuaian dengan tanggal takwim. Dari perpotongannya, kita turunkan garis tegak sehingga memotong garis jujuh badai dalam jam yang sesuai, dan kemudian kita ikuti mendatar sehingga memotong garis jumlah curahan badai. Garis tegak dari perpotongan terakhir itulah yang menunjuk limpasan yang cocok.

Penunjuk curahan sebelumnya merupakan alat yang berguna untuk memperoleh peluang prakiraan limpasan untuk daerah tadi yang memiliki banyak rekaman tetapi diperlukan banyak kerja untuk menurunkan hubungan seperti gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hubungan badai-limpasan untuk Sungai Monacacy di Jug Bridge, Md., Amerika Serikat (menurut Kantor Cuaca A.S. Dari 'Hydrology for Engineers' oleh Linsley, Kohler dan Paulhus. McGraw-Hill Book Co., 1958)

4.4.3 Menaksir kekurangan kelengasan tanah Karena penguppeluhan adalah pembuangan secara terus-menerus kelengasan tanah dan digantikannya oleh curahan, maka pengukuran teratur dan terus-menerus kedua proses itu menghasilkan sarana untuk menaksir kekurangan kelengasan tanah (*kkt*) tanpa perlunya pengandaian seperti persamaan (4.1).

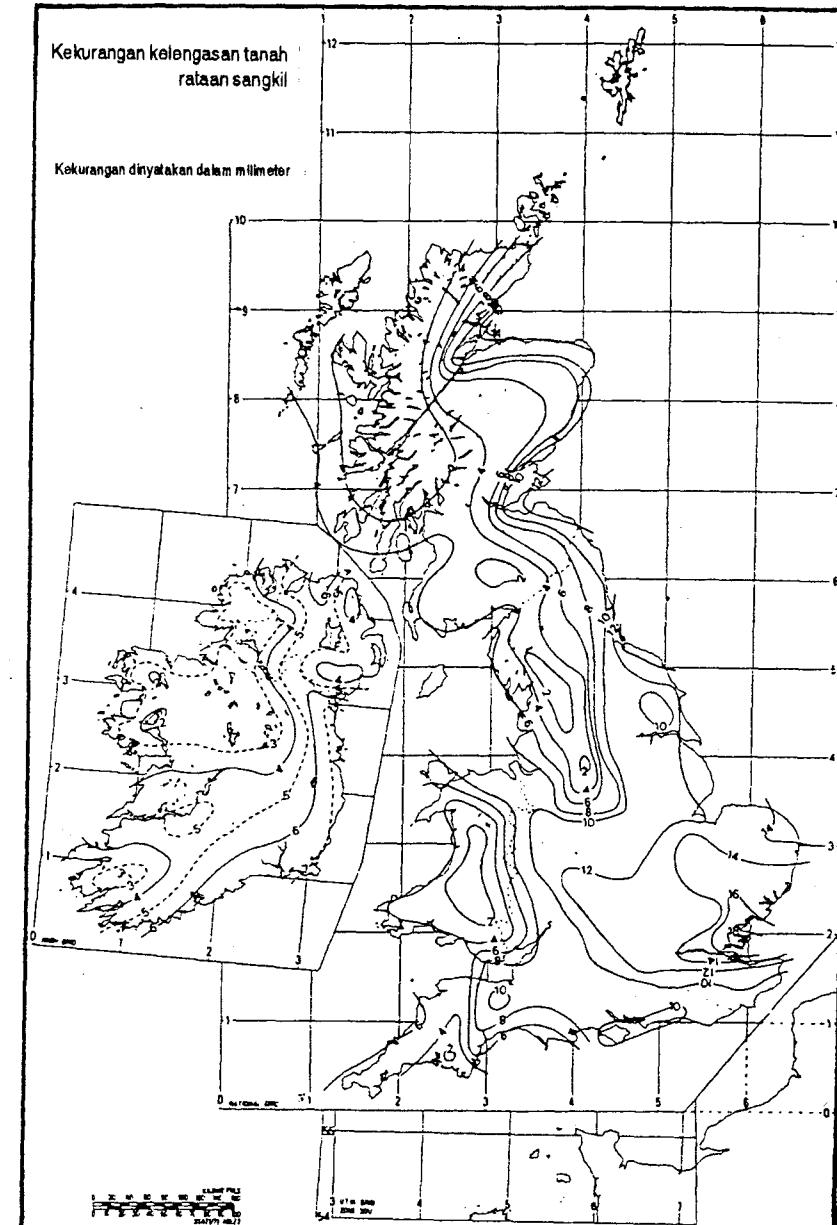
Apabila uapan melebihi curahan, tetumbuhan menyadap kelengasan tanah yang terkumpul untuk melanjutkan pemeluhuan. Dengan naiknya *kkt*, tetumbuhan mulai memperlihatkan berbagai tanda cekaman air dan akhirnya mulai menjadi layu. Maka dari itu, menentukan *kkt* sangatlah penting untuk menaksir kebutuhan pengairan dan untuk penelitian hidrologi bagi penyediaan air.

Di Inggris, Kantor Meteorologi Inggris Raya telah memperkembangkan cara canggih untuk menaksir penguapan dan kekurangan kelengasan tanah mingguan dan bulanan bagi seluruh negara - *Meteorological Office Rainfall and Evaporation System: MORECS* [9]. MORECS memiliki lima unsur pokok:

- i Mengumpulkan, menginterpolasi dan merata-ratakan data.
- ii Menganalisis data untuk memperoleh kebutuhan penguapan (yaitu penguapan yang mungkin) pada setiap jerjak persegi, masing-masing berukuran $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$, yang jumlahnya 190 dan meliputi seluruh Inggris.
- iii Menghitung penguapan sebenarnya dengan menggunakan model penyarian kelengasan tanah yang memperhitungkan jenis tanah, tetumbuhan dan tahana pertumbuhannya, albedo permukaan, serta tahanan aerodinamik dan permukaan terhadap perpindahan bahan dan uap air.
- iv Menghitung neraca air dan kelebihan curahan hujan.
- v Keluaran data, yang dapat diperoleh dari Kantor Meterologi setiap minggu, dalam bentuk peta dan tabel, menyangkut penguapan yang mungkin dan yang sebenarnya, kekurangan kelengasan tanah, curah hujan sangkil secara hidrologi (CHSH, *hydrologically effective rainfall*, HER), untuk 3 jenis tanah dan 13 jenis pertanaman atau penutup, bersama-sama dengan peubah meteorologinya. CHSH atau HER adalah kelebihan hujan setelah tanah ada pada kapasitas lapang, yaitu air yang memberikan sahamnya kepada aliran sungai dan airtanah.

Sistem itu dijalankan pada komputer Kantor Meteorologi dan para pemakai yang sudah berlanggan dapat memperoleh informasi itu lewat pos dan secara terbatas lewat teleks, fak, dan prestel.

Gambar 4.8 melukiskan *kkt* sangkil (mm) rata-rata yang berlaku di Kepulauan Inggris.



Gambar 4.8 Kekurangan kelengasan tanah rataan yang sangkil dalam mm untuk Inggris dan Irlandia (Kantor Meteorologi: hak cipta pada Crown)

Dengan menunjuk kepada gambar 4.8 akan tampak (sebagai misal) kemungkinan persyaratan banjir yang timbul, yang sangat berbeda-beda di daerah yang satu dengan di daerah yang lain. Nilai rata-rata yang disajikan, terpakai pada bab 7 untuk mengubah dari curah hujan secara menyeluruh ke kelebihan curah hujan pada penaksiran banjir di DAS yang tak tersukat.

Penggunaan kkt taksiran untuk meramalkan ukuran limpasan yang timbul dari badai tertentu, sama dengan kkt untuk penunjuk curahan sebelumnya karena kekurangannya (atau penunjuknya) diturunkan dari curahan yang sebenarnya, untuk menyatakan hujan bersih.

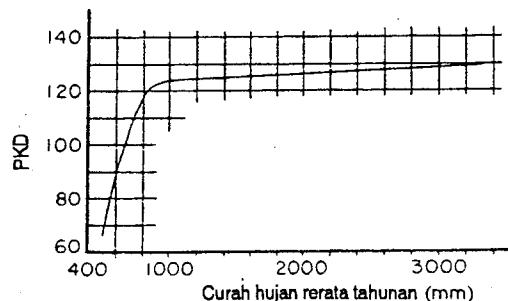
4.4.4 Penunjuk kebasahan DAS (PKD) Persifatan kebasahan DAS memiliki pengaruh besar pada banyaknya hujan bersih atau yang berlebihan yang menimbulkan limpasan. Dalam beberapa bab berikut ini hal itu akan digunakan untuk menaksir peristiwa banjir yang khas dengan cara FRS. Maka dari itu, lebih enak untuk menentukan penunjuk itu di sini.

Digunakan jangka waktu 5 hari sebelum adanya badai agar diperoleh sejarah curah hujan yang masih baru dan diusulkan penunjuk penurunan sebesar 0,5 pada rumus API:

$$API5 = 0,5 \cdot [P_{d-1} + 0,5 P_{d-2} + (0,5)^2 P_{d-3} + (0,5)^3 P_{d-4} + (0,5)^4 P_{d-5}]$$

Di sini P menyatakan curah hujan harian dan tikalasnya menunjuk kepada hari yang berhubungan dengan itu. Dari sini

$$PKD = 125 + API5 - kkt$$



Gambar 4.9 Nilai perencanaan yang dianjurkan untuk penunjuk kebasahan DAS (sumber: Flood Studies Report)

Untuk keperluan buku ini cukup kiranya untuk mengetahui bagaimana nilai PKD rata-rata untuk digunakan dalam perhitungan prakiraan banjir dalam hal orang tak mengetahui curah hujan lima hari yang sebelumnya. Nilai rata-rata yang demikian itu telah dihitung dalam FRS dan sangat bergantung pada curah hujan rata-rata tahunan. Hubungan yang ada di Kepulauan Inggris terlukis pada gambar 4.9.

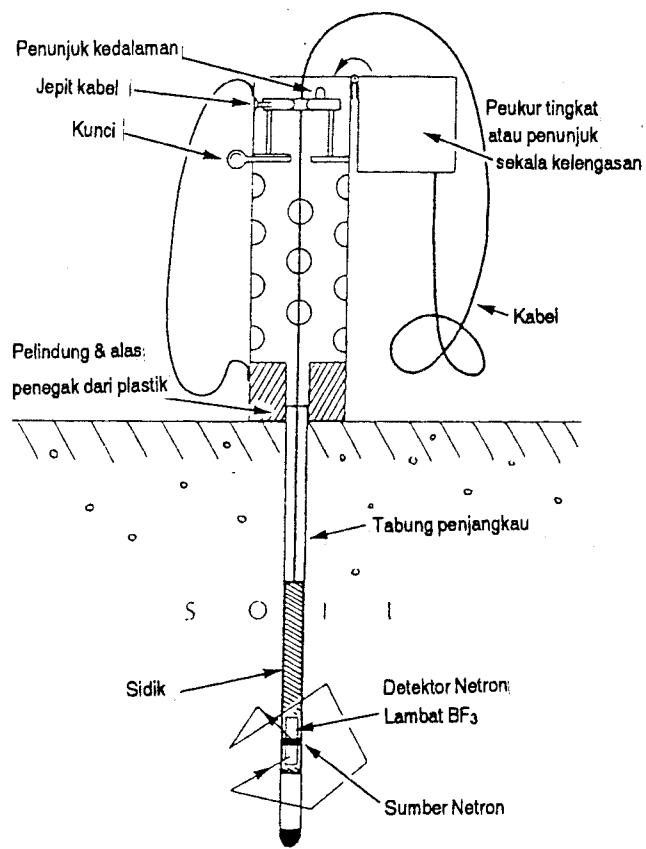
4.4.5 Mengukur kelengasan tanah Alat untuk mengukur kelengasan tanah di tempat, sidik kelengasan tanah Wallingford, diperkembangkan oleh Lembaga Hidrologi Inggris Raya bersama Badan Energi Atom. Alat itu dirancang untuk digunakan di lapangan pada semua medan dan pada sebarang cuaca.

Alat itu terdiri dari sebuah sumber radio aktif dalam sidik sepanjang 740 mm yang dapat diturunkan dalam tabung aluminium yang dipasang tetap di dalam tanah, rumah untuk melindungi sidik itu, kabel penggantung dan meter. Neutron cepat yang dipancarkan dari sebuah sumber radio aktif dihamburkan dan dikurangi kecepatannya oleh tumbuhan dengan inti atom pesusun tanah, terutama oleh hidrogen air di dalam tanah, sehingga menghasilkan neutron ‘lambat’. Neutron itu diindera dengan detektor netron lambat dalam sidik tersebut dan dialihkan ke dalam denyut listrik yang melewati kabel penggantung ke meter tempat alat penayang menunjukkan kecepatan deteksi. Makin basah tanah makin besar jumlah tumbuhan dan dengan demikian neutron lambat yang dideteksi. Kecepatan deteksi yang ditayangkan itu dengan demikian merupakan fungsi kelengasan tanah pada kedalaman sidik. Nilai kelengasan yang ditunjukkan itu menggambarkan nilai rata-rata untuk ‘lingkungan pengaruh’ yang sedikit banyak tidak pasti di dalam tanah yang mengitari sumber tersebut, dengan jejeri yang dapat dianggap berkisar antara 150–300 mm. Sederet pembacaan dibuat menuruni penampang pada selang yang biasanya 100 mm atau 150 mm. Rata-rata tertimbang bacaan itu memberikan jumlah simpanan kelengasan pada suatu irisan penampang.

Jika suatu daerah tadah diperlengkapi dengan sejumlah tabung aluminium yang dipasang secara tetap pada tempat yang sesuai, maka sebuah alat yang diberi tenaga baterai tunggal dapat dibawa dari tempat yang satu ke tempat yang lain untuk mengukur di tempat kelengasan tanah itu, sehingga dapat menghilangkan banyak perkiraan dari hasil penilaian parameter ini.

Sidik neutron itu biasanya digunakan untuk mengukur berkali-kali *perubahan* kelengasan pada tapak dan kedalaman yang sama dan untuk tujuan yang demikian itu dapat memberi ketelitian yang sangat tinggi. Sebaliknya, ketelitian nilai kelengasan mutlak sangat bergantung pada kalibrasi yang teliti pada setiap tapak dan kedalaman dan ini umumnya tidak praktis.

Diagram alat dan potret yang digunakan disajikan dalam gambar 4.10 dan 4.11



Gambar 4.10 Sidik kelengasan tanah Wallingford (atas kebaikan hati Lembaga Hidrologi)



Gambar 4.11 Sidik kelengasan tanah Wallingford

Acuan

- 1 Nassif,S.H. dan Wilson,E.M. The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, **20**, No.4 (1976)
- 2 Horton,R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, **14**, (1933), 443-60
- 3 Bouchardeau,A. dan Rodier, J. Nouvelle Methode de determination de la capacite d'absorption en terrains permeables. *La Houille Blanche*, No. A (Juli/Augustus 1960) 531-6
- 4 Sor, K dan Bertand, A.R. Effects of rainfall energy on the permeability of soils. *Proc. Am. Soc. Soil Sci*, **26**, No.3 (1962)
- 5 Horton, R.E. Determination of infiltration capacity for large drainage basins. *Trans. Am. Geophys. Union*, **18**, (1937) 371
- 6 Sherman, L.K. Comparison of F-curves derived by the methods of Sharp and Holtan and of Sherman and Mayer. *Trans. Am. Geophys. Union*, **24**, No.2 (1943) 465
- 7 Butler, S.S. *Engineering Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1957
- 8 Linsley, R.K., Kohler, M.A. dan Paulhus, J.L.H. *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 1958, p.162
- 9 *Hydrological Memorandum no. 45*. The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS. Met. Office, Bracknell, July 1981

Bacaan selanjutnya

- Penman, H.L. The dependence of transpiration on weather and soil conditions, *J. Soil sci.*, **1**, (1949) 74
- Grindley, J. Estimation of soil moisture deficits. *Meteorol. Magazine*, **96**, (1967) 97
- Bell, J.P. Neutron probe practice. *Report No. 19, Institute of Hydrology*, Wallingford, United Kingdom
- Grindley, J. Estimation and mapping of evaporation. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Symposium on World Water Balance, Reading. IASH Publication 92*, 1970, pp. 200-213

Horton, R.E. Analyses of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Trans. Am. Geophys. Union*, Part IV, (1939) 693

Wilm, H.G. Methods for the measurements of infiltration. *Trans. Am. Geophys. Union*, Part III, (1941) 678

Soal

- 4.1 Bahas pengaruh lereng DAS dan kelebatan hujan terhadap laju peresapan di bawah curahan hujan tetap.
- 4.2 Bahas pengaruh hutan dan pertanian terhadap airtanah. Berikan alasan yang menyetujui dan melawan
 - a pemeliharaan ternak
 - b tanaman usaha
 - c hutanterhadap DAS waduk untuk keperluan penyediaan air bagi umum.
- 4.3 Tabel di bawah memberi curah hujan jam-jaman tiga badai yang menyebabkan limpasan yang masing-masing setara dengan

Jam	Badai 1 (mm)	Badai 2 (mm)	Badai 3 (mm)
1	2	4	3
2	6	9	8
3	7	15	11
4	10	12	4
5	5	5	12
6	4		3
7	4		
8	2		

Tentukan penunjuk- Φ untuk DAS itu.

- 4.4 Mengapa cara untuk mengurangi tingkat resapan dari kelebatan curahan hujan untuk menghitung hidrograf limpasan tidak dapat diterapkan pada DAS alamiah yang besar-besar?
- 4.5 Penunjuk curahan sebelumnya (PCS) bagi sebuah setasiun adalah 53 mm pada 1 Oktober; 55 mm hujan jatuh pada 5 Oktober, 30 mm pada 7 Oktober, dan 25 mm pada 8 Oktober. Hitung PCS I_t

- a untuk 12 Oktober, jika $k = 0,85$
 - b untuk tanggal yang sama dengan mengandaikan tak ada hujan.
- 4.6 Gunakan hubungan sesumbu pada gambar 4.7 untuk menentukan bagaimanakah limpasan dalam sungai tersebut berubah-ubang mengikuti musim. Andaikan bahwa pada minggu ke-1 ada badai sebesar 5 inci yang berlangsung 72 jam. Bandingkan dengan pengaruh badai yang sama pada minggu ke-25, jika PCS dalam setiap ihwal itu sebesar 1,5 inci.
Gambarkan dalam musim apakah minggu-minggu itu dan terangkan mengapa ada perbedaan dalam limpasan.
- 4.7 Bahas PCS dan kekurangan kelengasan tanah (KKT), yang menunjukkan bagaimanakah kedua-keduanya diturunkan dan digunakan.

5

Airtanah

5.1 Keterdapatatan airtanah

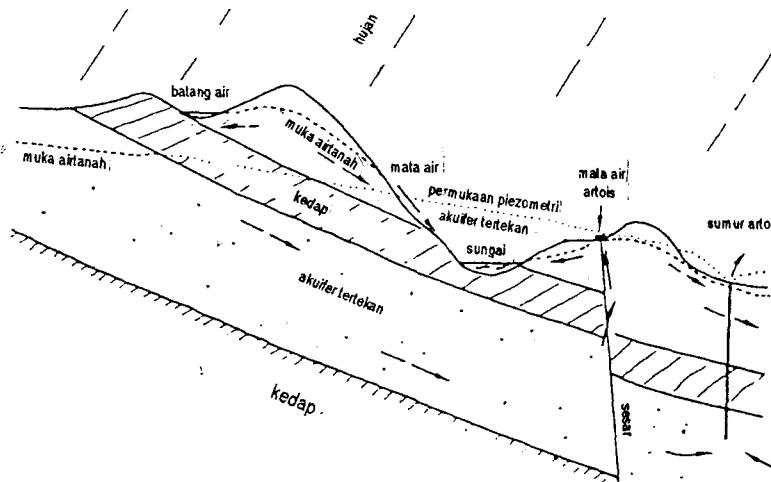
Curah hujan yang masuk ke dalam tanah dan meresap ke lapisan yang di bawahnya disebut *airtanah*. Banyaknya air yang dapat tertampung di bawah permukaan bergantung pada kesarangan lapisan di bawah tanah. Lapisan pembawa air, disebut *akuifer* atau *pehantar*, dapat terdiri dari bahan lepas seperti pasir dan kerikil atau bahan yang mengeras seperti batupasir dan batugamping. Batugamping nisbi kedap, tetapi dapat larut dalam air jadi sering memiliki kekar dan ‘lorong’ yang lebar-lebar yang membuat batuan itu secara keseluruhan serupa dengan batuan sarang dalam kemampuannya untuk memegang air dan bertindak sebagai lapisan pembawa air.

Air di dalam pori akuifer terpengaruh oleh gaya gravitasi sehingga cenderung untuk mengalir ke bawah melalui pori bahan tsb. Perlawan terhadap pengaliran bawah tanah itu sangat berbeda-beda dan *kelulusan* bahan merupakan ukuran bagi perlawan itu. Pehantar dengan pori besar-besar seperti kerakal disebut memiliki kelulusan tinggi dan lapisan dengan pori sangat kecil-kecil seperti lempung, yang porinya hanya dapat dilihat di bawah mikroskop, kelulusannya rendah.

Dengan menelusnya air ke bawah, jenuhlah pehantar itu. Permukaan bagian yang jenuh itu disebut muka air tanah atau *permukaan freatik*. Permukaan itu dapat miring curam dan kemantapannya bergantung pada penyediaan dari atas. Permukaan itu menurun selama waktu kering dan naik pada cuaca berhujan. Air dalam pehantar umumnya bergerak perlahan-lahan menuju ke permukaan air bebas yang terdekat seperti danau, sungai, atau laut. Tetapi jika ada suatu lapisan yang kedap yang mengalasi sebuah pehantar dan lapisan itu tersingkap di permukaan, maka airtanah dapat muncul di permukaan pada jalur rembasan atau sebagai *mata air*. Ada kemungkinan yang sama bagi lapisan pembawa air

untuk tertindih oleh bahan kedap dan dengan demikian ada dalam keadaan tertekan. Akuifer yang demikian itu yang mendapat airnya dari tempat jauh disebut *pehantar tertekan* dan permukaan yang dicapai air itu jika naik, disebut *permukaan piezometri*. Nama yang lain, yang digunakan untuk sumur bor bagi akuifer tertekan adalah *sumur artois*; sifat artois kadang-kadang terpakai juga untuk akuifer. Jika permukaan piezometri itu ada di atas permukaan tanah pada suatu sumur artois, sumur itu disebut sumur mengalir sendiri atau sumur swalir; adanya rekahan atau cacat pada lapisan penutup, dapat menyebabkan timbulnya *mata air artois*. Kadang-kadang pada akuifer yang luas terdapat suatu daerah kecil yang berbahan kedap. Ini dapat terjadi akibat penyesaran atau, misalnya, karena ada kanta lempung yang terdapat pada lapisan yang umumnya berpasir. Muka airtanah setempat yang hanya terbatas saja, disebut *muka air tenggek*, dapat timbul dari keadaan itu dan tempatnya bisa saja berjauhan dengan permukaan freatik yang sebenarnya.

Beberapa cara keterdapatannya airtanah yang diuraikan di atas tergambar pada gambar 5.1



Gambar 5.1 Cara keterdapatannya airtanah

5.2 Beberapa faktor yang berpengaruh

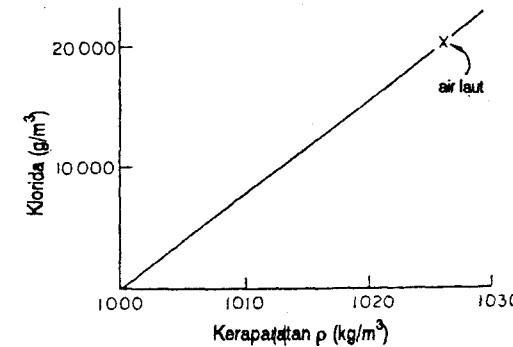
Pengaliran airtanah berlangsung dalam zat antara sarang. Pori yang dilaluinya benar-benar sangat kecil dan umumnya antara batas 2 mm–0,02 mm. Gerakan itu lambat jika yang digunakan ukuran limpasan permukaan dan alirannya

umumnya berari. Angka Reynolds dalam aliran jenis ini sangat rendah. Faktor yang penting-penting dalam pengaliran ialah

- 1 zat alirnya - kerapatan dan kekentalannya;
- 2 zat antara yang dilewati zat alir itu;
- 3 persyaratan perbatas.

Zat alir itu biasanya air, umumnya tawar tetapi sesekali masin. Suhunya mungkin berkisar antara 0–30°C.

Kerapatan Kerapatan air tawar berbeda hanya kecil sekali dalam mengikuti suhu, dan pengaruhnya dapat diabaikan dalam pengaliran air tanah. Yang lebih penting kegaraman, yang pengaruhnya terlukis pada gambar 5.2



Gambar 5.2 Kerapatan air masin

Kerapatan air tawar lawan suhu

Suhu (C°)	0	4	10	15	20
Kerapatan airtawar ρ (g/l)	999,868	1000	999,727	999,126	998,230

Kekentalan adalah ukuran kuat geser suatu zat alir; makin rendah kekentalannya, zat alirnya makin lasak (mudah bergerak) atau makin mampu menembus.

Kekentalan mutlak, dinyatakan dengan μ , berkesatuan $N\text{det}/m^2$; (satuan CGS, $poise = 10^{-1} \text{ Ndet}/m^2$). Air pada 20°C memiliki kekentalan 1 *sentipoise* ($0,01 \text{ poise} = 10^{-3} \text{ Ndet}/m^2$)

Kekentalan kinematik, dinyatakan dengan v , adalah nisbah kekentalan mutlak terhadap kerapatan atau $v = \mu/\rho$ dan bersatuhan m^2/det (satuan CGS, *stoke* = $10^{-4} \text{ m}^2/\text{det}$). Kekentalan kinematik terdapat dalam banyak penggunaan, misalnya angka Reynolds, $R = (vD)/\nu$

$$\nu (\text{air}) \approx 10^{-1} \text{ m}^2/\text{hari} \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det} \approx 10^{-2} \text{ stoke.}$$

Kekentalan kinematik zat alir hampir tak bergantung pada tekanan dan secara nyata merupakan fungsi suhu.

Kekentalan kinematik air lawan suhu

suhu ($^{\circ}\text{C}$)	0	5	10	15	20
$\nu (\text{m}^2/\text{hari})$	0,152	0,133	0,113	0,098	0,087

Zat antara tempat bergeraknya airtanah tercirikan oleh sifat kesarangan, kelulusan, dan sampai batas yang tak seberapa ketermampatan. Hanya yang dua pertama yang akan dibahas di sini.

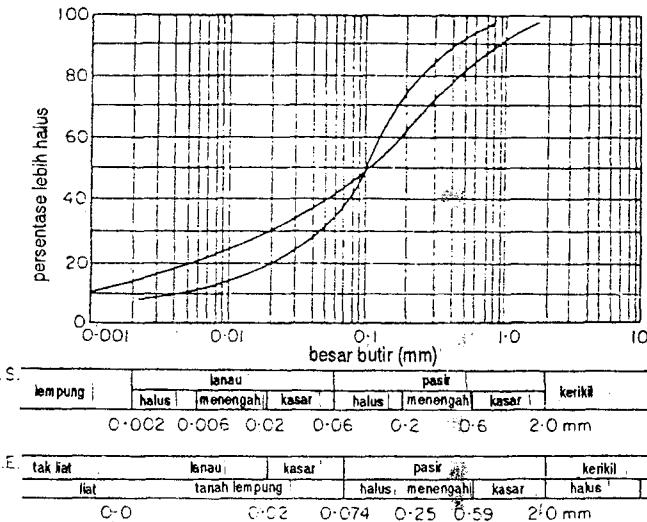
Kesarangan diberi batasan sebagai $n = \frac{(\text{jumlah lowongan})}{(\text{jumlah isi})}$ dan dapat berkisar antara beberapa persen sampai sekitar 90%. Dalam bahan yang berbutir yang terdiri dari bulatan seragam sempurna:

pada tetalan terlonggar yang mungkin, $n = 47,6\%$

pada tetalan terapat yang mungkin, $n = 26\%$

Tanah di alam tentu saja tersusun dari butiran tak teratur yang berukuran sangat berbeda-beda. Makin teratur ukuran butiran tanah, makin cenderung sarang tanah itu, karena dalam tanah yang tak teratur ukurannya, butiran yang lebih kecil-kecil cenderung untuk mengisi lowong dalam tetalan butiran yang lebih besar. Maka dari itu tatacara baku dalam penyigian air tanah yang mana pun untuk menganalisis tanahnya secara besar butir dan merajah ukuran butiran dengan cara yang baku, menggunakan skala ukuran logaritma. Analisis tanah yang khas terlukis pada gambar 5.3. Dua tanah dirajah: tanah yang butirannya lebih teratur akan cenderung lebih sarang.

Bila air mengisi pori tanah, timbul selapis tipis air, tebalnya hanya beberapa molekul, yang menyelimuti butiran tanah. Air itu tidak bebas mengalir dan melekat pada butiran itu, bahkan bila semua lowong yang terdapat di antara butiran telah tersalirkkan. Ini berarti bahwa *kesarangan sangkil*, n_e , mungkin lebih kecil daripada kesarangan sebenarnya n . Dalam bahan yang berbutir kasar seperti kerikil tidak akan ada selisih antara n_e dan n , tetapi dalam pasir halus



Gambar 5.3 Merajah hasil analisis besar butiran dan tatanana

selisih itu mungkin 5% atau bahkan lebih dalam bahan yang berbutir sangat halus. Dalam banyak pertimbangan mengenai kesarangan dalam pengaliran airtanah, yang penting adalah n_e , kesarangan sangkil tadi.

Kelulusan adalah fungsi kesarangan, struktur, dan sejarah geologi bahan. Dalam hal ini yang dimaksud dengan struktur ialah ukuran besar butir, sebaran, arah, susunan, dan bentuk butiran bahan. Sebagai misal, dalam endapan dengan butiran yang pipih paling menonjol, yang diendapkan dalam air, butiran itu cenderung untuk terletak dengan sumbu terpanjangnya mendatar. Dalam tanah yang demikian itu kelulusannya mungkin jauh lebih besar pada arah mendatar daripada pada arah menegak. Tanah yang demikian itu disebut *takisotrop*.

Kelulusan bahan tertentu dibatasi oleh *koefisien kelulusannya* yang dinyatakan dengan k ; k bergantung pada sejumlah faktor yang disebut di atas dan dapat diuraikan sebagai geometri tataporinya dan dinyatakan dalam meter setiap hari. Banyak usaha telah dilakukan untuk menemukan rumus untuk k dengan nilai persifatan bahan yang dapat diukur. Misalnya, rumus yang digunakan dengan penapis pasir untuk penyediaan air, dan berlaku hanya untuk zat antara berbutir yang membulat, asal saja ukurannya tidak terlalu kecil, adalah

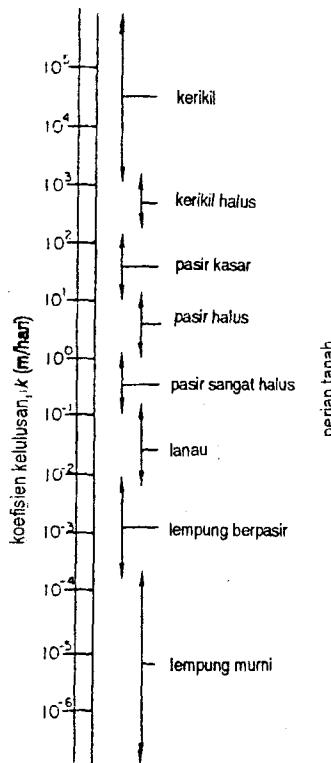
$$k = Cd_{10}^2$$

di sini

k = koefisien kelulusan dalam m/hari

d_{10} = ukuran besar butiran dalam mm, dengan 10% dari bahan itu lebih kecil dan 90% lebih kasar

C = tetapan dengan nilai 400–1200 (nilai rata-rata adalah 1000)



Gambar 5.4 Kisaran kelulusan pada tanah alamiah

satuan sebuah akuifer sebanding dengan kelandaian hulu potensial yang diukur pada arah pengaliran. Atau

$$v \propto i$$

dengan memasukkan tetapan kesebandingan, yaitu k , maka koefisien kelulusannya ialah

$$v = ki$$

dan untuk akuifer tertentu atau bagian suatu akuifer dengan luasan A , (luasan tegak lurus aliran)

$$Q = vA = kAi$$

di sini

v = kecepatan air, (diukur sebagai waktu yang diperlukan untuk melewati antara 2 titik acuan) dalam m/hari (atau m/det dst.) dan disebut *kecepatan jenis*.

i = kelandaian hidraulik, ini sama dengan kelandaian potensial karena kecepatan sangatlah kecil sehingga tampak tak ada hulu kecepatan; i juga ditulis sebagai $d\phi/dl$, dengan l jarak di sepanjang suatu garis pengaliran dan ϕ hulu potensial.

Kecepatan jenis itu bukan kecepatan yang sebenarnya, melainkan hanya Q/A . Kecepatan sebenarnya air di dalam pori lebih besar dari kecepatan jenis karena jalan yang ditempuh air melewati zat antara sarang selalu lebih panjang daripada garis lurus antara dua titik sebarang.

Kecepatan sebenarnya rata-rata atau kecepatan pori dinyatakan dengan

$$\bar{v} = \frac{\text{luah}}{\text{luasan laluan air}} = \frac{Q}{An_e} = \frac{Av}{An_e} = \frac{v}{n_e}$$

Jadi

$$\text{kecepatan pori (rata-rata)} = \text{kecepatan jenis: kesarangan sangkil}$$

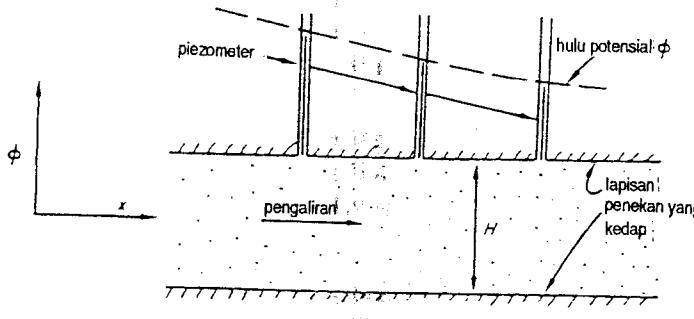
Karena sebaran kecepatan memotong pori boleh jadi berupa parabola dan yang tertinggi di tengahnya dan nol pada tepinya maka kecepatan pori maksimum $v_{\text{maks}} = \text{mendekati } 2 \times \bar{v}$.

Jadi dalam perkara yang khas (katakan) $n_e = \frac{1}{3}$ kemudian

$$\bar{v} = 3v \quad \text{dan} \quad \bar{v}_{\text{maks}} = 6v$$

meskipun semua itu angka yang khas, perlu diingat tingkat kecepatannya, karena pada \bar{v}_{maks} lah bergantungnya angka Reynolds dan kelangsungan pengaliran mengari.

5.3.2 Pengaliran dalam akuifer tertekan Pertimbangkan sekarang ikhwal pengaliran satu arah dalam akuifer tertekan dengan kelulusan k sebagaimana terlukis pada gambar 5.5. Airtanah mengalir dari kiri ke kanan, dan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan air melewati pori itu terus-menerus menggunakan hulu yang tersedia, jadi hulu potensial sebagaimana ditunjukkan oleh piezometer yang dimasukkan ke dalam akuifer, terus menurun.



Gambar 5.5 Pengaliran dalam akuifer tertekan

Dari Hukum Darcy

$$v_x = -k \frac{d\phi}{dx}$$

dan jika q = aliran dalam akuifer setiap luas satuan maka

$$q = -kH \frac{d\phi}{dx} \quad (5.1)$$

Karena diandaikan bahwa pengaliran itu bersifat tunak maka

$$\frac{dq}{dx} = 0$$

dan persamaan untuk q , di atas didiferensialkan

$$\frac{d}{dx} \left(-kH \frac{d\phi}{dx} \right) = 0$$

jadi

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = 0 \quad (5.2)$$

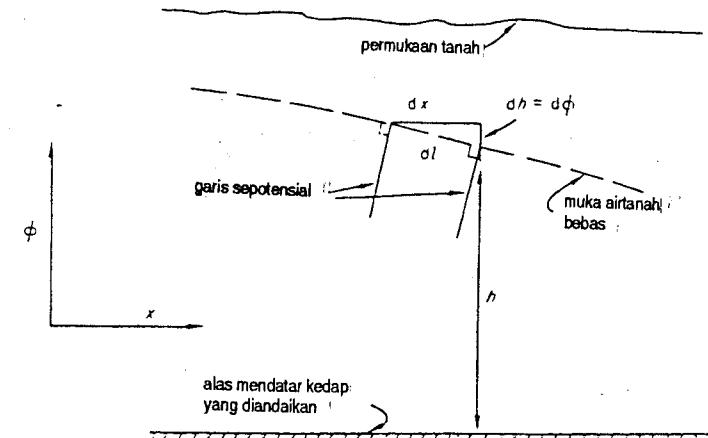
karena baik k maupun H kedua-duanya mempunyai nilai hingga.

Kedua persamaan (5.1) dan (5.2) adalah persamaan diferensial dasar untuk ikhwal akuifer tertekan. Dengan memasukkan persyaratan batas yang cocok, banyak soal dalam hubungan ini dapat diselesaikan dengan persamaan tersebut. Perhatikan bahwa v_x pada persamaan Darcy adalah kecepatan jenis.

5.3.3 Pengaliran dalam pehantar dengan permukaan freatic Pandanglah sekarang suatu akuifer dengan permukaan freatic yang terletak pada dasar yang kedap. Ikhwal itu terlukis pada gambar 5.6. Di sini persamaan pertama dari Hukum Darcy akan menjadi

$$v_x = -k \frac{d\phi}{dl}$$

di sini l = jarak yang diukur pada arah pengaliran.



Gambar 5.6 Pengaliran dalam akuifer dengan permukaan freatic

Jika dibuat dua andaian (dengan mengikuti Dupuit)

- 1 bahwa $d\phi/dl$ dapat dinyatakan dengan $d\phi/dx$ (dibolehkan jika $d\phi$ kecil)
- 2 bahwa semua garis alir dalam akuifer itu mendatar dan garis sepotensialnya menegak (nyaris benar, kecuali didekat titik penyadapan), sehingga $d\phi/dx = dh/dx$ maka persamaan Darcy menjadi

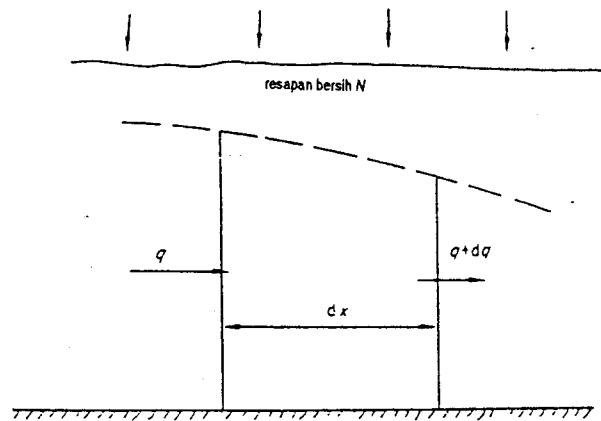
$$q = -kH \frac{dh}{dx} \quad (5.3)$$

dan

$$\frac{dq}{dx} = -\frac{1}{2}k \frac{d^2(h^2)}{dx^2},$$

dan karena kesinambungan $dq/dx = 0$, kemudian

$$\frac{d^2(h^2)}{dx^2} = 0 \quad (5.4)$$



Gambar 5.7 Pengaliran dalam akuifer freatik bebas dengan curah hujan :

* Aturan pangkat pendiferensialan dapat dituliskan $d(v^n)/dx = nv^{n-1} \cdot dv/dx$. Jadi $d(h^2)/dx = 2h \cdot dh/dx$

dari itu

$$\frac{1}{2} \frac{d(h^2)}{dx} = h \cdot dh/dx$$

Jadi karena

$$q = -kh \cdot dh/dx$$

maka dari itu

$$q = -\frac{1}{2}k \cdot d(h^2)/dx$$

jadi

$$dq/dx = -\frac{1}{2}k \cdot \frac{d^2(h^2)}{dx^2}$$

dan di sini Persamaan (5.3) dan (5.4) merupakan persamaan yang mendasar untuk menyelesaikan soal yang menyangkut ihwal akuifer freatik (kecuali dalam hal andaian Dupuit tidak lagi wajar)

Jika akuifer sedang diimbuh oleh yang di atas tanah, anggap saja lagi peresapan bersih hujan itu N dalam satuan yang cocok (seperti pada gambar 5.7).

Dalam hal ini $dq = N \cdot dx$, jadi dengan demikian

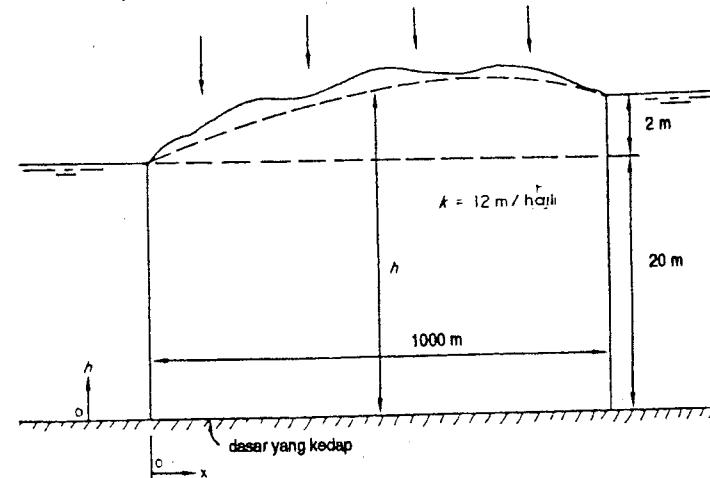
$$\frac{dq}{dx} = -\frac{1}{2}k \frac{d^2(h^2)}{dx^2} = N$$

jadi

$$\frac{d^2(h^2)}{dx^2} = -\frac{2N}{k} \quad (5.5)$$

Sekarang persamaan 5.3 dan 5.5 bertautan.

Contoh 5.1 Andaikan ada dua saluran, pada ketinggian yang berbeda, yang terpisahkan oleh sejulur lahan dengan lebar 1000 m, dengan kelulusan $k = 12$ m/hari sebagaimana terlukis pada gambar 5.8. Jika saluran yang satu 2 m lebih tinggi daripada yang satunya lagi, dan kedalaman akuifer itu 20 m di bawah saluran yang lebih rendah sampai dasar yang kedap, temukan berapa besar aliran yang masuk ke dalam, atau penyadapan dari setiap saluran itu setiap m panjang. Ambil angka curah hujan tahunan sebanyak 1,20 m setiap tahun dan andaikata peresapan sebesar 60%.



Gambar 5.8 Aliran di antara dua saluran

Andaikan asal acuan sebagaimana dinyatakan pada gambar 5.8. Maka syarat batasnya secara mudahnya adalah

bila $x = 0, h = 20$; dan bila $x = 1000, h = 22$.

$$N = 60\% \text{ dari } 1,2 = 0,72 \text{ m/tahun}$$

$$= 0,72/365 \text{ m/hari}$$

Dari persamaan (5.5)

$$\frac{d^2(h^2)}{dx^2} = -\frac{2N}{k}$$

Diintegrasikan dua kali

$$\frac{d(h^2)}{dx} = -\frac{2N}{k}x + C_1$$

$$h^2 = -\frac{N}{k}x^2 + C_1x + C_2 \quad (5.6)$$

bila $x = 0, h = 20$ jadi

$$400 = 0 + 0 + C_2$$

jadi

$$C_2 = 400$$

dan bila $x = 1000, h = 22$ jadi

$$484 = -\frac{0,72 \times 10^6}{365 \times 12} + 1000C_1 + 400$$

jadi

$$C_1 = 0,084 + 0,164 = 0,248$$

Sekarang dengan menggunakan Persamaan (5.3)

$$q = -kh \frac{dh}{dx}$$

dan Persamaan (5.6)

$$h = \sqrt{\left(-\frac{N}{k} \cdot x^2 + 0,248x + 400 \right)}$$

Gunakan ungkapan di bawah tanda akar kuadrat $= u$, maka $h = u^{\frac{1}{2}}$

jadi

$$\frac{dh}{dx} = \frac{1}{2u^{\frac{1}{2}}} \left(-\frac{N}{k} \cdot 2x + 0,248 \right)$$

pada $x = 0$

$$q = -ku^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{2u^{\frac{1}{2}}} (0,248) = -6(0,248) = -1,49 \text{ m}^3/\text{hari/m}$$

Pada $x = 1000$

$$q = -\frac{k}{2} \left(\frac{-2000 \times 0,72}{365 \times 12} + 0,248 \right)$$

$$= -6(-0,328 + 0,248) = 6(0,08) = 0,48 \text{ m}^3/\text{hari/m}$$

Jadi ada peluahan ke dalam kedua saluran itu, sebanyak $1,49 \text{ m}^3/\text{hari}$ ke saluran yang bawah, dan $0,48 \text{ m}^3/\text{hari}$ ke saluran yang atas, untuk setiap meter panjang aquifer.

Perkara sederhana yang baru saja dibicarakan di depan tadi hanya untuk menunjukkan cara bagaimana orang dapat menganalisis gerakan airtanah. Karena keadaan menjadi makin rumit, penyelesaiannya pun menjadi makin sulit, tetapi penyelesaian baku telah dihitung untuk banyak keadaan airtanah, dan yang banyak ada di alam ini dapat dianalisis, setidaknya secara lebih kurang.

5.4 Menyadap airtanah

Cara yang paling sederhana dan paling tua untuk mengumpulkan airtanah ialah dengan menggali lubang dalam tanah hingga menembus muka airtanah. Jika banyaknya air yang dapat dialir dari lubang itu tidak mencukupi, maka lubang itu dapat diperpanjang, entah pada arah mendatar entah menegak. Cara mana yang akan dipilih, itu bergantung pada keadaan hidrogeologi setempat.

Jika lubang itu dipanjangkan pada arah mendatar, maka yang kita peroleh adalah sebuah parit. Sebagai pilihan lain, lubang itu bisa pula dibuat di bawah tanah dan menjadi suatu terowongan pengumpul. Pengumpul mendatar itu harus digunakan jika ketebalan aquifer tidak seberapa dan jika surutan air akibat penyadapan harus dibatasi; misalnya, jika ada lapisan air tawar menindih lapisan air asin.

Jika lubang itu dilanjutkan pada arah menegak, yang kita peroleh adalah sumur gali atau sumur. Cara ini dapat kita gunakan bila aquifernya cukup tebal dan

selalu digunakan bila akuifer itu lebih dalam dari sekitar 6 m di bawah permukaan tanah. Sumur gali biasanya bergaris tengah 1 m atau lebih, jadi lubangnya bekerja sebagai penando untuk jangka waktu pendek, dan penyadapan laju-tinggi. Sumur yang bergaris tengah besar itu juga berguna bila laju masuknya air ke dalam lubang harus tetap dipertahankan rendah; misalnya, dalam pasir yang berbutir halus.

Di daerah yang sudah maju, dewasa ini sebagian besar sumur yang dibuat untuk penyediaan air adalah sumur bor yang kedalamannya pada umumnya antara 30 dan 500 m. (Di Indonesia sekitar 200 m. *Penerjemah*) Sumur bor dibangun dengan memakai pahat bor yang memecah batuan yang dijumpai di dasar lubang menjadi kepingan kecil-kecil yang kemudian dapat dinaikkan dengan alat yang lain. Pada dasarnya ada dua jenis perlengkapan yang terpakai: bor tumbuk dan bor putar. Pada bor tumbuk, ada alat dalam lubang bor yang secara berganti-ganti dijatuhkan dan diangkat; pada bor putar, pahat yang berputar mengetam atau mengeruk dasar lubang. Sumur yang dibor itu dapat menembus bahan jenis apa pun dari lempung lunak hingga batuan keras, hingga kedalaman sekilometer atau lebih.

Setelah lubang dibor, lubang itu pun ‘dilindungi’ dengan pipa baja untuk menjaga jangan sampai runtuh. Pada dasar pipa lindung itu dipasang penapis. Inilah kedalaman tempat air masuk dan penapis itu perlu untuk menghindari jangan sampai butiran halus-halus terbawa masuk dan setelah itu terjadi penyumbatan bagian dasar sumur dan pompa. Penapis itu tidak boleh menyebabkan kehilangan hulu (tinggi tekan) terlalu besar, dan buatannya harus kuat, tahan korosi, dan harganya wajar. Persyaratan itu sampai batas tertentu bertolak-belakang, karena makin kecil-kecil tebuknya pada penapis dan makin sangkil untuk menghalangi masuknya butiran halus, makin besarlah kehilangan hulu yang akan ditimbulkan.

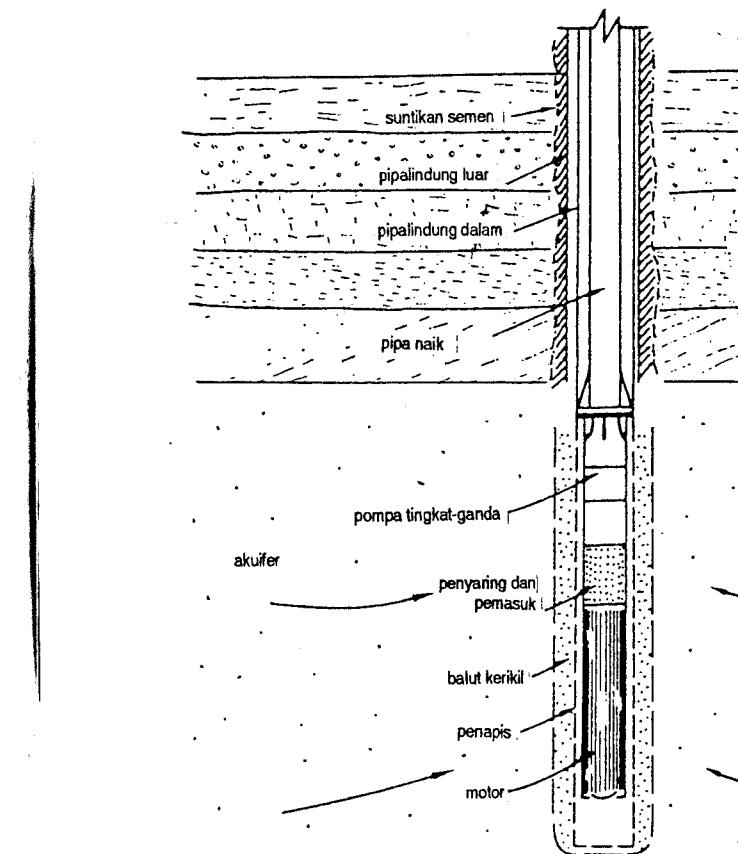
Penapis masa kini biasanya terbuat dari bahan plastik yang bertebuk halus, meskipun terpakai pula baja, tembaga, loyang, kayu, lempung yang dikacakan, dan kaca. Balut kerikil lazimnya ditempatkan di sekitar penapis supaya bertindak sebagai penyaring awal; dalam beberapa hal, balut kerikil yang terdiri dari butiran yang garis tengahnya berangsur-angsur menurun, yang ditempatkan sebagai lingkaran yang sepusat, dapat terpakai dengan pipa lindung yang bertebuk sederhana.

Bagaimana orang membangun sumur, memasang penapis dan balut kerikil, dan bagaimana kiat menyelesaikan sumur, semua itu ada di luar cakupan buku ini.

Sekali air sudah masuk ke dalam sumur, air itu harus dipompa ke permukaan. Orang menggolongkan pompa sumur sebagai pompa berbalasan, pompa sumur

tegak-berputar, dan pompa pancut (*jet*) dan desakan angin. Pompa sumur tegak-berputar dapat digerakkan dari permukaan dan dapat berupa pompa selam, dan perpindahan airnya dapat mengempar dan dapat pula memutar positif.

Yang paling banyak digunakan dewasa ini adalah pompa empar-selam yang digerakkan listrik dan dimasukkan ke dalam lubang bor, dengan motor listrik penggeraknya terangkai langsung kepada bagian pompa sehingga menjadi satu badan pompa yang panjang yang ditempatkan di dekat dasar sumur. Pompa yang demikian itu dibuat dalam ukuran hingga paling kecil bergaris tengah 100 mm untuk melayani hulu hingga setinggi 100 m atau lebih, jika perlu. Pompa bergaris tengah 100 mm (4 inci) seperti itu dapat menyediakan air sekitar 4



Gambar 5.9 Bagan dasar sumur bor yang khas

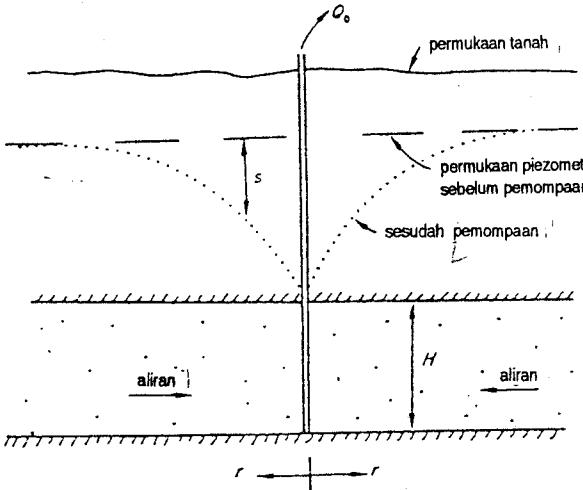
m^3/jam sedangkan yang garis tengahnya 250 mm (10 inci) mungkin menyediakan 30 kalinya. Bagan perlengkapan yang khas itu terlukis dalam gambar 5.9.

5.5 Serahan sumur

Berbagai rumus untuk lengkung surutan sumur-tunggal dapat diturunkan dari keadaan pengaliran yang dibicarakan dalam pasal 5.3. Hanya dua di antara perkara yang paling sederhana yang akan ditinjau di sini: 1 aliran tunak ke sumur yang menyadap airtanah tertekan, dan 2 aliran tunak ke sumur airtanah bebas.

Banyak faktor lainnya harus dipertimbangkan (misalnya, pengaruh masuknya sumur untuk sebagian ke dalam akuifer, aliran tak tunak, dst.) tetapi untuk bahasan yang lengkap mengenai ihwal itu pembaca perlu mencari dalam acuan 1 dan 2 pada akhir bab ini.

5.5.1 Aliran tunak yang tertekan Surutan dinyatakan dengan s dan diukur dari muka piezometri yang tak terganggu pra-pemompaan (lihat gambar 5.10).



Gambar 5.10 Sumur yang memompa dari akuifer tertekan

Koordinat mendatar diukur menjelari dari sumur dan dinyatakan dengan r , karena pengaliran berlangsung menjelari ke dalam sumur. Luah tahana tunak dari sumur disebut Q_0 .

Persamaan yang menentukan aliran ditulis sbb.: Hukum Darcy

$$Q = vA = -k \frac{ds}{dr} \cdot 2\pi r H$$

dan dari kesinambungan

$$Q = Q_0 = \text{tetap}$$

Menggabungkan kedua-duanya

$$ds = - \frac{Q_0}{2\pi k H} \cdot \frac{dr}{r}$$

Mengintegrasikan di antara limit $r = r_1$, $s = s_1$, dan $r = r_2$, $s = s_2$:

$$s_1 - s_2 = \frac{Q_0}{2\pi k H} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (\text{persamaan Theim}) \quad (5.7)$$

Persamaan ini sangat penting dan berlaku (paling tidak mendekati) untuk semua jenis pengaliran di bawah tanah, baik tunak maupun tak tunak, tertekan maupun bebas. Nilai kH dikenal sebagai *koefisien keterterusan*.

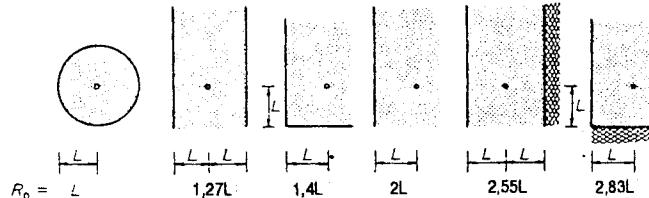
Persamaan 5.7, diintegrasikan tanhingga, menghasilkan

$$s = - \frac{Q_0}{2\pi k H} \cdot \ln r + C$$

dan jika $s = 0$ dan $r = R$, maka

$$s = \frac{Q_0}{2\pi k H} \ln \frac{R}{r} \quad (5.8)$$

Salah satu di antara persamaan 5.7 dan 5.8 memungkinkan kita menentukan lengkung surutan, asal saja tetapan integrasi Q_0 dan R dapat ditentukan dari persyaratan batas. Q_0 adalah luahan panggah sumur yang dipompa jadi dapat diukur. Tetapi R berbeda pada tempat pengamatan yang satu dari yang lain.



Gambar 5.11 Nilai tetapan integrasi R_0 dalam rumus Dupuit, untuk surutan yang dekat pada sumur [3]

Tetapi dalam banyak hal, nilai yang dekat dengan sumurlah yang penting; dalam hal itu R nilainya R_o . Beberapa nilai R_o untuk batas idaman disajikan pada gambar 5.11; dalam hal itu bagian yang gelap adalah tanah dan ruang kosong di sampingnya adalah air terbuka.

Gambar itu melukiskan, bagaimana R_o bergantung pada jaraknya ke air terbuka. Dengan bertambahnya jarak, R_o juga bertambah, demikian pula surutannya. Sesungguhnya, surutan- hingga hanya mungkin, bila air terbuka yang berparas panggah itu terdapat pada jarak hingga. Juga, tidak ada perubahan besar pada R_o , bahkan untuk persyaratan batas yang sangat berjauhan, dan karena itu merupakan logaritma alam nisbah R_o/r yang mempengaruhi surutan, taksiran R_o yang diberitahu sering memberi hasil yang cukup teliti.

Contoh 5.2 Sebuah sumur bergaris tengah luar 0,5 m, yang menembus seluruh akuifer, meluahkan air secara panggah sebanyak $0,08 \text{ m}^3/\text{det}$ dari dalam akuifer itu yang koefisien keterterusannya $25 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{det}$. Akuifer itu berhubungan dengan sebuah danau sejauh 2 km dan selain itu tidak ada sumber penyedia air yang lainnya. Taksir surutan pada bibir sumur.

$$s = \frac{Q_0}{2\pi k H} \ln \frac{R_o}{r}$$

Karena R_o boleh diambil sebagai $2L$ ($=4000 \text{ m}$) dari gambar 5.11, jadi

$$s_0 = \left(\frac{0,08}{2\pi \cdot 25 \times 10^{-3}} \right) \ln \frac{4000}{0,25} = \frac{0,08 \times 9,68 \times 10^3}{157,08}$$

Dengan demikian surutan pada bibir sumur 4,9 m.

5.5.2 Aliran tunak tak tertekan Bila surutannya kecil jika dibandingkan dengan ketebalan akuifer, faktor kH tetap hampir panggah dan rumus untuk aliran tunak tertekan boleh digunakan. Dengan bertambahnya surutan, paras yang merosot menyusutkan luas daerah akuifer yang meneruskan air dan persamaan itu menjadi, dengan tetanda yang terpakai pada gambar 5.12: dari Hukum Darcy

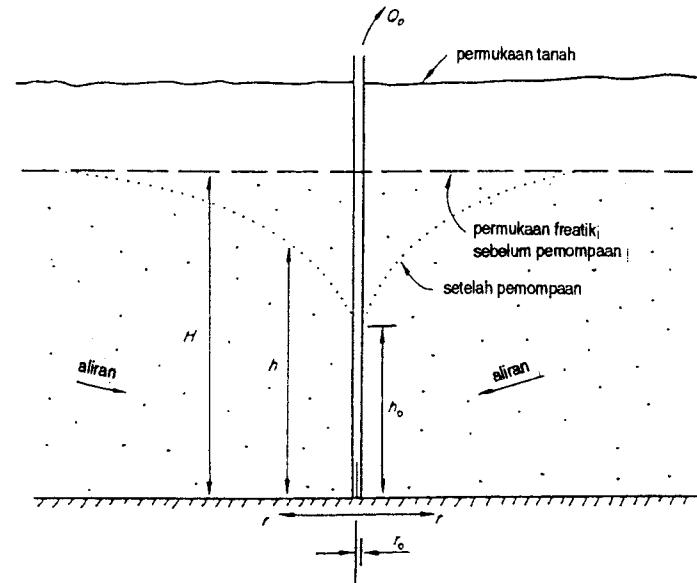
$$Q = 2\pi r \cdot h \cdot k \frac{dh}{dr}$$

dan dari kesinambungan

$$Q = Q_0 = \text{panggah}$$

Menggabungkan kedua-duanya

$$h \cdot dh = \frac{Q_0}{2\pi k} \frac{dr}{r}$$



Gambar 5.12 Pemompaan sumur dari akuifer tak tertekan

Diintegrasikan

$$h^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln r + C$$

dan jika

$$h = H \text{ pada } r = R$$

maka

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln \frac{R}{r} \quad (5.9)$$

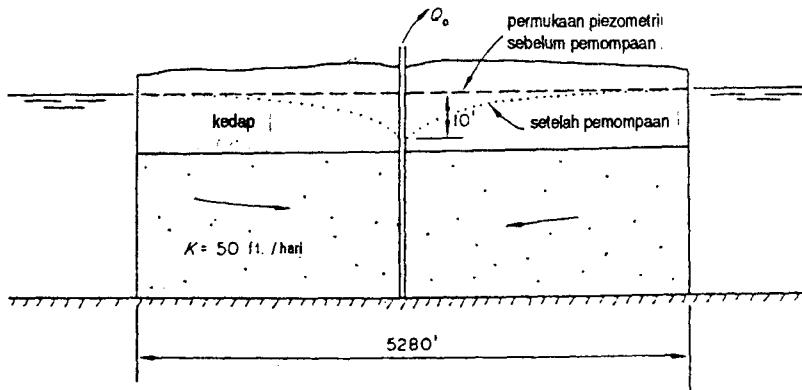
Nilai R harus memenuhi persyaratan batas. Kemudian surutan pada bibir sumur $(H - h_o)$ diturunkan dengan memasukkan jeari sumur r_o , karena

$$H^2 - h_o^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln \frac{R}{r_o}$$

Contoh 5.3 Sebuah sumur dibor sampai ke dasar yang kedap di tengah-tengah sebuah pulau yang bundar dengan garis tengah 1 mil di suatu danau besar. Sumur menembus sama sekali akuifer batupasir setebal 50 kaki yang terindih lempung kedap. Batupasir itu memiliki kelulusan sebesar 50 kaki/hari. Berapa

besarkah luahan tunak jika surutan muka piezometri tidak melebihi 10 kaki pada sumur yang garis tengahnya 1 kaki?

Untuk sebuah sumur di tengah-tengah sebuah pulau yang bundar, persyaratan batas adalah $s = 0$ bila $r = 2640$ kaki.



Gambar 5.13 Memompa dari sebuah sumur di tengah-tengah pulau bundar dan akuifer yang tertekan.

Kemudian dari persamaan 5.8

$$10 = \frac{Q_0}{2\pi \times 50 \times 50} \ln \frac{2640}{0,5}$$

Maka dari itu

$$\begin{aligned} Q_0 &= \frac{50000\pi}{\ln 5280} = \frac{157080}{8,572} = 18340 \text{ kaki}^3/\text{hari} \\ &= 0,212 \text{ kaki}^3/\text{det}. \end{aligned}$$

5.5.3 Pengaliran tunak tak tertekan dengan hujan Jika ada hujan, persamaan itu menjadi: dari Hukum Darcy

$$Q = 2\pi r h \cdot k \frac{dh}{dr}$$

dan dari kesinambungan

$$dQ = -2\pi r \cdot dr \cdot N \quad (\text{di sini } N = \text{resapan bersih})$$

Diiintegrasikan

$$Q = -\pi r^2 N + C_1$$

dan C_1 dapat ditentukan dari syarat bahwa bilamana $r = r_0 = 0$, $Q = Q_0$.

Maka dari itu

$$Q = -\pi r^2 N + Q_0$$

Dengan menyulihkan nilai ini dalam persamaan Darcy

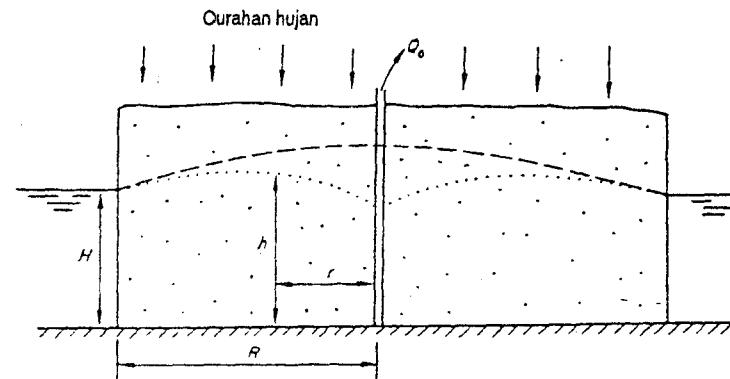
$$h \cdot dh = \frac{Q_0}{2\pi k} \cdot \frac{dr}{r} - \frac{N}{2k} \cdot r dr$$

dan diintegrasikan

$$h^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln r - \frac{N}{2k} r^2 + C_2 \quad (5.10)$$

C_2 merupakan suatu tetapan integrasi yang harus memenuhi persyaratan batas tertentu. Dalam hal sumur yang ada di tengah-tengah pulau bundar itu dengan jari-jari R , bila $r = R$, $h = H$, maka

$$C_2 = H^2 - \frac{Q_0}{\pi k} \ln R + \frac{N}{2k} R^2$$



Gambar 5.14 Sumur di tengah-tengah sebuah pulau bundar dan akuifer tak tertekan dengan hujan

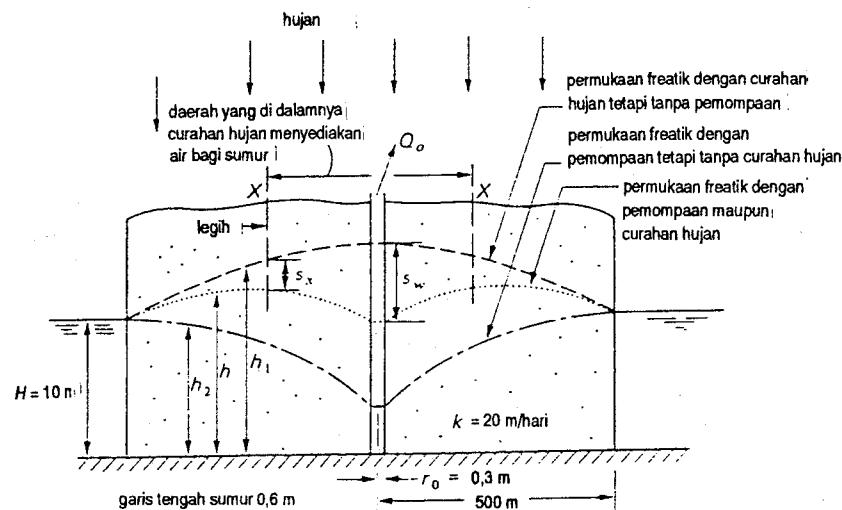
Menyulihkan nilai ini dalam persamaan 5.10

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln \frac{R}{r} - \frac{N}{2k} (R^2 - r^2)$$

Jika $Q_0 = 0$ (yaitu, tidak ada pemompaan) maka bentuk permukaan freatic dinyatakan dengan

$$H^2 - h^2 = - \frac{N}{2k} (R^2 - r^2) \quad (5.11)$$

Contoh 5.4 Sebuah pulau bundar dengan jejari 500 m memiliki resapan N sebesar 4 mm/hari. Sumur di tengah-tengahnya dipompa untuk memberikan Q_0 tetap sebesar 25 m³/jam dari akuifer dengan ukuran dan persifatan seperti terlukis pada gambar 5.15. Berapakah surutan pada sumur itu dan pada legih (pemisah air)?



Gambar 5.15 Pulau bundar dengan sumur di tengah-tengahnya, ada hujan dan akuifer tak terikat. Diselesaikan dengan penekupan

1 Andaikan tak ada pemompaan. Maka dari persamaan 5.11

$$H^2 - h_1^2 = - \frac{N}{2k} (R^2 - r^2)$$

$$100 - h_1^2 = - \frac{0,004}{40} (250000 - r^2)$$

$$100 - h_1^2 = - 25 + \left(\frac{r}{100} \right)^2 \quad (5.12)$$

2 Andaikan tak ada hujan. Maka dari persamaan 5.9

$$H^2 - h_2^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln \frac{R}{r} \quad (5.13)$$

$$100 - h_2^2 = 21,9 \log \frac{500}{r}$$

Dengan memasukkan $r = 0,3$ m (pada bibir sumur) dalam persamaan 5.12 dan 5.13 memberi $h_1 = 11,18$ m dan $h_2 = 5,43$ m. Karena $h = h_1 + h_2 - H$ (dengan menekupkan surutan), maka diperoleh

$$\begin{aligned} h &= 11,18 + 5,43 - 10 \\ &= 6,61 \text{ m} \end{aligned}$$

Maka dari itu

$$\begin{aligned} s_w &= h_1 - h \\ &= 4,57 \text{ m} \end{aligned}$$

Jika ada legih, maka semua hasil sumur itu berasal dari hujan, karena jika laut di sekitar pulau itu juga memberi air, maka kelandaian hidraulik kiranya akan miring ke bawah dan ke dalam pada setiap titik. Jadi daerah yang ikut memberi air itu diperoleh dari

$$Q_0 = \pi r_x^2 N$$

dalam hal ini r_x adalah jejari legih itu, jadi

$$25 = \pi r_x^2 \times \frac{0,004}{24}$$

Maka dari itu

$$r_x = 218 \text{ m} \text{ (jauh lebih kecil daripada jejari daratannya)}$$

Dengan menggunakan nilai r ini, persamaan 5.12 menghasilkan $h_1 = 10,97$ dan persamaan 5.13 memberi $h_2 = 9,60$. Kemudian

$$\begin{aligned} h &= h_1 + h_2 - H \\ &= 10,97 + 9,60 - 10,0 \\ &= 10,57 \end{aligned}$$

Jadi dengan menyebut surutan pada legih s_x :

$$\begin{aligned}s_x &= 10,97 - 10,57 \\&= 0,40 \text{ m}\end{aligned}$$

Andaikan rumus yang sederhana persamaan 5.8 telah digunakan, jadi menganggap tebal akuifer tetap. Dalam hal ini, tanpa hujan

$$\begin{aligned}s_w &= \frac{Q_0}{2\pi kH} \ln \frac{R}{r} = \frac{600}{2\pi \times 20 \times 10} \times 2,3 \log \frac{500}{0,3} \\&= 0,477 \times 2,3 \times 3,223 \\&= 3,54 \text{ m (bandingkan nilai } 4,57 \text{ m di atas)}\end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned}s_x &= 0,477 \times 2,3 \times \log \frac{500}{218} \\&= 1,01 \times 0,36 \\&= 0,364 \text{ (bandingkan nilai } 0,40 \text{ di atas)}\end{aligned}$$

Akan disadari, bahwa rumus yang sederhana itu untuk akuifer yang tertekan memadai untuk hal seperti itu, kecuali untuk tempat yang di dekatnya langsung sumur. Dengan sendirinya masih akan diperlukan untuk menghitung permukaan freaktik ‘tanpa pemompaan’, untuk iwhal tanpa hujan.

5.6 Mengupas uji pompa

5.6.1 Umum Dengan menggunakan persamaan 5.8, kita dapat menentukan surutan yang terhasil dari penyadapan airtanah lewat sumur jika persyaratan batas dan tetapan hidrologi kita ketahui. Khususnya, adanya lapisan pembawa air yang merupakan akuifer, luasnya, tebalnya dan kelulusannya biasanya tak diketahui hingga orang membuat sejumlah lubang bor uji. Setiap lubang itu, selain memberi keterangan mengenai keadaan geologi yang ada di bawah suatu daerah, dapat dibiarkan terbuka dengan penapis sarang yang sederhana di dasarnya untuk memungkinkan orang membuat pengamatan paras air yang berikutnya.

Meskipun banyak informasi dapat dikumpulkan dari membora sumur uji atau sumur pengamatan, besarnya serahan suatu akuifer pada akhirnya hanya dapat ditentukan lewat uji pompa sumur. Kedudukan sumur haruslah sedemikian rupa, sehingga sumur pengamatan ditempatkan pada kedua sisinya, pada sebuah garis yang melewati sumur itu, dan lebih baik pada dua garis yang tegak lurus satu sama lain dengan sumur yang dipompa itu terdapat pada perpotongannya.

Uji pompa dapat dilakukan dengan memompa air dari sumur dengan laju tunak sampai keadaan tahana tunak diperoleh, (yaitu, tak ada gerakan yang kentara

sejalan dengan waktu dalam sumur pengamatan yang mana pun) dan setelah itu merajah semua data yang tercatat, atau lewat pengamatan laju perubahan paras air dalam semua sumur itu sampai (dan termasuk pula) keadaan tahana tunak. Ragam lain yang dapat ditempuh mencakup uji pompa bertingkat dengan luahan yang dinaikkan berangsur-angsur pada selang waktu teratur [4]. Hanya cara yang pertama yang dibicarakan di sini. Untuk pembahasan pemerolehan airtanah, termasuk uji pompa, silakan melihat Huisman [3], Verruijt [5], dan tulisan terkhususkan yang lain.

Sumur pengamatan sebaiknya di tempatkan pada jarak dengan selang yang bertambah dari sumur yang dipompa - katakan saja 20, 50, 100, 200 dan 500m- bergantung pada kedalaman dan harapan kemampuan akuifer untuk menghasilkan air. Untuk pemompaan yang sebenarnya, gunakan selalu pompa kapasitas terbesar yang ada. Penyadapan dengan tingkat lauh yang sama mungkin perlu dilangsungkan selama berhari-hari, atau berminggu-minggu dan dalam beberapa hal berbulan-bulan sebelum tercapai keadaan tahana tunak. Maka dari itu, pengamatan yang cermat harus dilakukan terhadap semua sumur itu sebelum pemompaan dimulai, pada selang waktu teratur selama pengujian itu dilakukan dan selama pemulihan paras air setelah pemompaan dihentikan, hingga paras keseimbangan awal tercapai.

5.6.2 Uji pompa pada sebuah sumur dalam akuifer tertekan Diandaikan tidak ada penambahan air kepada akuifer dari atas (hujan) atau dari bawah. Maka, dari persamaan 5.8

$$s = \frac{Q_0}{2\pi kH} \ln \frac{R}{r}$$

Di sini R bergantung pada baik persyaratan perbatas maupun titik pengamatan. Jika akuifer itu sangat meluas dan r (jarak menjelari ke sebuah sumur pengamatan) tidak terlalu besar, maka untuk $r < 0,1R$

$$s = \frac{Q_0}{2\pi kH} \ln \frac{R_0}{r} \quad (5.14)$$

dan untuk semua titik pengamatan R_0 mempunyai nilai yang sama.

Jika semua nilai surutan s yang diamati itu sekarang dirajah lawan jarak r pada kertas log, maka diperoleh hubungan garis-lurus:

$$s = \left[\frac{Q_0}{2\pi kH} 2,3 \log R_0 \right] - \left[\frac{Q_0}{2\pi kH} 2,3 \right] \log r$$

atau

$$s = A - B \log r$$

Tetapan geohidrologi untuk akuifer sekarang dapat dihitung dari

$$kH = \frac{1}{B} \frac{1,150 Q_0}{\pi}$$

dan

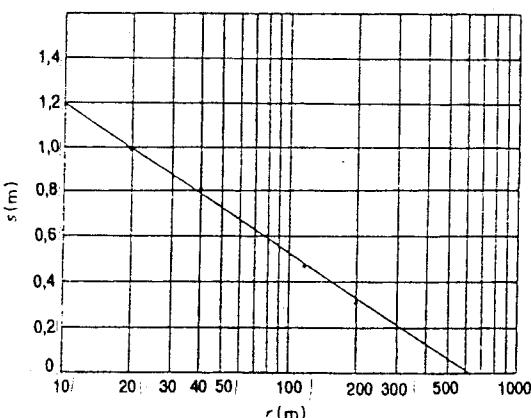
$$\log R_0 = \frac{A}{B}$$

Contoh 5.5 Sebuah sumur yang menembus akuifer tertekan tanpa imbuhan dipompa dengan laju tetap sebesar $0,03 \text{ m}^3/\text{det}$ sampai dicapai keadaan tunak. Surutan kemudian diperoleh dari sumur pengamatan seperti dinyatakan di bawah ini:

s (m)	1,20	1,10	0,81	0,60	0,47	0,31
r (m)	10	20	40	80	120	200

Tentukan tetapan formasi akuifer tersebut.

Dari gambar 5.16, yang merupakan rajah s lawan r



Gambar 5.16 Rajah surutan yang teramatil lawan jarak dari sumur yang dipompa (contoh 5.5)

bila

$$s = 0 : r = 610 \text{ dan } \log r = 2,79$$

$$s = 1,2 : r = 10 \text{ dan } \log r = 1,00$$

memberi hubungan

$$s = 1,87 - 0,67 \log r$$

Dari sini

$$kH = \frac{1}{0,67} \frac{(1,15)(0,03)}{\pi} = 1,64 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{det}$$

dan

$$\log R_0 = \frac{1,87}{0,67} = 2,79$$

$$R_0 = 610 \text{ m}$$

Karena $r < 0,1 R$ untuk dua lubang yang terakhir, kita tidak boleh terlalu mengandalkan pada nilai itu pada waktu kita menggambarkan hubungan s/r . Ingat, jika Q diukur dalam m^3/det , kH adalah dalam m^2/det .

5.6.3 Uji pompa pada sumur dalam akuifer tak tertekan Diandaikan, tidak ada pengimbuhan dari atas (hujan) atau dari bawah. Dari persamaan 5.9

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln \frac{R}{r}$$

Sisi kiri persamaan ini dapat ditulis $(H - h)(H + h)$. Tetapi karena $(H - h) = s$, dan karena itu $h = (H - s)$, jadi sisi kiri dapat pula ditulis sebagai $s(2H - s)$. Maka dari itu

$$s = \frac{Q_0}{\pi k(2H - s)} \ln \frac{R}{r}$$

atau

$$s = \frac{Q_0}{\pi k(2H - \frac{s}{2})} \ln \frac{R_0}{r} \quad (5.15)$$

untuk semua titik di dekat sumur dalam akuifer yang luas.

Bila surutan itu kecil dibandingkan dengan kedalaman akuifer, $s/2$ dapat diabaikan dan rumus surutan sama dengan untuk akuifer tertekan (persamaan 5.14).

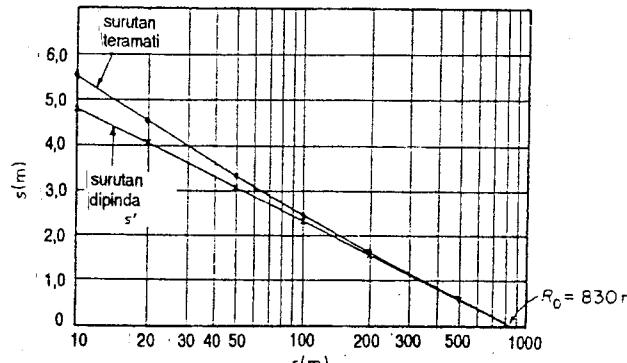
Dengan mengandaikan bahwa h diketahui secara kira-kira dari lubang bor pengamatan dan $s/2$ tidak dapat diabaikan, maka penulisan kembali pers. 5.15 memberikan

$$s' = s \left(1 - \frac{s}{2H} \right) = \frac{Q_0}{2\pi k H} \ln \frac{R_0}{r}$$

dan s' dapat dirajah lawan r dengan cara yang terlukis dalam gambar 5.16.

Contoh 5.6 Gambar 5.17 adalah rajah surutan yang diamati lawan r untuk sebuah sumur dalam akuifer tak tertekan yang meluah secara tetap $0,03 \text{ m}^3/\text{det}$.

Kedalaman akuifer di bawah permukaan freatic telah ditentukan pada waktu pemboran yaitu lebih kurang 20 m. Tentukan tetapan formasi.



Gambar 5.17 Surutan yang diamati dan dipinda s' untuk akuifer tak tertekan.

s' , surutan yang telah dipinda, dihitung untuk setiap surutan yang diamati dan dari hubungan garis lurus dengan r

$$s' = A + B \log r$$

Karena $s' = 4,8$ bila $r = 10$, maka $\log r = 1,00$
dan karena $s' = 0$ bila $r = 830$, maka $\log r = 2,92$
Maka dari itu

$$A - 2,92B = 0$$

$$A - 1,00B = 4,8$$

jadi

$$A = 7,30 \text{ dan } B = 2,50$$

Juga

$$kH = \frac{1}{2,50} \cdot \frac{(0,03)1,15}{\pi} = 4,39(10^{-10}) m^2/\text{det}$$

jadi

$$R_0 = 830 \text{ m}$$

Acuan

- 1 Cruse, K. A review of water-well drilling methods. *J. Eng. Geol.*, 12 (1979) 62
- 2 Stoner, R. F. dkk., Economic design of wells. *J. Eng. Geol.*, 12 (1979) 63
- 3 Huisman, L. *Groundwater Recovery*, Macmillan, London, 1972
- 4 Verruiz, A. *Theory of Groundwater Flow*, ed. 2, Macmillan, London, 1981
- 5 Brereton, N.R. Step-drawdown pumping tests for the determination of aquifer and bore-hole characteristics. *Water Research Centre. TR103*. Medenham, January 1979.

Bacaan selanjutnya

- Aronovici V.S. The mechanical analysis as an index of subsoil permeability. *Proc. Am. Soc. Soil Sci.* 11 (1947) 137
- Cedergreen, H.R. *Seepage, Drainage and Flow Nets*, John Wiley, New York, 1967
- Childs, E.C. dan Collis-George, N. The permeability of porous materials, *Proc. Roy. Soc.*, A201 (1950) 392
- Kirkham, D Measurement of the hydraulic conductivity of soil in place. *Symposium on Permeability of Soils. American Society for Testing and Materials, Special Tech. Publication 163*, 1955, p.80
- Rushton, K. R. dan Redshaw, S. C. *Seepage and Groundwater Flow*, Wiley, 1979
- Todd, D.K. *Ground Water Hydrology*, John Wiley, New York, ed. 2, 1980
- Wenzel, L.K. Methods for determining permeability of water bearing materials. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper 887*, Medmenham, 1942

Soal

- 5.1 Hujan sebanyak 2,50 m setiap tahun tercurah di jalur yang lebarnya 1 km, yang terletak di antara dua saluran sejajar, saluran yang satu (A) 3 m lebih tinggi daripada yang satu lagi (B). Tingkat resapan 80 persen dari curahan hujan dan tak ada yang melimpas. Akuifer yang bersaluran itu dalamnya 10 m di bawah permukaan saluran B dan kedua saluran itu menembus akuifer. Di bawahnya terdapat lapisan kedap yang mendatar. Hitung luahan

- setiap meter panjang ke dalam kedua saluran itu, dengan mengandaikan batasnya menegak dan koefisien kelulusan akuifer $K = 10 \text{ m/hari}$.
- 5.2 Sumur yang menembus akuifer tertekan bergaristengah 0,5 m telah diuji pompa dengan laju $0,025 \text{ m}^3/\text{det}$ hingga keadaan tahana tunak tercapai.

Sumur pengamatan pada jarak yang berbeda-beda dari sumur itu menunjukkan hasil sbb.:

Jarak r dari sumur (m)	20	50	200	500
Surutan s (m)	0,79	0,63	0,39	0,235

Dengan menggunakan hasil tersebut, tentukan tetapan formasi untuk akuifer itu dan dari sana tentukan serahan tetap maksimum sumur jika surutan dalam sumur tidak akan melebihi 3 m. (Perhitungkan 0,5 m untuk kehilangan akibat penapis dan balut.)

6

Limpasan permukaan

6.1 Masalah keteknikan yang bersangkutan

Curahan hujan, jika tidak tercegat oleh tetumbuhan atau oleh permukaan buatan seperti atap atau lantai, jatuh di bumi dan menguap, meresap atau masuk dalam simpanan pada lekuk. Bila semua yang hilang dengan cara itu sudah terpenuhi, mungkin saja ada yang berlebih yang tunduk kepada hukum gravitasi dan mengalir di atas permukaan tanah ke alur sungai terdekat. Aliran pun menyatu menjadi sungai dan sungai menemukan jalannya ke laut. Bila hujan sangat lebat atau berkelanjutan, atau kedua-duanya, *limpasan* atau *larian* yang berlebihan itu menjadi besar dan alur sungai tidak dapat menerima semua air yang datang tiba-tiba itu. Alur tersebut menjadi penuh dan melampaui tepinya dan dengan demikian menimbulkan petaka kepada kegiatan manusia. Pengaruh yang paling gawat oleh banjir mungkin saja hanyutnya tanah pucuk yang subur yang terpakai untuk tanaman dan yang makin langka di bumi ini. Di daerah perkotaan timbul kerusakan pada milik orang, pencemaran penyediaan air, membahayakan hidup dan sering merusak jalur hubungan. Dalam masyarakat petani banjir ditakuti seperti penyakit pes karena dapat merusak panen, ternak dan tempat tinggal, dan sesudahnya menimbulkan paceklik.

Seorang insinyur air, dalam menghadapinya harus berusaha memberi jawaban kepada banyak pertanyaan, beberapa di antaranya yang nyata adalah

- i berapa seringkah terjadi banjir?
- ii berapakah besarnya dan sampai setinggi manakah naiknya?
- iii berapa seringkah terjadi kekeringan?
- iv berapa lamakah kekeringan itu?

Pertanyaan sejenis ini merupakan ragam pertanyaan yang berhubungan dengan besar dan lamanya limpasan dari suatu daerah tadah tertentu dalam

hubungannya dengan waktu. Semua itu dapat diselesaikan hanya dengan menentukan kekerapan dan lamanya luahan tertentu dari pengamatan sepanjang masa yang lama, meskipun jika hasil pengamatan seperti itu tidak tersedia orang masih dapat membuat taksiran dengan berbagai peluang.

Kelompok kedua, pertanyaan timbul dalam menggunakan lengkung kekerapan dan jujuh (lamanya) jika semua itu telah ditemukan; misalnya

- i bagaimanakah besarnya luahan dapat disusutkan?
- ii bagaimanakah harga penanggulangan banjir dapat dibandingkan dengan kerusakan yang akan timbul jika tidak diadakan sesuatu tindakan?
- iii berapakah harga air yang tersimpan itu pada waktu ada kekeringan?

Semua pertanyaan itu tidak langsung berhubungan dan masing-masing menyangkut pendekatan yang berbeda dan nyata meskipun kiat yang sama dapat digunakan untuk menjawab lebih dari sebuah pertanyaan. Dalam pasal ini dan yang selanjutnya akan diteliti cara beberapa di antara pertanyaan itu dijawab.

6.2 Ciri DAS dan pengaruhnya terhadap limpasan

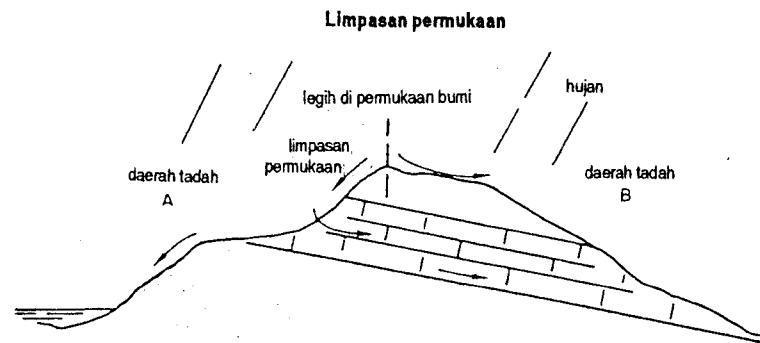
Kini adalah wajar untuk meninjau bagaimana berbagai persifatan *daerah tадah* berpengaruh terhadap tinggi dan banyaknya luahan yang berasal daripadanya. Yang dimaksud dengan ‘daerah tадah’ ialah seluruh permukaan darat dan air yang memberi sumbangan kepada luahan pada irisan sungai, besar atau kecil, tertentu. Dari sini jelaslah, bahwa setiap titik pada alur sungai memiliki daerah tадahnnya sendiri yang khas, dan ukurannya terus bertambah dengan bergeraknya titik sukat ke hilir, dan mencapai angka tertinggi bila titik sukat itu terletak di tepi laut.

Ada banyak persifatan daerah tадah yang mempengaruhi limpasan dan setiap sifat itu dapat saja ada, entah besar entah kecil. Maksud untuk mengupas setiap sifat itu secara terpisah-pisah adalah usaha untuk menentukan pengaruhnya terhadap pencurahan dan setelah itu pelimpasannya dari daerah tадah melewati semua alur sungai.

a *Daerah tадah* Daerah itu yang batasannya disajikan pada permulaan pasal ini biasanya, tetapi tidak harus, dibatasi oleh *legih* (*pemisah-air*). Gambar 6.1 memperlihatkan irisan melintang hipotetis memotong legih suatu daerah tадah. Disebabkan oleh geologi yang mengalasinya, adalah sangat mungkin jika daerah di luar legih itu juga memberi air kepada DAS tersebut. Tetapi batas yang sebenarnya tidaklah dapat ditentukan, karena meskipun ada saja airtanah yang terdapat di sebelah kiri legih dalam gambar itu mungkin mencapai DAS B,

limpasan permukaan akan tetap dalam DAS A. Di sini daya resap tanah dan kehebatan curah hujan dapat berpengaruh pada bagian curahan yang terkumpul dalam setiap DAS itu.

Jika limpasan dinyatakan tidak sebagai besaran menyeluruh bagi suatu DAS tetapi sebagai besaran setiap luasan satuan (biasanya m^3/det setiap kilometer persegi), orang telah mengamati, bahwa limpasan puncak menurun dengan naiknya DAS, jika berbagai segi yang lain sama. Hal ini disebabkan oleh waktu hingga yang diperlukan air untuk mengalir melewati alur sungai ke irisan kendali (*waktu pengumpulan*) dan juga karena kehebatan rerata hujan yang lebih rendah dengan bertambah besarnya ukuran badai (lihat ayat 2.8.4). Serupa dengan itu, limpasan terkecil setiap luas satuan naik karena luasnya akuifer yang sangat bertambah dan curahan setempat kecil.

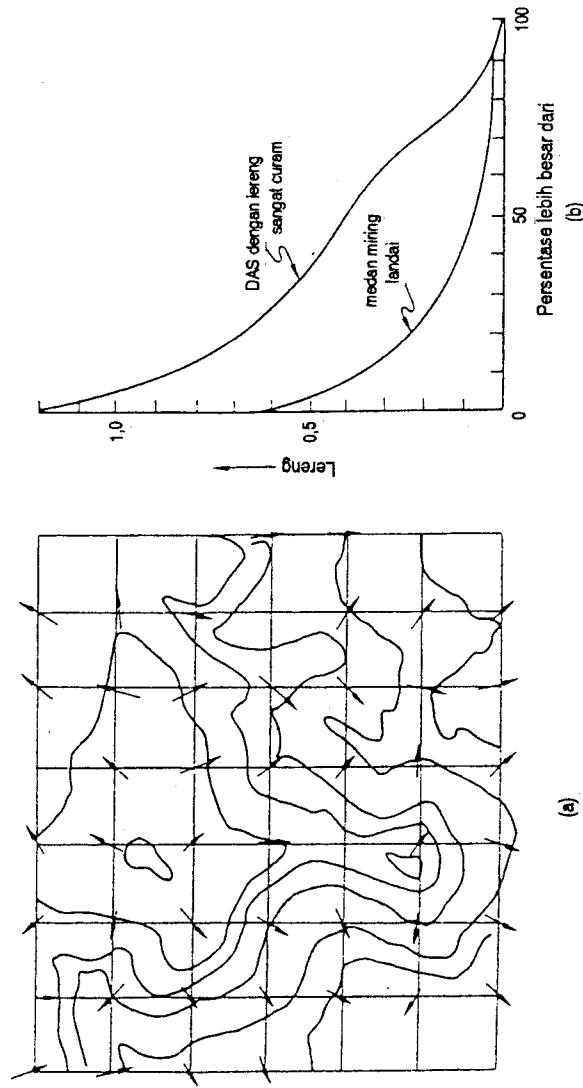


Gambar 6.1 Legih sebagaimana ditentukan oleh geologi maupun topografi

b *Panjang sungai induk (PSI)* Ini diukur dalam km dari tempat penyukatan atau pengeluar DAS. Bila orang mengukur dari peta biasanya digunakan cara baku untuk menghilangkan kesubjektifan (misalnya tempatkan pembagi pada 0,1 km pada peta sekala 1:25.000).

c *Lereng DAS* Makin miring permukaan tanah makin cepat pula merambatnya limpasan permukaan itu, sehingga waktu kumpul menjadi lebih pendek dan puncak bajir menjadi lebih tinggi. Daya resap cenderung lebih kecil dengan makin curamnya lereng, karena tetumbuhan kurang padat dan tanah lebih mudah terkikis, sehingga mempertajam limpasan.

Lereng dapat diangkakan dengan menutup peta kontur DAS dengan kekisi tegak lurus dan menilai lereng itu, tegak lurus terhadap garis kontur pada setiap titik

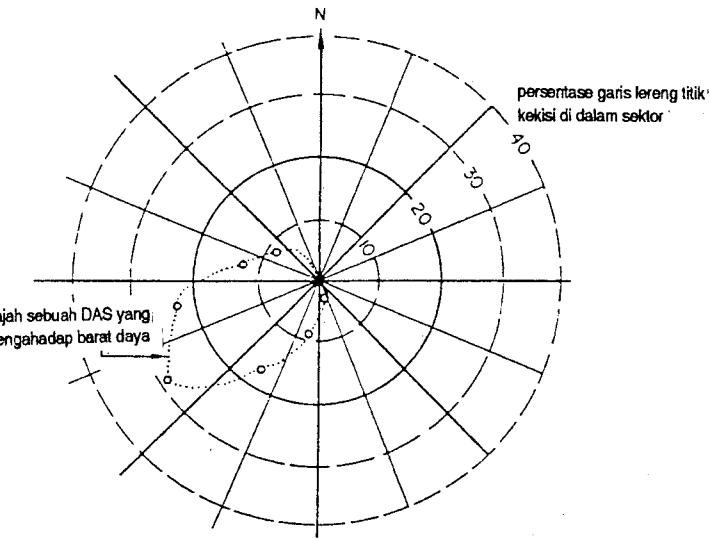


Gambar 6.2 a Kekisi tegak lurus untuk menilai lereng dan arah DAS. b Lengkung kekerapan untuk membandingkan kecuraman DAS

kekisi sebagaimana terlukis dalam gambar 6.2a. Sebaran kekerapan angka itu kemudian dapat dirajah seperti pada gambar 6.2b. DAS yang berbeda-beda dapat diperbandingkan pada rajahan yang sama, dan lengkung kekerapan yang nisbi curam menunjukkan tangkapan limpasan cepat dan lengkung yang rata kebalikannya.

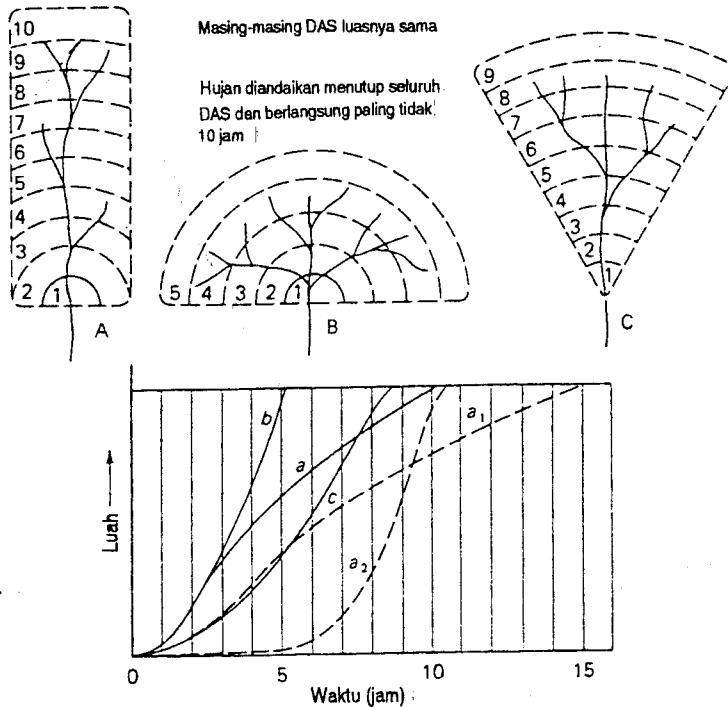
Cara yang lebih sederhana adalah menyatakan lereng itu dalam m/km antara 2 titik pada sungai induk. Titik baku yang digunakan di Inggris adalah 10% dan 85% dari panjang sungai induk di atas titik yang diperhatikan. Lereng sebagaimana diberi batasan dengan cara ini ditulis sebagai S1085.

d Arah DAS Arah DAS penting terhadap meteorologi daerah yang bersangkutan tempat terdapatnya DAS itu. Jika angin yang umum dan garis gerakan badai mempunyai pola musiman khas, seperti memang demikian yang terjadi, maka hidrograf limpasannya akan bergantung, sampai batas tertentu, pada arah di antara pola tersebut. Kekisi pada gambar 6.2a pun dapat digunakan untuk corak ini, dengan dinilainya sudut antara arah lereng dan garis bujur utara-selatan (katakan saja) pada setiap titik kekisi dan setelah itu perajahan diagram kekerapan melingkar seperti pada gambar 6.3 serupa dengan arah mata angin.



Gambar 6.3 Diagram arah

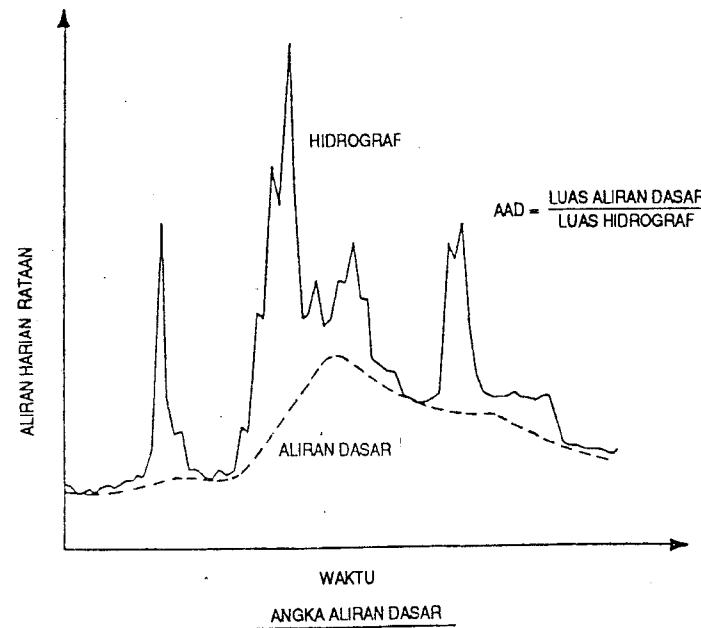
e. **Bentuk DAS** Pengaruh bentuk dapat dinyatakan sebaik-baiknya dengan menganggap hidrograf luahan dari tiga DAS di suatu daerah yang bentuknya berbeda-beda, seperti terlukis pada gambar 6.4, yang terkena hujan dengan kelebatan yang sama. Jika setiap DAS itu dibagi ke dalam panggu sama pusat yang dapat diandaikan memiliki titik dalam jarak yang sama di sepanjang alur sungai dari titik kendali, maka dapat dilihat bahwa bentuk A itu akan membutuhkan sepuluh satuan waktu (katakan saja jam) untuk melewati sebelum setiap titik pada DAS tersebut memberi saham kepada luahan. Serupa itu, B akan memerlukan 5 jam dan C $8\frac{1}{2}$ jam. Hidrograf yang diperoleh dari limpasan akan serupa dengan yang terlukis pada gambar 6.4, dan setiap hidrograf itu ditandai dengan huruf miring kecil yang bersesuaian. B menghasilkan kenaikan sungai yang lebih cepat daripada C dan A, dan serupa itu, rosotan yang lebih cepat karena waktu tempuh yang lebih pendek.



Gambar 6.4 Pengaruh bentuk pada limpasan DAS

Faktor bentuk juga mempengaruhi limpasan bila badai tidak meliputi seluruh DAS sekaligus tetapi bergerak di atasnya dari ujung yang satu ke ujung yang lain. Sebagai misal, pandang DAS A sebagai tertutup perlahan-lahan oleh badai yang bergerak ke arah hulu dan terliputi tepat setelah 5 jam. Saham banjir panggu terakhir itu tidak akan tiba pada titik kendali itu setelah 15 jam sejak mulainya, sehingga hidrograf a pada gambar 6.4 sekarang akan mempunyai bentuk lengkung a_1 pada gambar itu. Atau kemungkinan lain, jika badai itu misalnya bergerak dengan kecepatan sama ke arah hilir, saham banjir panggu-waktu 10 kiranya akan tiba pada titik kendali hanya 5 jam setelah tibanya pada panggu 1, sehingga akan terjadilah kenaikan banjir cepat (a_2 pada gambar 6.4). Pengaruh berubahnya arah bergerak badai pada DAS yang setengah lingkaran dan berbentuk kipas itu akan kurang menonjol daripada ini, tetapi masih dapat ditangkap.

f. **Curah hujan rata-rata tahunan** Untuk daerah yang telah maju, orang dapat memperoleh curah hujan tahunan rata-rata baku (CTRb). Hal seperti itu terdapat misalnya bagi Kepulauan Inggris untuk jangka waktu 1941–1970.



Gambar 6.5 Perhitungan AAD dari data aliran

g Kekerapan sungai Pola perkembangan sungai dalam suatu DAS dapat mempunyai akibat kuat pada tingkat limpasan. DAS yang tersalirkkan dengan baik, menurut perbandingan mempunyai waktu pengumpulan pendek dan oleh karena itu hidrograf kenaikan banjirnya lebih curam daripada misalnya DAS dengan banyak lekukan di permukaan, lahan yang berawa, dan danau kecil-kecil. Salah satu cara ialah mengukur *kerapatan sungai* DAS itu, dengan mengukur panjang alur sungai setiap luas satuan; cara lain yang digunakan dalam Laporan Pengajian Banjir ialah untuk menyatakannya dengan jumlah kuala setiap luas satuan, dengan menggunakan peta dengan skala baku.

h Angka aliran dasar (AAD) Ini ialah penunjuk yang dihitung sebagai nisbah aliran di bawah hidrograf tersendiri (lihat pasal 7.3) terhadap aliran di bawah hidrograf jumlahan. Ini merupakan petunjuk yang baik akan simpanan bawah tanah DAS itu, yang bergantung pada geologi-padat daerah yang bersangkutan. Berbagai cara untuk menaksir yang diberikan pada ayat 6.6.4 dan gambar 6.5 melukiskan AAD dihitung dari data aliran.

i Luasan danau dan waduk Semua itu bertindak sebagai simpanan air permukaan dan mempunyai akibat melicinkan hidrograf DAS yang ada dalam daerahnya.

j Ketunaan kelengasan tanah Ini merupakan parameter iklim yang bergantung pada curah hujan dan uappeluhan dan telah dibicarakan dalam bab 4.

Selain itu ada beberapa faktor lain, termasuk di antaranya *ketinggian* (dengan pengaruhnya pada suhu dan di daerah berlintang tinggi, keterdapatannya salju pada musim dingin), *penggunaan lahan* (apakah berhutan atau berupa lahan pengembalian), *perbandingan perkembangan kota*, dan *keadaan alur sungai*.

6.3 Faktor iklim

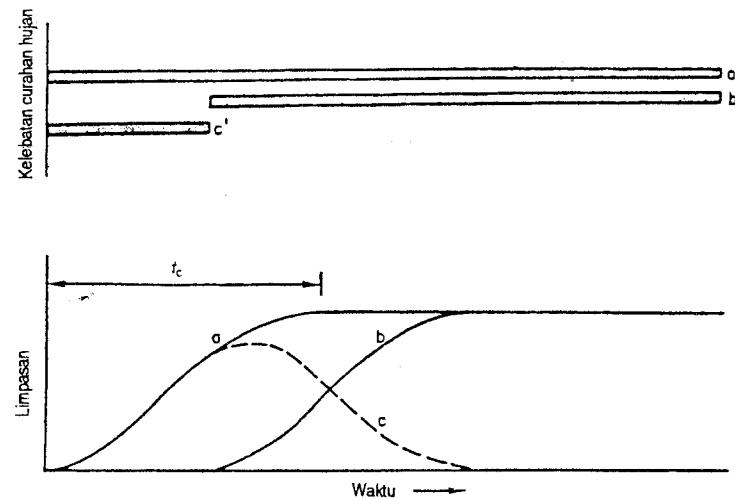
Dalam pasal 6.2 e sudah ditunjukkan kepada pengaruh bergeraknya badai pada limpasan permukaan. Jika luasan daerah badai adalah demikian bahwa badai itu tidak meliputi seluruh DAS, maka limpasannya akan lebih kecil daripada jika badai itu terjadi di seluruh DAS.

Bentuk curahan juga ada pengaruhnya, karena hujan salju dan suhu membeku dapat menyebabkan limpasan yang diperkirakan sama sekali berubah menjadi simpanan dan menyusutkan pengappeluhan.

Tetapi pengaruh terbesar iklim adalah pada *kelebatan dan jujuh (lamanya)* curahan hujan. Kelebatan curahan mempunyai pengaruh langsung pada limpasan karena sekali kapasitas resap itu terlampaui semua hujan yang berlebih itu tersedia dan mengalir ke alur air permukaan. Kelebatan itu sangat beragam,

yang tertinggi biasanya terjadi pada badai setempat yang hebat. Dapat dipahami bahwa puncak setempat yang hebat itu hanya terekam secara kebetulan, sehingga kelebatan tertinggi yang terekam sudah pasti terlampaui berkali-kali. Karena kelebatan menggambarkan, kedalaman/waktu, maka hal itu tidak dapat ditinjau secara terpisah dari lamanya peristiwa hujan. Kedalaman hujan yang sama yang terjadi pada dua jujuh yang berbeda-beda akan menghasilkan tingkat limpasan yang berbeda-beda pula. Demikian pula, iklim yang berbeda-beda menghasilkan keadaan meteorologi yang berbeda-beda yang mengarah kepada jenis hujan yang berbeda-beda, yang pada hakikatnya mempunyai jujuh yang sangat tidak serupa. Misalnya, di Inggris suatu badai guntur dapat secara nyata menghasilkan kelebatan curah hujan setinggi 10 mm/menit (lihat gambar 2.4) tetapi tidaklah dapat dibayangkan bahwa badai yang demikian itu dapat berlangsung selama menitan, sedangkan hujan *muson* di India dapat jatuh terus menerus selama berminggu-minggu dengan kelebatan rata-rata lebih besar daripada 10 mm/jam, suatu keadaan yang tak pernah didekati di banyak bagian di dunia ini.

Pengaruh lamanya hujan pada hidrograf limpasan dapat dilihat pada gambar 6.6, yang menunjukkan *badai berkelebatan seragam* menimbulkan hidrograf kenaikan sungai a. Badai seperti itu dapat diberi batasan sebagai meliputi seluruh DAS, yang di atasnya kedalaman curah hujannya secara wajar tetap dan



Gambar 6.6 Hidrograf limpasan badai jangka-pendek yang diturunkan dari dua badai berkelebatan seragam berjangka panjang

diberikan pada tingkat yang sama. Meskipun jarang di alam, kejadian itu dalam hidrologi digunakan untuk menentukan ciri DAS. Setelah waktu tertentu, t_c , waktu kumpul, tingkat limpasan menjadi tetap. Hidrograf jenis ini bersifat khas bagi DAS yang sangat kecil; misalnya, di daerah kota yang diperkeras, limpasan yang tetap seperti itu tercapai dengan segera. Sebagai aturan umum, DAS alami sebarang ukuran mempunyai jangka waktu kumpul yang lebih panjang, ketimbang jangka waktu hujan yang kelebatannya seragam. Pengaruh jangka waktu hujan yang pendek dapat ditemukan dengan mengurangi hidrograf dua jangka waktu yang panjang, melebihi t_c , dan terpisahkan lamanya yang satu dari yang lain, oleh jangka waktu yang pendek. Pada gambar 6.6, a dan b merupakan hasil curah hujan a' dan b'. Hasil pengurangannya memberikan hujan jangka-pendek c' dengan hidrograf c yang berhasil, yang merupakan bentuk khas sebagian besar hidrograf alami.

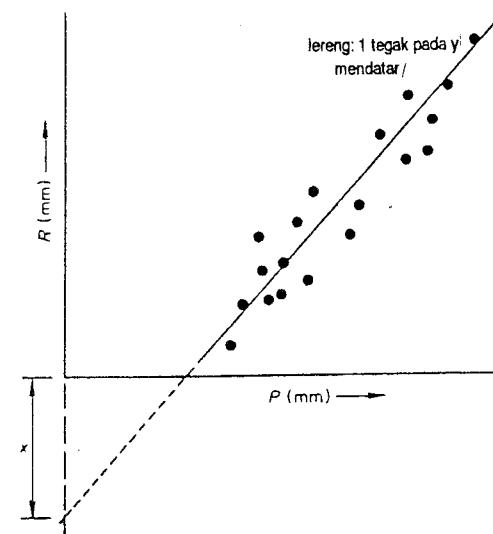
6.4 Penasaban curah hujan/limpasan

Memang terdapat hubungan umum sebab-dan-akibat antara curah hujan dan limpasan yang terhasil. Akan jelaslah sekarang, bahwa hubungan itu tidaklah bersifat langsung. Jika uapan, cegatan, simpanan lekukan, resapan, dan ketunaan kelengasan tanah semuanya telah diperhitungkan, dan curah hujan sisa yang terhasil dengan berbagai kelebatan telah dikenakan kepada DAS dengan berbagai ukuran, kemiringan, bentuk, ketinggian, geologi bawah-permukaan dan iklim, maka hubungan itu haruslah mencakup pula semua nilai sepaling yang menentang semua penasaban yang masuk akal, paling tidak pada jangka yang pendek.

Walaupun demikian, mungkin saja kita membuat hubungan empiris bagi DAS tertentu yang didasarkan pada curahan dan limpasan tahunan. Untuk tujuan itu sebaiknya yang digunakan *tahun-air* ketimbang tahun takwim. Ini ialah jangka waktu 12 bulan, yang berawal dan berakhir pada waktu aliran terkecil musiman. Jika curahan dan limpasan dirajah yang satu terhadap yang lain sebagai kedalaman tадahan, maka akan diperoleh nasaban seperti tampak pada gambar 6.7. Di daerah iklim sedang dan tropika lembap, kita biasanya menemukan hubungan yang umumnya berupa garis lurus seperti itu. Dalam hal itu, P , curahan tahunan, dan R , limpasan, dinyatakan sebagai

$$R = \frac{P}{y} - x \quad (6.1)$$

Dengan demikian curah hujan tahunan dapat digunakan untuk memperoleh hampiran pertama pada limpasan tahunan. Young telah menganalisis penasaban itu atas dasar data seluruh dunia [1].



Gambar 6.7 Hubungan curah hujan/limpasan

Jika ada yang menyimpang dari garis lurus itu mungkin saja hal itu disebabkan oleh keadaan dalam tahun sebelumnya yang berakibat pada muka airtanah yang tampak mencolok lebih tinggi, atau karena keragaman dalam sebaran-musiman curah hujan. Cara itu pun dapat digunakan untuk bulan-bulan basah dalam iklim lembap pada waktu tanahnya jenuh, tetapi di luar batas yang sempit itu, persyaratan itu tidak berlaku.

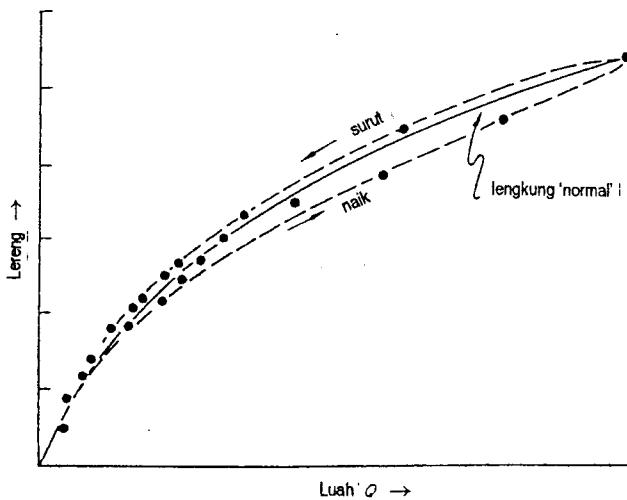
Meskipun penggunaan hubungan seperti persamaan 6.1 itu terbatas, namun cara itu dapat berguna untuk menaksir jumlah limpasan tahunan atau diterapkan pada DAS yang tidak disukat sama sekali. Hubungan itu telah diperkembangkan untuk dipakai dalam hidrograf sintesis, dengan menggunakan angka kebasahan tадahan dan ciri tanah sebagai parameter [2].

Penghalusan lebih lanjut adalah mungkin, dengan mempertimbangkan jangka waktu tertentu tahunnya, penunjuk curahan sebelumnya (lihat ayat 4.4.2), dan lamanya badai maupun kedalamannya, sehingga hubungan itu dapat diturunkan untuk badai tertentu pada DAS tertentu. Grafik sesumbu dapat dibuat yang juga mempertimbangkan berbagai peubah. Hubungan dengan bentuk ini terlukis pada gambar 4.7.

6.5 Lengkung tarafan aliran: penentuan, penyesuaian dan peluasannya

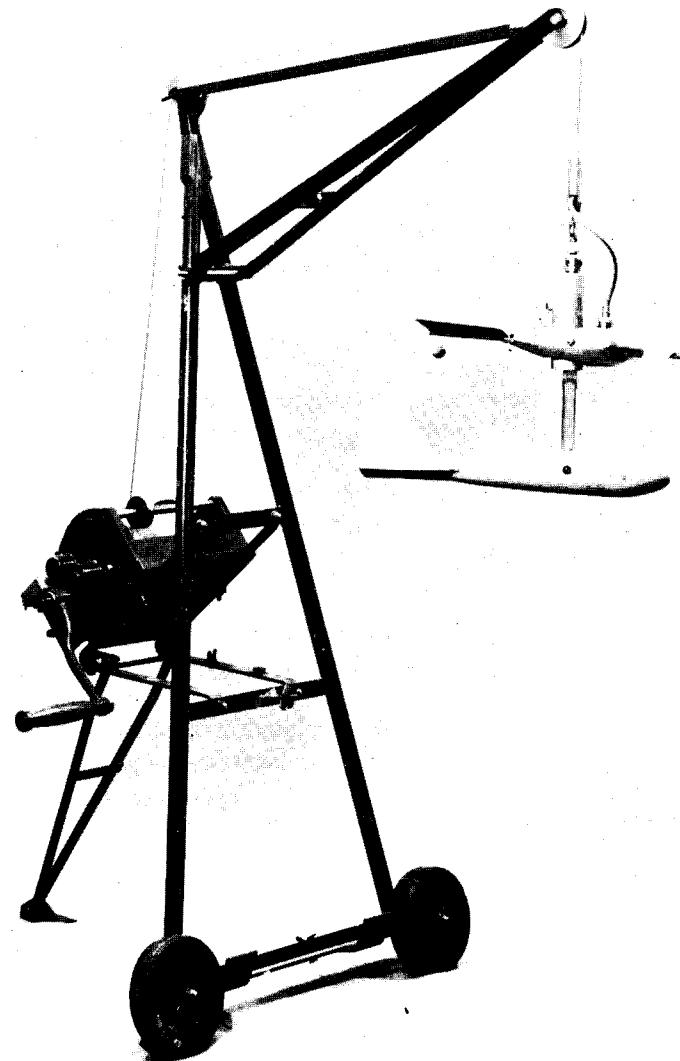
6.5.1 Batasan Lengkung tarafan adalah grafik yang memperlihatkan hubungan antara tinggi paras air, atau *tingkat* suatu alur sungai pada irisan tertentu, dan luahan yang bersesuaian pada irisan itu. Lengkung tarafan yang khas disajikan pada gambar 6.8. Dapat dilihat bahwa lengkung itu digambar melewati segerombol titik, dan setiap titik itu mewakili hasil pengukuran luahan sungai. Pengukuran yang demikian itu dapat dibuat dengan sejumlah cara, dan yang terpenting di antaranya ialah

- 1 cara kecepatan-luasan;
- 2 bangunan-ukur aliran;
- 3 penyukatan pengenceran.



Gambar 6.8 Lengkung tarafan aliran

6.5.2 Cara kecepatan-luasan Ini merupakan hal yang lazim untuk sungai yang sedang hingga yang besar. Untuk itu orang biasanya menggunakan *peukur arus* yang berupa alat pengukur kecepatan zat alir. Sebuah baling-baling kecil berputar mengelilingi sebatang gandar mendatar, yang dijaga sejajar dengan garis alir oleh sirip ekor. Alat itu diberi pemberat untuk menjaganya sedapat



Gambar 6.9 Peukur arus ulir buatan Hilger & Watts Ltd.

mungkin langsung di bawah si pengamat. Alat serupa yang bentuknya lain memiliki lingkaran kecil-kecil manguk runjung yang tersusun mendatar di sekitar sumbu gantungnya.

Setiap putaran sumbu itu direkam secara listrik lewat kabel ke pengamat dan jumlah putaran dicacah oleh pengamat atau secara otomatis selama jangka waktu pendek (katakan saja 1 atau 2 menit). Semua hasil pengamatan itu diubah menjadi kecepatan air dari lengkung kalibrasi bagi alat tersebut. Dengan menggerakkan peukur itu menegak dan mendatar pada sederet kedudukan yang koordinatnya diketahui pada irisan melintang, dapatlah digambarkan dengan lengkap peta kecepatan irisan itu dan luahan melewati irisan melintang itu pun dapat dihitung. Gambar 6.9 melukiskan sebuah peukur arus masa kini yang dirakit untuk digunakan pada kabel penanggungnya; alat ini juga dapat digunakan untuk mengukur kedalaman.

Pengamatan dilakukan dengan menurunkan alat itu dari jembatan, tetapi jika jembatan itu tak hanya berbentangan tunggal, maka akan ada pemencaran dan pengumpulan garis alir yang disebabkan oleh tiang jembatan, yang dapat menimbulkan galat besar. Akan tetapi dalam banyak hal, tempat penyukatan – yang harus ada pada ruas sungai yang selurus dan seragam mungkin – hendaknya tidak berjembatan, dan jika sungai itu dalam dan sedang banjir, harus tersedia kabel untuk mengikat perahu supaya cukup mantap, dan ada sebuah kabel ukur yang lebih ringan untuk menentukan kedudukan mendatar pada irisan melintang.

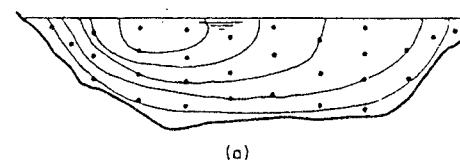
Karena seretan pada perahu yang paling tidak berpenumpang dua orang dan arus yang tertahan itu besar, haruslah digunakan kabel baja yang terikat dengan baik. Adanya pohon yang cukup besar pada tempat tertentu sering mengharuskan orang memilihnya atas dasar alasan itu. Pilihan lain, lintasan kabel sering digunakan untuk menggantungkan alat ukur itu, dari kereta gantung yang berpenumpang ataupun dari kabel itu; dalam hal terakhir itu, alat ukur ditempatkan pada kedudukannya dari tepi sungai dengan pertolongan kabel-bantu.

Kedalaman haruslah selalu diukur pada waktu pengamatan kecepatan karena penampang dapat berubah besar selama peluahan banjir. Seorang pengamat juga harus ingat akan ketentuan dasar seperti mengamati ketinggian atau taraf sungai sebelum dan setelah pegukuran luahan, dan untuk mengamati kemiringan air dengan penyipatdataran terhadap patok pada paras sungai sampai sejauh dianggap ada gunanya, ke hulu dan ke hilir dari tapak penyukatan, katakan saja 500 m pada masing-masing arah.

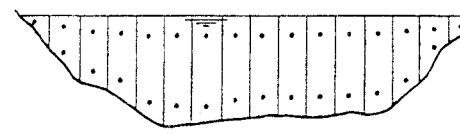
Dengan naiknya kecepatan arus pada waktu banjir besar, peukur air makin lama makin hanyut ke arah hilir pada kabel yang melengkung. Kedudukan alat ukur dalam keadaan seperti itu dapat cukup teliti jika sudut kabel tersebut diukur. Pemberatnya dapat ditambah, tetapi hanya sampai batas tertentu. Orang dapat menggunakan galah untuk menggantungkan alat ukur itu, tetapi untuk itu lalu diperlukan kerangka kaku yang terpasang pada perahu tersebut untuk memegang galah tadi, yang memerlukan anjungan yang mantap sejenis katamaran. Galah yang bergetar dan melengkung adalah umum dalam sungai yang dalam, kecuali jika garis tengahnya melebihi 50 mm, dan dengan itu seluruh peralatan menjadi sangat berat dan sulit ditangani.

Setiap sungai memiliki kekhasannya sendiri. Maka dari itu akan sangat baik bahwa sungai yang akan diselidiki itu diketahui dengan teliti lebar, kedalaman, kecepatan yang mungkin pada waktu banjir, kemudahan untuk memasang kabel, ketersediaan jembatan, perahu, dst., sebelum orang mulai dengan mengukur luahnya.

Dari banyak pengamatan pada banyak sungai orang dapat menetapkan, bahwa keragaman kecepatan yang dirangkunkan (diintegrasikan) pada seluruh kedalaman sungai dapat dihampiri dengan rata-rata hasil pengamatan pada 0,2 dan 0,8 kedalamannya. Jika dua pengamatan pada setiap tempat pencegatan mendatar pun terhalang waktu dan keadaan, maka pembacaan sekali pada 0,6 kedalaman dapat menghampiri rata-rata seluruh kedalamannya.



(a)



(b)

Gambar 6.10 Dua cara menghitung pengukuran luahan: a merajah isovel luahan lewat irisan melintang; b merata-ratakan irisan dari pengamatan pada 0,2 dan 0,8 kedalaman

Luahan pada irisan-melintang diperoleh dengan sebaik-baiknya dengan jalan merajah setiap amatan kecepatan pada irisan-melintang tapak penyukatan dengan sekala menegak yang dilebih-lebihkan. *Isovel* atau *garis samalaju* kemudian digambar dan luasan yang tercakup diukur dengan planimeter. Irisan-melintang yang khas, yang diperlakukan secara itu, tertera pada gambar 6.10a. Sebagai pengganti, sungai itu dapat pula terbagi secara menegak menjadi sejumlah panggu, dan kecepatan rata-rata setiap panggu dikenakan pada luasan tersebut (gambar 6.10b). Pada cara ini, luasan irisan-melintang irisan yang mana pun harus tidak melebihi 10 per sen luasan irisan melintang secara keseluruhan.

Haruslah selalu ditilik dengan menggunakan cara kemiringan-luasan pada pokok 6.5.7 iii dan nilai diperoleh untuk n -nya Manning. Dengan jalan itu pengetahuan mengenai nilai n sungai tersebut pada ketinggian tertentu dapat dihimpun, yang mungkin akan sangat berguna dalam peluasan lengkungan tarafan luahan setelah itu.

Untuk memastikan keseragaman dalam kiat menyukat peukur-arus, Organisasi Internasional untuk Pembakuan (ISO) menerbitkan berbagai saran, dan di Inggris Raya, BS 3680 mengacu ke ‘Pengukuran aliran zatcair dalam saluran terbuka’ [3]. Di Amerika Serikat, Jawatan Geologi Amerika Serikat (*US Geological Survey*) dan Badan untuk Pemulihan Kemanfaatan Tanah (*US Bureau of Reclamation*) telah memiliki kebiasaan yang mapan [4–7].

6.5.3 Bangunan untuk mengukur aliran Bangunan itu diripta demikian rupa sehingga peluahan sungai dibuat untuk berkelakuan sesuai dengan hukum hidraulika tertentu yang diketahui umum. Misalnya, luahan setiap satuan panjang melewati bendung adalah fungsi hulu di atas bendung itu. Banyak bendung yang terkhususkan, seperti sukat-V, bendung majemuk dan Crump, diripta untuk memberi data luahan yang cermat dengan mengamati permukaan air di hulu bendung itu. Talang dapat juga digunakan serupa, di tempat sungai disalurkan melewati bagian alur yang dibentuk geometrinya secara khusus pada jarak tertentu sebelum masuk ke dalam ruas yang irisan-melintangnya berbeda, biasanya dibuat demikian rupa dengan menyempitkan sisinya atau diberi tangga di dasarnya. Bentuk trapezoida biasanya digunakan, dan, baru-baru ini, orang menggunakan irisan tegak dan sempit untuk pengukuran luahan DAS di Wales. Gambar 6.11 melukiskan sebuah talang dari jenis yang terakhir itu pada DAS percobaan Plynlimon, yang dimiliki Lembaga Hidrologi. Tetapi umumnya bangunan untuk mengukur aliran terbatas pada batang air yang kecil-kecil saja, karena untuk sungai yang besar-besar atau lebar-lebar bangunan seperti itu menjadi terlalu mahal untuk dibuat [8–15].



Gambar 6.11 Talang ukur aliran yang sempit-DAS Plynlimon

BS 3680, Bag 4 Bendung dan Talang, memberikan ukuran rinci untuk bendung dan talang baku, sebagian besar jenisnya tertera.

6.5.4 Penyukatan dengan pengenceran Penyukatan dengan pengenceran terutama cocok bagi sungai kecil-kecil yang airnya berolak, yang kedalamannya serta alirannya tak sesuai untuk penerapan alat ukur dan bangunan peraliran kiranya tidak ada gunanya dibuat mahal dan/atau tetap.

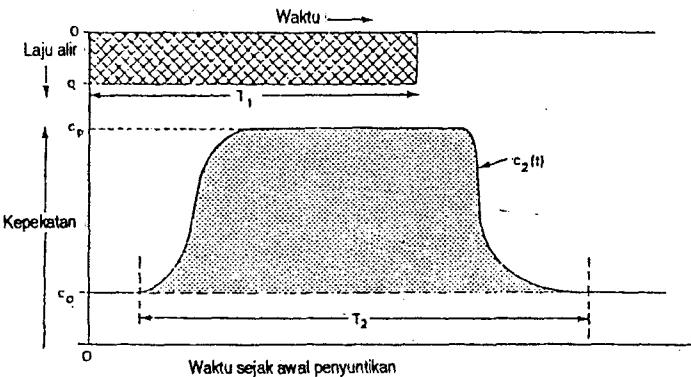
Cara itu mencakup pemasukan bahan kimia ke dalam sungai dan penerokaan airnya beberapa jauh di hilirnya setelah terjadi pencampuran secara sempurna bahan itu dalam air. Bahan kimia itu dapat dibubuhkan dengan laju tetap sampai terokan di hilir menunjukkan tingkat kepekatan yang tetap, atau pemberian itu dilakukan sekaligus secepat-cepatnya; ini disebut juga *borongan*. Dalam hal ini, terokan sepanjang jangka waktu menunjukkan hubungan kepekatan-waktu. Dalam kedua hal itu, kepekatan bahan kimia dalam terokan digunakan untuk menghitung pengencerannya, dan dengan itu juga luahan sungai dapat diperoleh. Gambar 6.12 memperlihatkan pemberian natrium bikromat dengan laju tetap dari botol Mariotte (sebuah gawai hulu-panggang) pada batang air di gunung.



Gambar 6.12 Penyukatan dengan pengenceran: mengucurkan larutan natrium bikromat dari sebuah botol Mariotte

Terokan air itu dianalisis dengan tatakerja kolorimetri otomatis yang menaksir kepekatan senyawaan krom itu dalam jumlah kecil-kecil dengan membandingkannya dengan terokan larutan yang dimasukkan. Perlengkapan itu mahal dan terkhusus. Acuan [16,17] memberi pedoman yang lengkap.

Cara lain yang diperkembangkan oleh Littlewood [18] perlu dikemukakan agak panjang. Hal itu disebabkan karena perlengkapan yang digunakan adalah sederhana dan cukup murah. Cara itu bergantung pada kehantaran elektrik larutan garam dapur biasa (NaCl) dalam aliran air dan merupakan versi lain dari cara Aastad dan Sognen mengenai penyukatan-pengenceran-nisbi [19].



Gambar 6.13 Cara penyuntikan laju-tetap linanjut

Dengan mengacu kepada gambar 6.13 dapat ditunjukkan, bahwa

$Q =$ aliran sungai (l/s)

$V =$ volum cairan penyuntikan dengan kepekatan c_1 (l)

$T_1 =$ amanya penyuntikan (s)

$q =$ tingkat suntikan (l/s)

$T_2 =$ amanya gelombang zat terlarut

$c_1 =$ kepekatan cairan penyuntikan (mg/l)

$c_2 =$ kepekatan air sungai yang berubah-ubah

$c_0 =$ kepekatan latarbelakang (mg/l)

kemudian

$$qc_1 T_1 = Q(\bar{c}_2 - c_0)T_2 \quad (\text{dengan } \bar{c}_2 \text{ adalah rataan semua nilai } c_2) \text{ yang dapat ditulis sebagai}$$

$$Vc_1 = Q(c_2 - c_0)T_2$$

Jadi

$$Q = \frac{V}{T_2} \times \frac{c_1}{(c_2 - c_0)} \quad (6.2)$$

dan

$$Q = \frac{V}{T_2} \times N \quad (6.3)$$

dengan N adalah nisbah larutan rataan.

Tidaklah perlu untuk mengukur daerah yang diarsir di bawah lengkung pada gambar 6.13, asal saja lengkung itu ditentukan oleh ordinat yang berjarak pendek. Hal itu disebabkan, karena yang diperlukan hanyalah rerata daripadanya. Ketentuan itu berlaku untuk sebarang panjang waktu penyuntikan, termasuk di dalamnya ‘tegukan’, dan tidak hanya penyuntikan dengan tingkat yang tetap seperti pada gambar 6.13, yang sebenarnya tidak lain adalah keadaan khusus dari cara umum.

Sekarang yang perlu adalah beralih dari kepekatan larutan ke daya hantar (kehantaran); tetapi ada dua masalah yang perlu diatasi:

- hubungan antara kepekatan garam dan daya hantar tidak bersifat gemaris;
- sungai alam memiliki daya hantar latar belakang yang beragam.

Yang pertama itu dapat diatasi dengan membuat grafik daya hantar lawan kepekatan yang untuk asam lemah dapat dikatakan gemaris. Hal ini memang benar untuk pelarut yang pada awalnya memiliki daya hantar yang berbeda-beda, dengan kelandaianya pada gambar 6.14 praktis adalah sejajar.

Dari sini dapat disimpulkan, bahwa untuk perubahan kepekatan, Δc , dan daya hantar, $\Delta c'$, dalam jangka gemaris larutan lemah adalah

$$\Delta c = K_1 \Delta c'$$

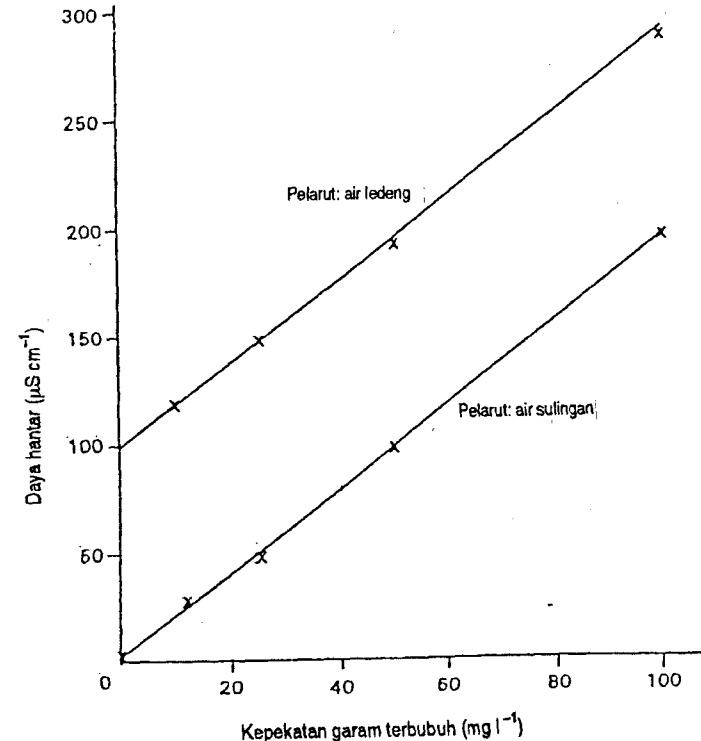
K_1 untuk NaCl dalam air kira-kira $0.51 \mu\text{s cm}^{-1}/\text{mg l}^{-1}$

Persamaan 6.2 sekarang dapat ditulis

$$Q = \frac{V}{T_2} \times \frac{c'_1}{K_1 \Delta c'}$$

dengan $\Delta c'$ adalah rerata $(c'_2 - c'_0)$. Sekarang dari pers. 6.3

$$N = \frac{c_1}{(c_2 - c_0)} = \frac{c_1}{K_1 \Delta c'}$$



Gambar 6.14 Daya hantar lawan kepekatan garam terbubuh (larutan lemah) [18]

yang dapat ditulis

$$N = K_2 \frac{c'_1}{K_1 \Delta c'} \quad (6.4)$$

dan K_2 adalah gabungan K_1 dan sebuah pengganda untuk mengubah daya hantar larutan penyuntikan tertentu, c'_1 , ke kepekatan, c_1 .

Jika ada volum, V , kecil larutan yang kuat tertentu dibubuhkan kepada kepada volum yang lebih besar air sungai V^* , yang menyebabkan nisbah pengenceran N^* , dan perubahan daya hantar tercatat sebagai $\Delta c'^*$, maka kita dapat menulis

$$N^* = K_2 \frac{c'_1}{\Delta c'^*} \quad (6.5)$$

$$\text{dengan } N^* = \frac{V^*}{v}$$

Sekarang dengan membagi persamaan 6.4 dengan persamaan 6.5 diperoleh

$$\frac{N}{N^*} = \frac{\Delta c'^*}{\Delta c'}$$

dari sini didapatkan

$$Q = \frac{V}{T_2} \times \frac{V^*}{v} \times \frac{\Delta c'^*}{\Delta c'}$$

Ini berarti, bahwa luahannya dapat diukur dengan menuangkan volum larutan garam kuat yang diketahui (V), dan dengan mengukur perubahan dalam daya hantar air itu di ujung bagian hilir ruas panjang pencampuran (untuk menemukan $\Delta c'$) sepanjang waktu T_2 , dan dengan mengukur perubahan dalam daya hantar larutan yang lemah itu yang diperoleh dengan pengenceran terkendali larutan yang kuat itu dalam tindakan tersendiri.

Cara ini tak bergantung pada merek peukur daya hantar dan teraannya. Tidak perlu orang mengetahui mengenai kepekatan larutan yang kuat, dan yang dibutuhkan perlengkapan yang sederhana.

Uraian yang benar-benar rinci, hasil pengujian perbandingan, banyaknya larutan yang khas, dan ukurannya diberikan dalam acuan [18].

6.5.5 Penyukatan ultrasonik Di antara perkembangan yang baru-baru dalam penyukatan sungai adalah cara ultrasonik. Cara itu dapat memberikan hasil pengukuran luahan terus-menerus tanpa ditunggui atau, yang lebih lazim, untuk suatu selang waktu yang teratur dan terinci. Cara ini didasarkan pada penyampaian denyut ultrasonik antara dua perangkat pemancar/penerima yang ditempatkan di kedua tepi sungai, dan dipasang demikian rupa sehingga garis pemancaran terletak 45° , atau sekitar itu, terhadap arah aliran. Karena kecepatan pemancaran ke arah yang satu lebih besar daripada ke arah yang lain, disebabkan oleh komponen kecepatan aliran air, waktu tempuh denyut itu pun berbeda pula. Perbedaan itu merupakan fungsi dari kecepatan rata-rata pada tingkat denyut.

Cara menyusun penyukatan ini biasanya sbb.: bagian sungai dengan irisan melintang yang tegak lurus yang paling tidak sama panjangnya dengan lebar sungai itu, dengan pasangan pemanclar pada berbagai aras dan sebuah perckam aras air. Terokan dan rekaman otomatis kemudian dapat memberikan rekaman luahan pada setasian pengamatan hingga ketelitian yang paling tidak sama baiknya dengan cara yang mana pun.

Untuk uraian yang rinci mengenai pemasangan, cara, dan analisis hasil yang diperoleh, mereka yang berminat harus melihat acuan [20, 21]

Cara pada ayat 6.5.2, 6.5.3, 6.5.4, dan 6.5.5, yang dipakai secara sendiri maupun secara tergabung, dapat menentukan hubungan antara sebarang luahan sungai besar atau kecil dengan ketinggian airnya.

Lengkung tarafan yang dibuat dengan jalan ini, memungkinkan hasil pengamatan-tunggal ketinggian air, yang dilakukan setiap hari pada seperangkat waktu, oleh seorang pengamat yang tak terampil, dapat dialihkan ke suatu tingkat luahan dan dari sini ke dalam jumlah-hingga air yang mengalir pada titik pengamatan. Kesulitan mengenai lengkung tarafan ialah mendapatkan titik yang cukup pada waktu luahan tinggi untuk memungkinkan diperolehnya hubungan yang teliti.

6.5.6 Penyesuaian lengkung-tarafan Hingga kini, pembahasan mengenai arti lengkung tarafan menyatakan, bahwa untuk mudahnya lengkung itu adalah garis nilai-tengah yang digambar melewati setaburan titik amatan. Hal itu tidaklah demikian. Jika setiap luahan dicatat sebagai ukuran pada ketinggian yang ‘menurun’ dan ‘membubung’, lengkung itu kiranya dapat dikatakan semata-mata menjadi sebuah gelung sebagaimana terlukis sebagai garis terputus-putus pada gambar 6.8.

Keragaman, atau pengaruh penggelungan timbul akibat berbagai sebab. Yang pertama adalah *simpanan alur*. Dengan membubungnya ketinggian permukaan suatu sungai, sementara waktu air tersimpan dalam alur sungai.

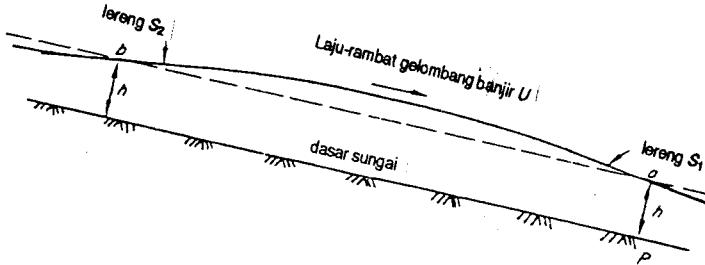
Contoh 6.1 Misalkan sukat dalam sungai menunjukkan bubungan sebesar 0,2 m/jam selama peluahan $100 \text{ m}^3/\text{det}$ dan alurnya adalah sedemikian rupa, bahwa laju pembubungan itu dapat diandaikan berlaku untuk ruas sungai dengan panjang 1000 m di antara tapak penyukatan dan kendali ruas (*kendali ruas sebuah sungai adalah bagian tempat penampang sungai itu berubah*).

Ambillah lebar rata-rata alur dalam ruas ybs adalah 100 m. Maka laju perubahan simpanan dalam ruas itu, dS dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} dS &= 1000 \times 100 \times 0,2 \\ &= 20\,000 \text{ m}^3/\text{jam} \\ &= 5,6 \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

Hasil pengukuran luahan harus dirajah pada lengkung tarafan sebagai $94,4 \text{ m}^3/\text{det}$ (tidak sebagai 100), karena ini adalah luahan melewati *kendali* yang bersesuaian dengan ketinggian sukat rata-rata.

Alasan kedua untuk menggelungnya lengkung tarafan adalah keragaman lereng permukaan yang terjadi sejalan dengan bergeraknya gelombang banjir melewati alur. Gambar 6.15



Gambar 6.15 Keragaman lereng gelombang banjir

melukiskan irisan memanjang suatu gelombang banjir sepanjang alur sungai. Pada waktu titik *a* melewati tapak sukut, pada sukat terbaca *h*, irisan melintang sungainya *A* dan lereng permukaan airnya *S₁*. Bila gelombang banjir itu bergerak terus hingga titik *b* ada di tapak sukut, bacaan *h* dan irisan melintangnya *A* sama, tetapi lerengnya sekarang *S₂*. Dari rumus Manning

$$Q = Av = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

maka akan terdapat dua luahan dalam kedua ihwali itu, karena *S* berubah, sedangkan *A*, *R*, dan *n* tetap sama.

Karena ketinggian air yang membubung dihubungkan dengan luahan lereng yang lebih besar, hasil pengukuran yang dibuat pada ketinggian yang membubung rajahannya ada pada sebelah kanan pada lengkungan tarafan pada gambar 6.8 dan nilai yang mengenai ketinggian yang menurun ada di sebelah kiri. Bergantung pada ‘keberpuncakan’ gelombang banjirnya, sering luahan terbesar terjadi, sebelum ketinggian maksimum tercapai, karena pengaruh lereng yang lebih besar pada kecepatan dapat mengungguli pertambahan luasan irisan melintang yang hanya kecil saja.

Umumnya, hasil pengukuran yang dibuat untuk sisi gelombang banjir yang mana saja perlu dipinda terhadap tahana tunak menurut teori, karena sebagian besar pengukuran sukat dilakukan pengamat yang tak berpengalaman, sekali dalam sehari, tanpa tanda apa pun, apakah ketinggian itu membubung ataukah menurun. Dengan menggunakan lengkung yang telah dipinda, atau

lengkung tahana tunak, amatan ketinggian yang membubung atau menurun akhirnya akan berseimbang, dan tidak lagi diperlukan timbang rasa nilai pengamat ybs atau kunjungan kedua kalinya dalam sehari ke sukat. Pemindaan itu dapat dilakukan seperti berikut.

Dari persamaan Manning, luahan tahana-tunak *Q* dalam alur dengan kekasapan dan irisan melintang tertentu dinyatakan sebagai

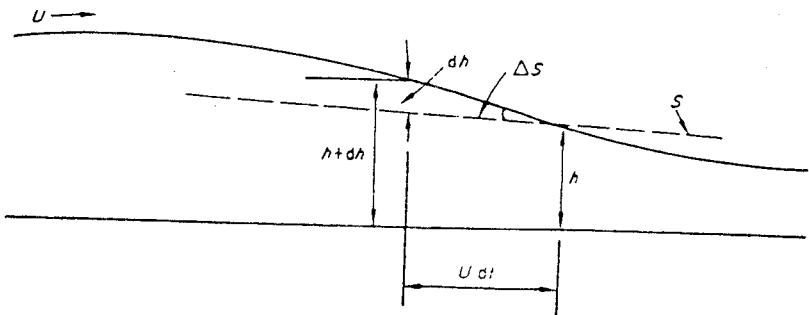
$$Q \propto \sqrt{S} \quad (6.6)$$

bila *S* = lereng tahana-tunak.

Bila lereng itu tidak sama dengan *S*, seperti dalam hal ketinggian yang sedang membubung atau menurun, luahan yang sebenarnya dinyatakan dengan

$$Q_a \propto \sqrt{(S \pm \Delta S)} \quad (6.7)$$

Dengan menunjuk kepada gambar 6.16, ΔS dapat dinyatakan dengan kecepatan perubahan ketinggian dan laju-rambat, *U*.



Gambar 6.16 Perubahan lereng gelombang banjir sejalan dengan waktu

Gambar itu melukiskan gelombang banjir yang sedang datang dan tahana yang membubung. Yang terbaca pada sukat pada awal pembacaan luahan adalah *h* dan pada akhir, *dt*, kemudian, *h* + *dh*. Selama waktu itu, gelombangnya telah maju *Udt*, dan

$$\Delta S = \frac{dh}{U dt} = \frac{dh/dt}{U} \quad (6.8)$$

dan dh/dt adalah positif untuk ketinggian yang membubung, dan negatif untuk ketinggian yang menurun. Menggabung persamaan 6.6, 6.7, dan 6.8

$$\frac{Q_a}{Q} = \sqrt{\left(\frac{S + (dh/dt)/U}{S} \right)}$$

atau

$$\frac{Q_a}{Q} = \sqrt{1 + \frac{dh/dt}{US}} \quad (6.9)$$

Jika pengukuran luahan itu dilakukan pada sebuah tapak dengan dua sukat, sebuah di hulu dan sebuah lagi di hilir, pada ruas yang sama, maka semua suku pada persamaan 6.9 itu diukur, kecuali Q dan U . Q adalah luahan tahana tunak yang diperlukan dan U adalah laju rambat gelombang banjir. Sekarang ada beberapa jalan yang dapat ditempuh. Yang pertama adalah mengambil nilai empiris untuk U . Corbett drt. [4] menyarankan bahwa dalam alur yang cukup seragam, pada keadaan banjir, laju rambat U kira-kira sama dengan 1,3 kali kecepatan air rata-rata, atau

$$U = 1,3 \frac{Q_a}{A}$$

dalam hal ini A = luasan irisan melintang.

Dari sini

$$Q = \frac{Q_a}{\sqrt{\left(1 + \frac{A \cdot dh/dt}{1,3 Q_a S} \right)}} \quad (6.10)$$

Contoh 6.2 Pengukuran luahan sebuah sungai yang dilakukan pada waktu banjir menunjukkan $Q_a = 3160 \text{ m}^3/\text{det}$. Pada waktu pengukuran, yang lamanya 2 jam, tinggi sukat bertambah dari 50,40 menjadi 50,52 m. Hasil pembacaan paras pada permukaan air 400 m di hulu dan 300 m di hilir tapak pengamatan berselisih 100 mm. Sungai itu lebarnya 500 m dengan kedalaman rata-rata 4 m pada saat pengukuran. Pada koordinat berapakah pengukuran itu harus dirajah pada lengkung tarafan?

$$\begin{aligned} \text{Luasan irisan melintang sungai itu, } A &= 500 \text{ m} \times 4 \text{ m} \\ &= 2000 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Maka dari itu

$$\text{kecepatan air rata-rata} = \frac{Q_a}{A} = \frac{3160}{2000} = 1,58 \text{ m/det}$$

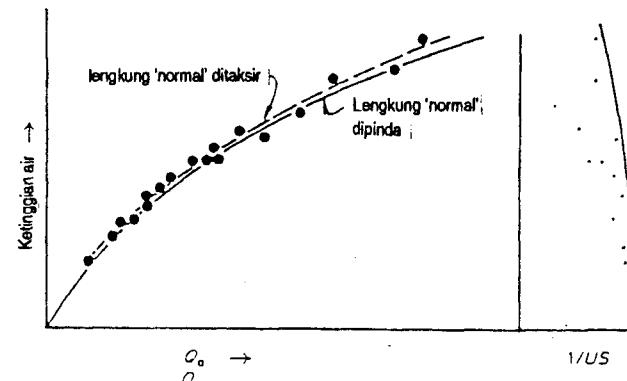
Andaikan laju rambat gelombang banjir itu $U = 1,3 \times 1,58 = 2,045 \text{ m/det}$; $dh/dt = 0,12 \text{ m}/7200 \text{ det} = 1,67 \times 10^{-5}$, dan $S = 0,1/700 = 1,43 \times 10^{-4}$. Maka untuk sungai yang membubung, dari persamaan 6.5

$$Q_{\text{pind}} = \frac{3160}{\sqrt{\left(1 + \frac{1,67 \times 10^{-5}}{2,054 \times 1,43 \times 10^{-4}} \right)}} = \frac{3160}{\sqrt{(1,057)}} = 3074 \text{ m}^3/\text{det}$$

dan dengan mengambil ketinggian sukat rata-rata, koordinat yang dipinda itu adalah 50,46 m dan $3074 \text{ m}^3/\text{det}$.

Tata cara lainnya yang dapat dipilih, adalah mengikuti cara Boyer [22]; dalam hal ini kedua nilai U dan S tidak perlu diperoleh. Jika tersedia sejumlah amatan yang mencukupi, termasuk hasil pengamatan pada waktu ketinggian sedang membubung dan menurun dan dalam tahana tunak, maka dapatlah digambar lengkung tarafan sebagai garis nilai-tengah melalui semua nilai yang tak dipinda. Luahan tahana tunak Q sekarang dapat ditaksir dari lengkung nilai-tengah. Karena Q_a dan dh/dt adalah besaran yang diukur dan karena itu diketahui, persamaan 6.9 menghasilkan suku $1/US$ untuk setiap pengukuran luahan.

Suku $1/US$ sekarang dirajah lawan ketinggian dan sebuah lengkung 'rata-rata' dicocokkan pada semua titik yang dirajah itu, seperti terlukis pada gambar 6.17.



Gambar 6.17 Cara meminda hasil pembacaan luahan tanpa menghitung U atau S

Dari hubungan $1/US$ lawan ketinggian itu, diperoleh berbagai nilai baru $1/US$ dan disisipkan ke dalam persamaan 6.9 untuk memperoleh tahana tunak Q . Semua nilai baru Q itu kemudian dirajah lawan ketinggian sebagai lengkung tahana-tunak yang telah dipinda.

Cara lain yang menggunakan lereng yang diamati tetapi mengabaikan U , mengikut cara Mitchell [23].

6.5.7 Memperpanjang lengkung tarafan Seperti telah disebut di atas, mengukur luahan yang paling sulit adalah pada waktu banjir tinggi. Hal itu disebabkan baik oleh kecepatan air yang tinggi dan puing yang terapung, maupun terbentuknya keadaan yang langka. Misalnya, sering terjadi bahwa keadaan bangunan sungai seperti bendungan dan jembatan yang harus diripta adalah ‘keadaan yang demikian itu tidak akan terjadi lebih sering dari sekali dalam 100 tahun’. Ini berarti bahwa para peripta bangunan itu ingin mengetahui peluang luahan yang akan terjadi, rata-ratanya, sekali setiap 100 tahun. Ini sering disebut sebagai ‘banjir 100 tahunan’.

Jika pengukuran luahan sudah dilakukan selama 100 tahun sebelumnya, banjir ripta itu mungkin tidak terlalu sulit untuk diketahui. Tetapi sebagaimana umumnya, yang tersedia hanyalah hasil pembacaan ketinggian sungai lagi pula hanya untuk jangka waktu yang terbatas. Jika insinyur bangunan air yang bersangkutan memiliki hasil pembacaan ketinggian harian selama 30 tahun secara terus-menerus yang bahkan mencakup keadaan banjir rendah, maka ia beruntung. Hampir selalu ia harus memperpanjang lengkung tarafan itu hingga jauh di atas titik yang terukur paling akhir, untuk menaksir luahan pada paras ketinggian tertentu yang terekam. Kadang-kadang, paras ketinggian yang tercapai pada banjir tinggi hanya terekam oleh garis puing atau sampah pada tebing sungai, atau rumput yang menyangkut pada tangkai pohon atau belukar di sepanjang tepi sungai. Bukti nyata seperti itu sangat berharga.

Ada sejumlah cara untuk mencoba menambah lengkung tarafan.

i Dengan mencocokkan persamaan pada lengkung itu

Biasanya yang digunakan adalah persamaan yang bentuknya $Q = k(h - a)^x$. Dalam ini

h = ketinggian

k dan x adalah tetapan yang diturunkan dari bagian lengkung yang diamati, dan

a = ketinggian dalam m antara nol pada sukat dan ketinggian aliran nol.

Lengkung yang demikian itu rajahannya pada kertas log berupa sebuah garis lurus, jadi lebih mudah dipanjangkan. Paling banter hal itu merupakan tatacara yang meragukan karena dari segi teori tak banyak yang dapat dibenarkan, oleh sebab hukum berpangkat yang bekerja pada aliran tinggi mungkin saja berubah cukup mendadak pada irisan melintang dengan ketinggian yang membubung.

ii Cara Steven [24]

Cara ini didasarkan pada rumus Chezy

$$Q = AC \sqrt{(RS)}$$

Di sini

A = luasan irisan melintang

C = koefisien kekasapan Chezy

R = jejeri hidraulik

S = lereng garis energi

Jika CVS diandaikan tetap dan D , kedalaman rata disulihkan untuk R , maka

$$Q = kA \sqrt{D}$$

Nilai $A \sqrt{D}$ dan Q yang diketahui, dirajah dan sering jatuhnya dekat pada garis lurus yang dapat diperpanjang. Nilai lapangan $A \sqrt{D}$ di atas tarafan yang diukur kemudian dapat digunakan dari garis yang diperpanjang itu untuk merajah Q lawan titik ketinggian pada lengkungan tarafan.

Keberatan terhadap cara ini, hanyalah karena $C \sqrt{S}$ bukan suatu tetapan. Tetapi karena di dalamnya telah diperhitungkan bentuk sungai yang berubah-ubah, cara ini lebih masuk akal daripada tatacara i.

Nilai C Chezy yang khas diberikan pada lampiran A.

iii Cara lereng-luasan Cara ini bergantung pada asas hidraulika dan mempraanggapkan bahwa lebih praktis untuk memasukkan patok atau membuat titik ketinggian sementara pada saat pengukuran aliran di hulu dan di hilir tapak pengukuran luahan. Tanda itu kemudian dapat digunakan untuk menentukan lereng atau kemiringan air. Pengukuran irisan melintang dapat menghasilkan luasannya dan jejeri irisan. Kemudian dari Manning

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

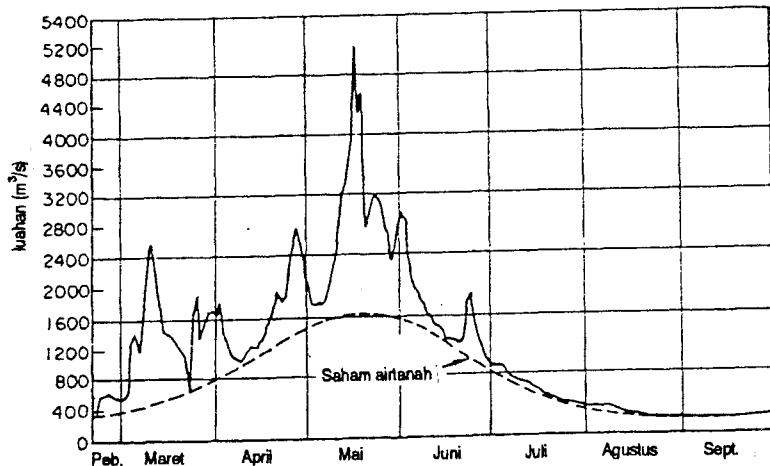
Cara ini kadang-kadang dikritik karena ketergantungannya pada nilai n . Karena n untuk batang air alam sekira 0,035, galat pada n sebesar 0,001 menyebabkan galat pada luahan sebesar 3 persen. Keberatan ini sebagian dapat diatasi dengan merajah n lawan ketinggian untuk semua luahan yang diukur, sehingga pilihan untuk n bagi ketinggian besar tidaklah semu kita saja, melainkan diambil dari rajahan yang demikian itu. Jika lereng banjir yang tinggi dapat diukur, maka cara ini boleh jadi merupakan cara yang terbaik.

Nilai n Manning yang khas diberikan pada lampiran A.

Perlu ditekankan bahwa semua cara memperpanjang lengkung tarafan sampai batas tertentu meragukan dan hanya terpaksa digunakan jika tidak dapat diperoleh hasil pengukuran banjir. Dua cara terakhir di atas kedua-duanya cenderung memiliki galat yang timbul karena perubahan irisan melintang akibat tergerus banjir dan pengendapan oleh air rendah setelah itu; jadi pengukuran irisan melintang dan kedalaman rata-rata haruslah diambil sedekat-dekatnya dengan saat pengukuran luahan.

6.6 Volum dan jujuh limpasan

6.6.1 Hidrograf Dengan lengkung tarafan yang sudah teratur dan terukur baik, maka hasil pembacaan sukat setiap hari dapat diubah secara langsung ke volum limpasan. Sekumpulan angka limpasan harian yang demikian itu disajikan secara grafik dalam gambar 6.18. Gambar seperti itu disebut hidrograf. Meskipun gambar 6.18 melukiskan sebuah hidrograf dengan dasar waktu berbulan-bulan, hidrograf untuk DAS yang lebih kecil dapat mempunyai dasar waktu yang berhari-hari atau berjam-jam.

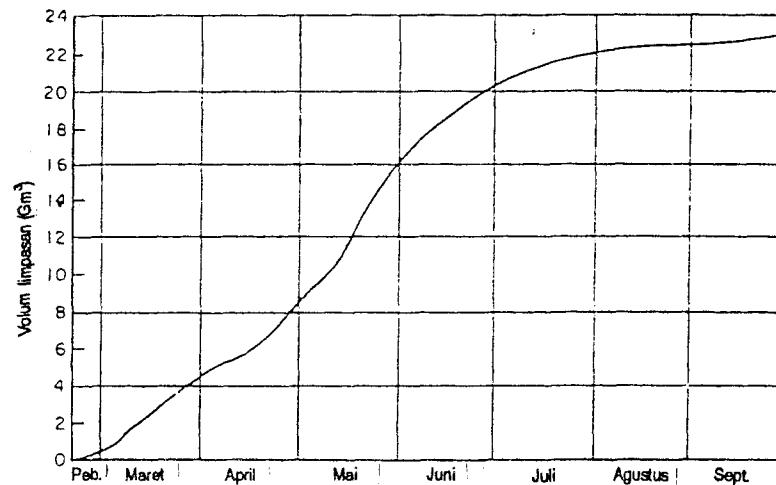


Gambar 6.18 Hidrograf Sungai Efrat di Hit, Februari hingga September 1957 (menurut Direktorat Irigasi, Irak)

Dilihat dari banyak segi, banjir dan kekeringan sangatlah penting, tetapi karena sifatnya yang sepihak, menurut perbandingan cenderung berlangsung hanya singkat saja. Untuk keperluan banyak penyelidikan sumber daya air, yang sama

pentingnya ialah mengetahui jumlah volum air yang harus diperhitungkan selama jangka waktu yang lama; misalnya, pada pembangkitan tenaga listrik, kapasitas pusat listriknya harus dipilih untuk luahan tertentu yang jauh di bawah puncak banjir karena jika tidak, banyak kapasitas yang akan hampir selalu mubazir. Untuk tujuan yang seperti itu cara yang paling cocok untuk menyajikan data adalah *lengkung massa* dan *lengkung jujuh* atau *lamanya aliran*.

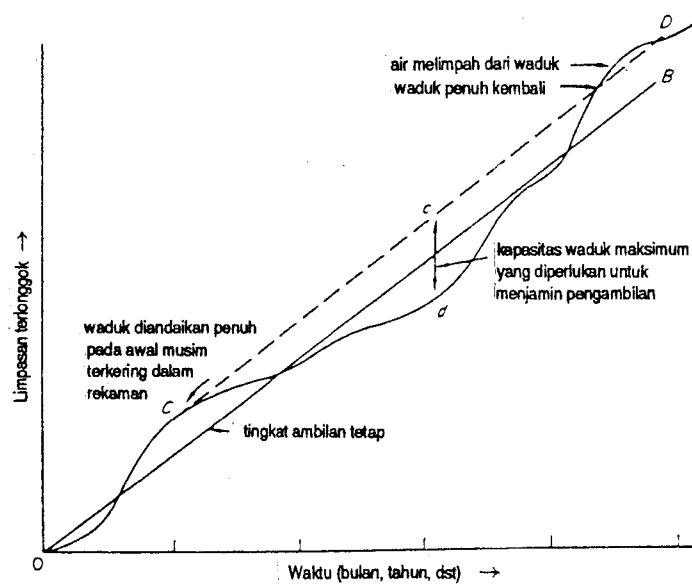
6.6.2 Lengkung massa Jika volum yang dinyatakan dengan hasil kali ordinat dan selang waktu suatu hidrograf dirajah lawan waktu dengan menambahkan setiap volum baru kepada jumlah yang sebelumnya, maka kita peroleh lengkung massa berlonggok untuk limpasan. Lengkung yang demikian itu terlukis pada gambar 6.19.



Gambar 6.19 Lengkung massa berlonggok untuk limpasan Sungai Efrat di Hit, Februari hingga September 1957

Lengkung massa sangatlah berguna untuk kaji meripta waduk karena merupakan sarana yang siap pakai untuk menentukan kapasitas simpan yang dibutuhkan bagi tingkat limpasan dan ambilan rata-rata tertentu. Misalkan saja lengkung massa *OA* pada gambar 6.20 melukiskan limpasan yang akan digunakan untuk beban dasar pengembangan tenaga listrik. Jika ambilan tetap yang dibutuhkan dirajah pada diagram yang sama, sebagai garis *OB*, maka

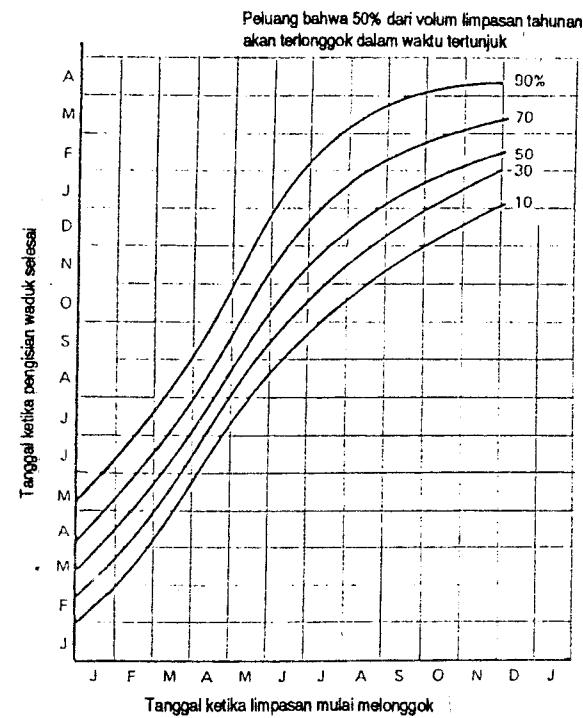
kapasitas simpan yang diperlukan untuk menjamin tingkat itu dapat ditemukan dengan menggambarkan garis CD sejajar dengan OB dari titik C pada awal masa terkering yang tercatat. Kapasitas simpan yang diperlukan dinyatakan dengan ordinat maksimum cd . Biasanya digunakan masa yang lebih lama, sejauh yang dimungkinkan oleh yang tercatat, untuk meripta waduk dan dalam banyak hal ambilan itu selain tidak tetap juga tidak terus-menerus. Dalam hal seperti itu, digunakan kiat yang berbeda-beda dan didasarkan pada asas yang sama [25].



Gambar 6.20 Penggunaan lengkung masa dalam periptaan waduk

6.6.3 Lengkung pelonggokan limpasan-waktu Jalan lain untuk menggunakan data aliran dalam periptaan (perencanaan) waduk ialah untuk mengitng waktu pengisian waduk dari hasil pembacaan aliran harian. Karena aliran sungai berubah-ubah mengikuti musim, waktu yang terpakai untuk pelonggokan volum tertentu limpasan (setara dengan waktu pengisian waduk) akan berbeda dengan musim dimulainya pengisian dan juga dengan volum yang dibutuhkan untuk diisikan.

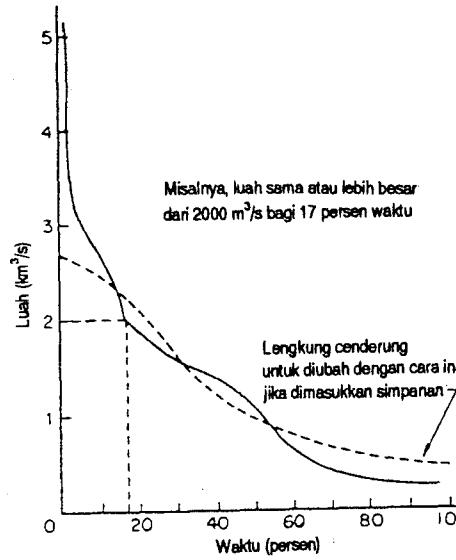
Para insinyur juga perlu mengetahui peluang terjadinya peristiwa tertentu dan risiko tidak dapat dipenuhinya tujuan tertentu. Berbagai patokan itu terpenuhi dengan *diagram pelonggokan limpasan-kekerapan waktu*. Contoh yang khas tertera pada gambar 6.21.



Gambar 6.21 Lengkung pelonggokan limpasan-waktu bagi suatu sungai [26]

Penurunan lengkung yang demikian itu sederhana saja, tetapi terlalu panjang untuk disertakan di sini. Uraian lengkap dengan contoh yang telah diselesaikan mengenai kiat yang diperlukan disajikan pada acuan [26].

6.6.4 Lengkung jujuh aliran Lengkung jujuh aliran (LJA) untuk titik tertentu di suatu sungai menunjukkan perbandingan waktu di tempat yang luahannya sama atau melebihi nilai tertentu. Lengkung yang demikian itu terlukis pada gambar 6.22. Lengkung jujuh aliran untuk jangka waktu limpasan yang lama berguna untuk memutuskan berapa bagian aliran dapat terpakai untuk tujuan tertentu, karena daerah di bawah lengkung menggambarkan volum.

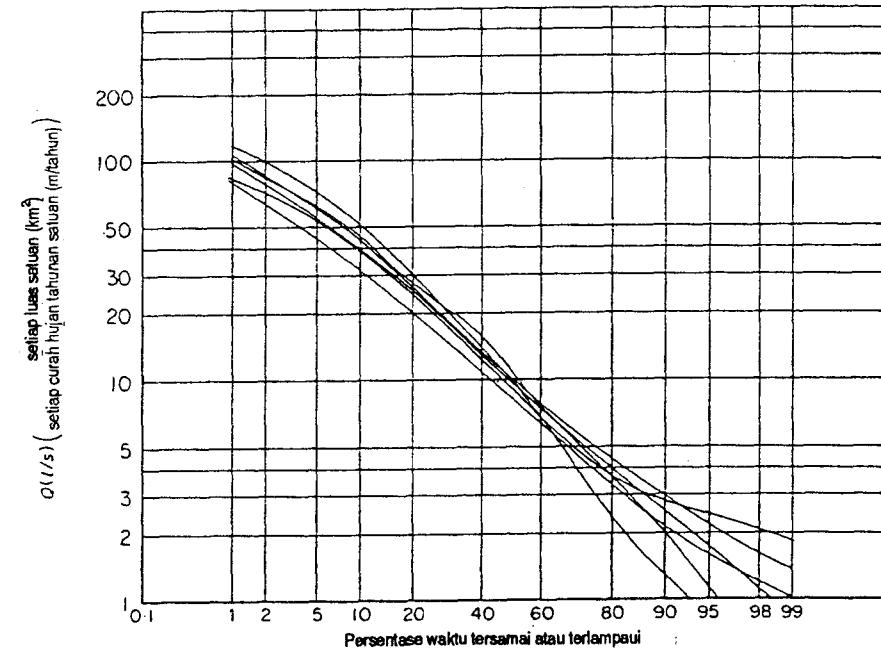


Gambar 6.22 Lengkung jujuh aliran untuk Sungai Efrat di Hit, Februari hingga September, 1955 (diturunkan dari data pada gambar 6.18)

Penyimpanan di hulu tempat penyukatan berupa danau atau waduk akan mengubah LJA sungai yang sebelumnya tak ada penyimpanan seperti itu.

Bagi banyak sungai, nisbah luahan puncak terhadap luahan terkecil mungkin kebesarannya bertingkat dua atau lebih dan LJA untuk titik padanya sering lebih cocok dilukis dengan ordinatnya (Q) ke skala logaritma dan digunakan sekala peluang normal untuk sumbu kekerapannya. Pada grafik yang demikian itu, jika logaritma luahannya tersebut normal, maka rajahan LJA itu berupa garis lurus. Memang itulah kira-kira yang sering terjadi.

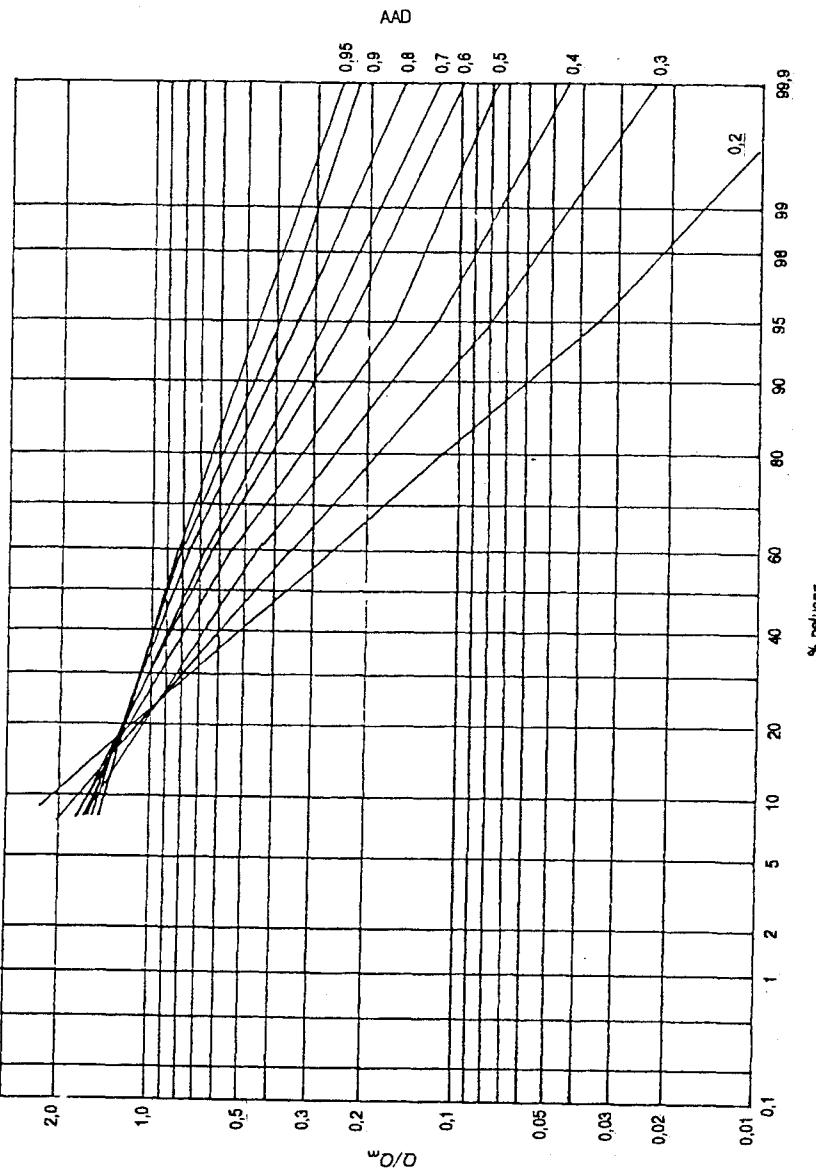
Lengkung jujuh aliran pada titik yang berbeda-beda pada suatu sungai dapat dibandingkan bila disajikan dengan cara yang padat ini dan kemudian dibakukan. Luahan itu, pertama, dibagi menurut luas DAS yang menyumbang, dan kedua, dengan curah hujan tahunan terbobot di DAS tersebut. Luahan yang diperoleh, dalam m^3/det atau $1/\text{s}$, setiap luas satuan setiap curah hujan tahunan satuan, kemudian dapat diperbandingkan dengan segera. Gambar 6.23 memperlihatkan enam LJA untuk enam anak Sungai Severn di Inggris yang diperbandingkan dengan cara ini. LJA majemuk terbaku sewilayah untuk daerah hulu Sungai Severn beserta anak sungainya kemudian diturunkan dari gambar 6.23 [27].



Gambar 6.23 LJA terbaku untuk Severn Hulu

Lengkung yang terbaku seperti itu merupakan sarana yang memudahkan untuk memadukan LJA bagi titik di suatu sungai yang tak disukat, dan untuk titik pada sungai yang lain dengan khuluk geomorfologi serupa dan iklim serupa. Jelas, orang harus berhati-hati bahwa kedua persyaratan tersebut berlaku.

Jalan lain untuk membakukan LJA ialah dengan menyatakan Q dalam bentuk Q/Q_m , dengan Q_m adalah aliran rataan. Penggunaan ordinat yang nirmatra (tak berdimensi) memungkinkan kita memperbandingkan semua LJA semua sungai, baik besar maupun kecil, pada grafik yang sama. Hal ini adalah cara yang yang diusulkan oleh Lembaga Hidrologi Inggris untuk merangkumkan LJA bagi DAS yang tak disukat, yang menyangkut penggunaan Angka Aliran Dasar (AAD) [25]. AAD didefinisikan sebagai luas aliran dasar/luas hidrograf, yaitu perbandingan yang meliputi aliran dasar itu. AAD yang kena adalah fungsi daya resap DAS dan daya simpan akuifer dan dengan demikian sangat berpengaruh terhadap bentuk LJA. AAD dapat ditentukan bagi sebuah DAS yang tersukat seperti terlukis dalam gambar 6.5. Tetapi untuk DAS yang tak tersukat, orang



Gambar 6.24 Lengkung jenis aliran – jujuh untuk berbagai harga AAD (oleh Dr. A. Gustard, sejuz Low Flow Studies [26])

perlu memeriksa tanah dalam DAS dengan agak rinci. Di Inggris Raya, Kemampuan Penerimaan Hujan Musim Dingin (*Winter Rain Acceptance Potential, WRAP*) dapat digunakan, karena peta itu lebih-kurang adalah peta jenis tanah.

Jika ada DAS yang memiliki peta yang demikian itu, dan perbandingannya di bawah setiap jenis tanah dikenali, maka persamaan umum untuk *AAD* dapat ditulis sbb.:

$$AAD = [0,6 + 0,23S_1 - 0,03S_2 - 0,12S_3 - 0,17S_4 - 0,20S_5] \quad (6.11)$$

dalam hal ini S_1 hingga S_5 adalah golongan tanah.

Pengubahan persamaan 6.11 akan diperlukan untuk DAS tertentu yang memperlihatkan aliran yang sangat besar atau sangat kecil. Pengubahan itu bergantung pada peta geologi yang cukup rinci. Sebagai misal, untuk keadaan di Inggris, diperlukan peta geologi 1 : 625.000 yang tersedia yang menunjukkan batuan dasar yang keras. Dalam peta itu *AAD* yang sepaling dapat dikenali, yaitu yang mungkin menunjukkan *AAD* sebesar 0,9 di daerah kapur dan sekecil 0,2 di daerah batugamping berumur karbon dan yang dialasi lempung.

Setelah *AAD* ditentukan, maka *LJA* pun dapat dipilih dari gambar 6.24. *LJA* ini ordinatnya harus dikalikan dengan Q_m DAS untuk memperoleh *LJA* tertentu dengan nilai luahan berangka bagi DAS tersebut.

Lereng *LJA* memberi petunjuk mengenai watak sungai. Lereng landai menunjukkan sungai dengan tidak banyak banjir dengan airnya banyak berasal dari airtanah, sedangkan lengkung berlereng curam menunjukkan sungai yang sering banjir dan waktu aliran rendah, yang memperoleh airnya terutama dari limpasan dan hanya sedikit yang berasal dari airtanah.

6.7 Menaksir limpasan rataan, Q_m

Nilai Q_m (atau disebut juga sebagai aliran harian rerata, *AHR*) mungkin pula diturunkan dari daerah tada yang tersukat dari rekaman aliran harian dengan menjumlah dan meratakan.

Jika daerah itu tak tersukat, maka Q_m harus diturunkan dengan menggunakan rekaman curah hujan dan taksiran uapan. Dalam jangka panjang, limpasan dari daerah tada dapat dianggap sebagai selisih antara curah hujan rerata tahunan dan uapan sebenar (us), karena resapan dan telusan akhirnya akan muncul sebagai aliran dasar.

Di Inggris, curah hujan rerata tahunan (*CHTR*) ditaksir dari peta curah hujan rerata tahunan, 1 : 625.000, untuk tahun 1941–70 dan uapan potensial (*UP*) dari peta uapan potensial rerata tahunan, 1 : 2 juta, yang didasarkan pada persamaan Penman. Kedua dokummen itu dapat diperoleh dari Jawatan Meteorologi. Di tempat lain, uapan potensial dapat dihitung dari data stasion cuaca sebagaimana diuraikan dalam bab 3.

Jadi uapan sebenar (*US*) harus ditaksir dari uapan potensial dengan menggunakan faktor penyesuaian ϕ (tabel 6.1). Faktor ini didasarkan pada data sebenar curah hujan dan limpasan untuk stasion di Inggris dari jangka waktu yang melebihi 10 tahun, dan mengacu kepada Inggris. Di bagian dunia yang lain, angka itu perlu diubahsuai, dengan menggunakan cara serupa.

Tabel 6.1 Faktor penyesuaian untuk menaksir uapan sebenar [2]

	$US = \phi \times UP$						
<i>CHTR</i>	500	600	700	800	900	1000	1100
$\phi(mm)$	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,0

Jika *CHTR* melampaui 1100 mm, *US* diandaikan sama dengan *UP*, yang dihubungkan dengan permukaan rumput yang berpeluh berasas. Masa ketika *US* dibatasi oleh ketunaan kelembapan tanah diandaikan akan diimbangi oleh *US* yang melebihi *UP* pada waktu yang lain oleh pengaruh dari jenis tetumbuhan yang lain yang melebihi proses yang sama pada rumput.

Jika data setempat tersedia dari daerah tada yang tersukat, tingkat limpasannya dapat digunakan secara langsung. Tetapi jika *CHTR* bagi daerah tada adalah berbeda dari *CHTR* daerah yang diteliti, tingkat kehilangannya dalam mm harus diturunkan dari *CHTR* untuk daerah tada yang terakhir itu.

Acuan

- Young, L. H. Mean annual rainfall/run-off relationship. *J. Inst. Wat. Eng.*, 24, No. 7 (1970) 423
- Natural Environment Research Council. *Flood Studies Report*. Vol. 1, NERC, 1975, bab 6
- B.S. 3680 Methods of measurement of liquid flow in open channels. Parwa 3. 1964 Velocity area methods. Parwa 4: 1965 Weirs and flumes.

- Corbett, D. M. dkk., Stream-gaging procedure. *Water Supply paper 888*, Washington D.C., 1945
- Buchanan, T. J. dan Somers, W. P. Discharge measurements of gaging stations. *U.S. Geological Survey Tech. Water Resources Inv.*, BK. 3, 1969
- Carter, R. W. dan Davidian, J. Discharge ratings at gauging stations. *U.S. Geological Survey Surface Water Tech.*, BK. 1, 1965
- U. S. Bureau of Reclamation. *Water Measurement Manual*, 1953.
- Ackers, P dan Harrison, A. J. M. Critical depth flumes for flow measurement in open channels. *Hydrological Research Paper No. 5*, H. M. S. O., London, 1963.
- Parshall, R. L. Measuring water in irrigation channels with Parshall flumes and small weirs. *U.S. Dept. Agr. Circular 843*, 1950
- Ackers, P. Flow measurement by weirs and flumes. *Int. Conf. on Modern Developments in Flow Measurement, Harwell 1971*, Paper No. 3
- White, W. R. Flat-vee weirs in alluvial channels. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 97, HY3 (Maret 1971) 395-408
- White W. R. The performance of two dimensional and flat-V triangular profile weirs, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Suppl. (ii), (1971) 21–48
- Burgess, J. S. dan White, W. R. Triangular profile (Crump) weir: two dimensional study of discharge characteristics. *Report No. INT 52, Institute of Hydrology*, Wallingford, United Kingdom, 1952
- Harrison, A. J. M. dan Owen, M. W. A new type of structure for flow measurement in steep streams. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, (1967) 273-96
- Smith, C. D. Open channel water measurement with the broad-crested weir. *Int. Commun. irr. Drainage Bull.*, (1958) 46–51
- Hosegood, P. H. dan Bridle, M. K. A feasibility study and development programme for continuous dilution gauging. *Report No. 6, Institute of Hydrology*, Wallingford, United Kingdom
- Iso/R 55, 1966 Liquid flow measurement in open channels; dilution methods for measurement of steady flow. Parwa 1, Constant rate injection
- Littlewood, I. G. *Research and development of a streamflow dilution gauging technique for the Llyn Brianne Acid Waters Study, Wales*, Department of Geography, University College, Swansea, 1986

- 19 Aastad, J. dan Sognen, R. Discharge measurement by means of a salt solution; the relative dilution method. *Proc. IASH General Assembly*, Rome 1954, Vol. 3, h. 289-292
- 20 Herschy, R. W. dan Loosemore, W. R. The ultrasonic method of river flow measurement. *Symp. on River Gauging by Ultrasonic and Electromagnetic Methods*, University of Reading, Des. 1974
- 21 Foster, W. E. Experience with the construction and engineering operation of ultrasonic gauging stations. *Symp. on River Gauging by Ultrasonic and Electromagnetic Methods*, University of Reading, Des. 1974
- 22 Boyer, M. C. Determining discharge of gauging stations affected by variable slope. *Civ. Eng.*, 9, (1939) 556
- 23 Mitchell, W. D. Stage-fall-discharge relations for steady flow in prismatic channels, *U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1164*, Washington D.C., 1954
- 24 Stevens, J. C. A method of estimating stream discharge from a limited number of gaugings. *Eng. News*, 18 Juli 1907
- 25 Koelzer, V. A. Reservoir hydraulics, *Handbook of Applied Hydraulics* (editor C. V. Davis dan K. E. Sorenson), ed 3, McGraw-Hill, New York, 1969, Pasal 4
- 26 *Low Flow Studies*, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom, January 1980
- 27 University of Salford, Department of Civil Engineering. *Small-scale hydroelectric potential of Wales*, Department of Energy, London, 1980

Bacaan lebih lanjut

- Herschy, R. W. New methods of river gauging. *Facets of Hydrology* (ed. J. C. Rodda), John Wiley, New York, 1976, bab 5
- Horton, R. E. Erosional development of stream and their drainage basins. *Bull Geol. Soc. Am.*, 56 (Maret 1954) 275
- Logarithmic plotting of stage-discharge observations. *Tech. Note 3. Water Resources Board*, Reading, 1966
- Nash, J. E. dan Shaw, B. L. Flood frequency as a function of catchment characteristics. *Inst. Civ. Eng. Symposium on River Flood Hydrology*, 1966, h. 115-6

- Rodda, J. C. The significance of characteristics of basin rainfall and morphometry in a study of floods in the United Kingdom. *Inst. Assoc. Sci. Hydrol. Symposium on Floods and their Computation, Leningrad. International Association of Scientific Hydrology*, 85 (1967) 834
- Smoot, G. F. dan Novak, C. E. Measurement of discharge by the moving boat method. *U. S. Geological Survey Tech. Water Resources Inv.*, Bk. 3 (1969) A11
- Strahler, A. N. Statistical analysis of geomorphic research. *J. Geol.*, 62, No. 1 (1954)

Soal

- 6.1 Hasil penyukatan sungai adalah $Q = 4010 \text{ m}^3/\text{det}$. Penyukatan itu berlangsung tiga jam dan selama itu angka menunjukkan penurunan 0,15 m. Lereng permukaan sungai pada tapak penyukatan pada saat itu adalah 80 mm dalam 500 m, dan irisan melintangnya mendekati segiempat sama sisi dangkal, dengan lebar 200 m dan dalam 11 m. Nilai luahan yang disesuaikan manakah yang akan anda gunakan? Berapakah nilai n dalam rumus Manning yang terhasil?
- 6.2 Hasil pengamatan luahan yang berikut ini diperoleh pada suatu sungai

Tinggi sukat (kaki)	Luahan terukur (kaki ³ /det x 1000)	Kenaikan + atau rorotan - (kaki/jam)
10,4	50	-
12,2	65	-
13,9	77	-
14,3	80	-
22,3	150	-
27,3	180	-0,32
28,1	228	+0,80
30,8	256	+0,525
32,6	225	-0,36
35,2	251	-0,355
38,9	338	+0,345
40,3	316	-0,22
40,8	352	+0,18
41,5	333	-0,235
42,2	362	-

Dengan menggunakan cara Boyer, sesuaikan angka itu untuk keragaman lereng yang menghasilkan lengkung tarafan luahan aliran tunak untuk sungai itu.

- 6.3 Terangkan bagaimana hasil pengamatan luahan sungai pada ketinggian sukat tertentu dapat dipinda (dikoreksi) sehingga semuanya terletak pada sebuah lengkung yang licin, dan terangkan mengapa hal ini lebih dikehendaki.

Luahan sungai terukur pada $Q = 2640 \text{ m}^3/\text{det}$. Selama pengukuran yang 100 minit, ketinggian sukat itu naik dari 50,40 hingga 50,52 m. Hasil pembacaan paras di hulu dan di hilir berbeda 100 mm dalam 700 m. Laju rambat gelombang banjir itu $2,2 \text{ m/det}$. Berikan koordinat lengkung tarafan yang telah dipinda.

- 6.4 Sebuah sungai yang tak dikendalikan selama jangka waktu 80 hari, pada tapak yang mungkin dibangun waduk, memberikan air sebanyak yang berikut ini.

Hari	Banyaknya limpasan ($\text{m}^3 \times 10^6$)	Hari	Banyaknya limpasan ($\text{m}^3 \times 10^6$)	Hari	Banyaknya limpasan ($\text{m}^3 \times 10^6$)
0	0	28	0,7	56	0,6
2	2,0	30	0,8	58	1,2
4	3,2	32	0,8	60	1,4
6	2,3	34	0,7	62	1,8
8	2,1	36	0,7	64	2,0
10	1,8	38	0,5	66	2,3
12	2,2	40	0,4	68	3,2
14	0,9	42	0,7	70	3,4
16	0,5	44	0,8	72	3,5
18	0,3	46	0,4	74	3,7
20	0,7	48	0,3	76	2,8
22	0,7	50	0,2	78	2,4
24	0,6	52	0,2	80	2,0
26	1,2	54	0,4		

- a Rajah data itu dalam bentuk diagram massa.
- b Tentukan tingkat aliran rata-rata, maksimum, dan minimum.
- c Berapakah kapasitas waduk yang diperlukan untuk menentukan dipertahankannya aliran rata-rata untuk ke-80 hari itu jika waduknya, untuk mulai, telah penuh?

d Dalam hal ini berapa banyakkah air yang terbuang dalam limpahan?

- 6.5 Kebutuhan akan air setiap kepala rumah tangga rata-rata dalam suatu masyarakat yang sedang berkembang adalah $0,20 \text{ m}^3/\text{hari}$. Kebutuhan industri sebesar 30 persen dari kebutuhan rumah tangga secara keseluruhan. Kini kota itu berpenduduk 100.000 dan ditaksir akan berlipat dua di waktu mendatang.

Air disediakan dari sebuah tatasungai dengan daya simpan yang ada sebesar 10^7 m^3 dengan luahan harian rata-ratanya untuk setiap bulan (dalam ribuan m^3) adalah sbb.:

Jan	Peb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nop	Des
290	250	388	150	64,5	50	64,5	117	283	388	317	385

Air pengimbang sebanyak $1,5 \text{ m}^3/\text{det}$ diberikan secara tetap.

Carilah, untuk hampiran pertama dan untuk tahun rata-rata, kapasitas simpanan tambahan yang perlu disediakan jika penduduk itu berlipat dua. Tentukan juga banyakknya air yang melimpah terbuang dalam tahun seperti itu dan bandingkanlah dengan yang terbuang sekarang. Andaikan simpanan yang ada sekarang adalah setengah penuh pada 1 Januari.

- 6.6 Suatu masyarakat sebesar 60.000 orang bertambah dengan laju pertambahan 10 persen setiap tahun. Kebutuhan setiap kepala (untuk semua keperluan) dewasa ini adalah $0,20 \text{ m}^3/\text{hari}$ dan bertambah dengan 5 persen setiap tahun. Serahan aman pe.sediaan air yang ada sekarang adalah $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ada sungai yang akan dapat digunakan sebagai sumber penyedia air tambahan. Luahan harian rata-ratanya untuk setiap bulan dalam tahun-air disenaraikan di bawah ini dalam ribuan m^3 .

Apr	Mai	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nop	Des	Jan	Peb	Mar
220	250	370	670	865	1630	670	530	270	300	280	280

Dengan memberi kemungkinan pengimbangan air sebanyak $3 \text{ m}^3/\text{det}$ dari Oktober hingga Maret penuh dan $5 \text{ m}^3/\text{det}$ dari April hingga September penuh, tentukan hampiran pertama kapasitas simpan yang dibutuhkan pada sungai tersebut untuk menentukan persediaan air kota itu 20 tahun dari sekarang, dengan mengandaikan arah kecenderungan sekarang akan terus terjadi, dan bahwa waduk itu kiranya akan penuh pada akhir Nopember.

- 6.7 Senaraikan delapan ciri DAS yang mempengaruhi hidrograf luahannya dan bahas setiap ciri itu.

- 6.8 Hasil penyukatan sungai memberi hasil $Q = 2060 \text{ m}^3/\text{det}$. Penyukatan itu berlangsung 2 jam dan selama itu angka menurun $0,12 \text{ m}$. Lereng

permukaan sungai pada waktu itu adalah 5 cm dalam 400 m dan irisan melintang sungai pada tapak itu ialah lebar 300 m dan dalamnya, 4 m. Luahan yang disesuaikan manakah kiranya yang akan anda gunakan? Berapakah nilai n Manning untuk sungai ini pada saat itu, dan apakah yang ditunjukkan nilai itu mengenai keadaan sungai?

- 6.9 Luahan bulanan dua-tahun suatu sungai ke dalam waduk disenaraikan di bawah ini.

Bulan	Luahan bulanan ($m^3 \times 10^3$)	
	Tahun 1	Tahun 2
Januari	576	102
Pebruari	658	308
Maret	287	432
April	329	533
Mai	370	390
Juni	247	287
Juli	102	164
Agustus	21	123
September	21	123
Oktober	21	141
Nopember	41	183
Desember	83	221

Gambarkan sebuah diagram massa aliran masuk dan tentukan yang berikut ini.

- a Jika waduk itu penuh pada akhir Pebruari, tahun 1, berapakah ambilan yang dibolehkan dalam 1/det sehingga waduk itu akan penuh pada akhir Juni, tahun 2?
- b Jika waduk itu penuh pada awal Januari, tahun 1, dan ambilan itu sebanyak 60 l/det untuk tahun pertama dan 80 l/det untuk tahun yang kedua, bagaimakah keadaan simpanan waduk pada akhir Desember, tahun 2?
- c Berapakah kapasitas simpan yang dibutuhkan dalam waduk itu dalam hal yang kedua untuk memastikan, bahwa luahan yang dibutuhkan itu akan dapat diberikan?

- 6.10 Sebuah sungai yang tak dikendalikan mempunyai aliran rata-rata bulanan (dalam m^3/s) sebagai berikut:

Jan	Peb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nop	Des
5,4	8,3	9,1	8,8	6,3	6,9	10,2	13,7	19,4	16,7	11,0	21,9

Dengan memungkinkan pengimbangan air sebanyak $4,0 m^3/s$ dan kehilangan waduk sebanyak $0,5 m^3/\text{det}$, berapa besarkah kapasitas simpan waduk yang dibutuhkan untuk memastikan bahwa, rata-ratanya, tidak ada air yang melimpah? Lalu berapakah kiranya serahan bersih rata-rata waduk itu? Andaikan satu bulan 30 hari.

- 6.11 a Gambar sebuah lengkung jujuh aliran dari data yang ditabelkan di bawah ini –luahan bulanan rata-rata (aliran dalam m^3/det) sebuah sumber air.

	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3
Januari	110	180	193
Pebruari	102	118	109
Maret	97	88	99
April	84	79	91
Mai	70	56	82
Juni	62	52	74
Juli	45	47	68
Agustus	67	35	43
September	82	60	30
Oktober	134	75	48
Nopember	205	98	49
Desember	142	127	63

Jika orang akan membangun sebuah PLTA di tapak yang ditunjukkan oleh data itu, dan hulu yang tersedia adalah 15 m, berapakah kiranya, taksiran pertama yang wajar, kapasitas PLTA itu dan produksi daya tahunan berdasarkan data tersebut? Berikan alasan anda.

- b Berapakah besarnya aliran bulanan rata-ratanya dengan waktu ulang 10 tahunan?

- 6.12 Aliran masuk setiap bulan (dalam jutaan m^3) ke dalam sebuah waduk dengan permukaan seluas $100 km^2$ disenaraikan di bawah untuk jangka waktu 24 bulan.

Bulan	Tahun 1	Tahun 2	Bulan	Tahun 1	Tahun 2
1	35	38	7	14	6
2	28	30	8	17	15
3	25	24	9	23	20
4	16	12	10	27	28
5	10	8	11	36	40
6	9	7	12	40	42

Yang hilang dari penguapan diandaikan sebanyak 0,10 m/bulan. Air imbangan sebanyak $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ terus-menerus dialirkan.

Jika waduk itu penuh pada akhir bulan 3, tahun 1, dan penuh lagi pada akhir bulan 12, tahun 2, hitunglah:

- a perolehan bersih selama jangka waktu 2 tahun;
- b jumlah air yang terlimpah;
- c daya tampung air yang diperlukan.

6.13 Ada usul untuk memperkembangan air terjun untuk PLTA. Lengkung jujuh aliran diberikan di bawah ini dalam bentuk tabel. Hulu yang tersedia 70 m.

Buatlah taksiran pertama untuk kapasitas terpasang dan produksi daya tahunan.

% waktu tersamai atau terlampaui	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$Q (\text{m}^3/\text{det})$	4,5	3,5	2,9	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4	1,1	0,5

7

Analisis hidrograf

7.1 Pesusun hidrograf alami

Berbagai pesusun (komponen) yang membentuk hidrograf alami tertera pada gambar 7.1. Pertama yang ada hanyalah *aliran dasar*; yaitu, saham airtanah dari akuifer yang berbatasan dengan sungai, yang perluannya makin perlahan-lahan sejalan dengan waktu. Hidrograf aliran dasar itu terletak di dekat lengkung bereksponen dan banyaknya pada setiap saat dapat digambarkan secara hampiran dengan:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

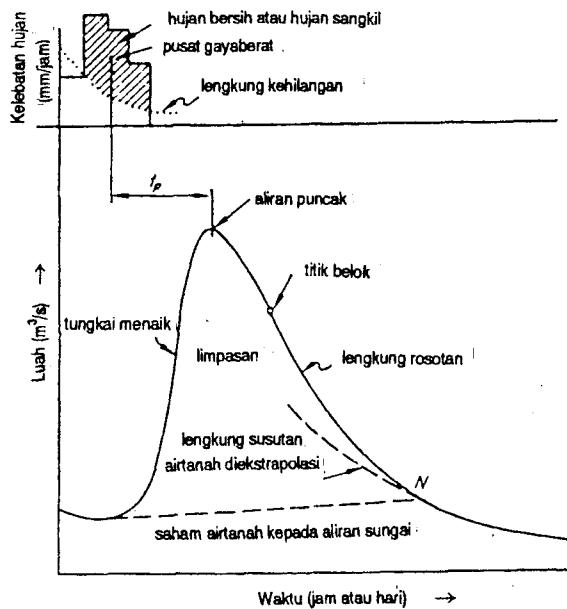
di sini

- Q_0 = luah pada awal jangka waktu yang diamati
- Q_t = luah pada akhir waktu t yang diamati
- α = koefisien akuifer
- e = dasar logaritma asli

Begini hujan mulai, ada masa awal pencegatan dan peresapan air sebelum ada limpasan yang dapat diukur mencapai alur sungai, dan selama jangka waktu hujan, air yang hilang seperti itu terus saja terjadi, meskipun berkurang, seperti sudah pernah dibicarakan; dengan demikian, *grafik hujan* harus disesuaikan untuk menunjukkan *hujan bersih*, atau *hujan sangkil*. Jika kehilangan awal itu telah terpenuhi, maka mulailah terjadi limpasan permukaan yang terus berlangsung sampai nilai puncak, yang terjadi pada saat t_p , yang diukur pada pusat gravitas grafik hujan bersih. Setelah itu, grafiknya menurun mengikuti *tungkai menurun* hingga akhirnya lenyap. Dalam pada itu, peresapan dan penelusan yang berlangsung terus selama masa pencurahan secara keseluruhan, berakibat pada terangkatnya muka airtanah. Oleh karena itu pemasukan air itu

lebih besar sahamnya pada akhir benda ketimbang pada awal benda. Tetapi setelah itu muka airtanah itu menurun lagi mengikuti *lengkung penyusutan*.

Untuk mudahnya, limpasan permukaan diandaikan mengandung dua pesusun yang lain: *curahan alur* dan *antar-aliran*. Curahan alur adalah bagian curahan DAS menyeluruh yang jatuh secara langsung pada permukaan sungai besar dan kecil, dan danau. Jumlahnya biasanya kecil saja, tetapi jika dalam DAS terdapat danau besar, jumlah itu bisa cukup penting dan karena itu perlu ditangani secara tersendiri. Antar-aliran menunjuk kepada air yang bergerak mendatar melewati lapis tanah yang atas-atas, mungkin dalam tata-salir buatan atau di atas *kematu* atau lapisan kedap yang terdapat langsung di bawah permukaan. Aliran yang demikian itu dapat beragam, dari tak ada sama sekali hingga bagian yang cukup besar dari limpasan.



Gambar 7.1 Bagian pesusun hidrograf alami

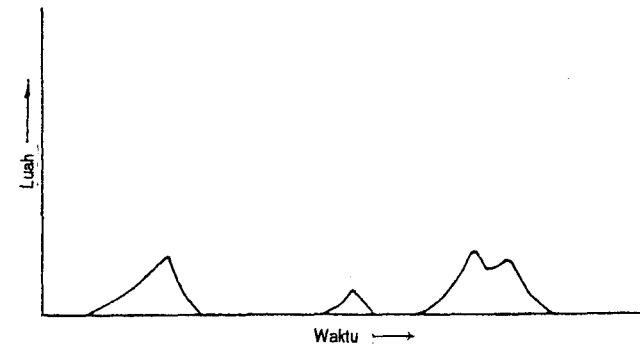
Saham airtanah bagi aliran banjir mempunyai sifat yang berbeda sama sekali daripada sifat limpasan permukaan. Oleh karena itu sifat saham airtanah perlu

dibahas tersendiri. Alasan inilah yang menjadi salah satu keharusan pertama untuk memisahkan yang satu dengan yang lainnya.

7.2 Saham aliran dasar kepada luahan sungai

Karena aliran dasar menggambarkan luahan akuifer, perubahan terjadi perlahan-lahan dan ada bedawaktu antara sebab dan akibat yang dengan mudah dapat berkembang menjadi jangka waktu harian atau mingguan. Hal ini bergantung pada *kehantaran* akuifer yang berbatasan dengan sungai ybs dan pada iklim. Beberapa di antara keadaan yang takberhingga itu akan dibahas berikut ini.

Kita harus membedakan secara luas antara *sungai merugi* dan *sungai melaba*. Sungai merugi adalah sungai yang aliran dasarnya negatif; yaitu, sungai itu memberi air kepada airtanah alih-alih memperoleh daripadanya (misalnya, saluran pengairan bekerja sebagai sungai merugi, demikian pula batang sungai alami yang melintasi daerah gurun). Saham yang negatif itu terjadi dengan mengurangi jatah akuifer yang memberikan air kepada sungai di tempat yang lain; jelas, karena tidak ada aliran dasar dari sungai yang *sama sekali* merugi. Sungai yang demikian itu (di Timur Tengah disebut *wadi*) menjadi kering sama sekali selama masa tak ada hujan; orang menyebutnya *sungai bentaran*. Bentuk hidrografnya tertera pada gambar 7.2.

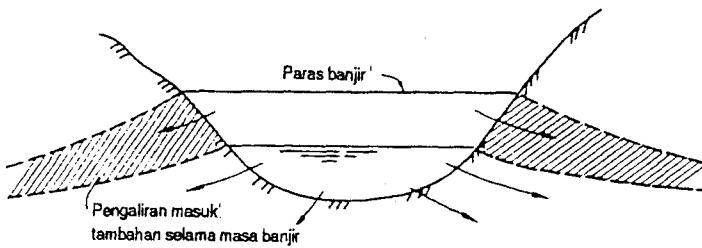


Gambar 7.2 Hidrograf sungai bentaran

Sebaliknya, sungai melaba memperoleh air dari airtanah dan bertindak sebagai penyalir bagi akuifer yang berbatasan. Sebagian besar sungai di Inggris Raya dan di Eropa termasuk golongan ini. (Banyak sungai di Indonesia juga termasuk golongan ini. Pen.)

Sungai berjeda adalah sungai yang bekerja baik sebagai sungai merugi maupun sungai melaba, bergantung pada musimnya dan cenderung menjadi kering pada waktu kemarau.

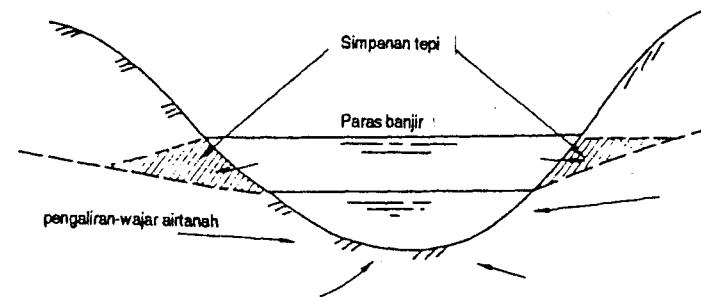
Sungai malar tergolong yang paling banyak. Sungai jenis ini memiliki aliran yang rendah pada musim-kemarau dengan airnya berasal dari aliran dasar, sehingga tergolong sungai melaba. Karena banyak sungai malar melewati formasi geologi yang berbeda-beda dengan kelulusan yang beragam, dan terpengaruh oleh iklim yang bermacam-macam, maka sifatnya merugi dan melaba pada ruas yang berbeda-beda. Contoh yang baik untuk ini adalah Sungai Efrat di Irak. Gambar 6.18 melukiskan hidrograf sebagian-tahun Sungai Efrat dan berubahnya secara perlahan-lahan aliran dasarnya dengan musim dapat diamati. Aliran dasar itu sebagian besar berasal dari daerah hulunya yang berada di Irak bagian utara, Turki dan Siria. Di Hit, tempat yang terpakai untuk mengamati hidrograf itu, sungai itu selama sebagian besar tahun bersifat merugi.



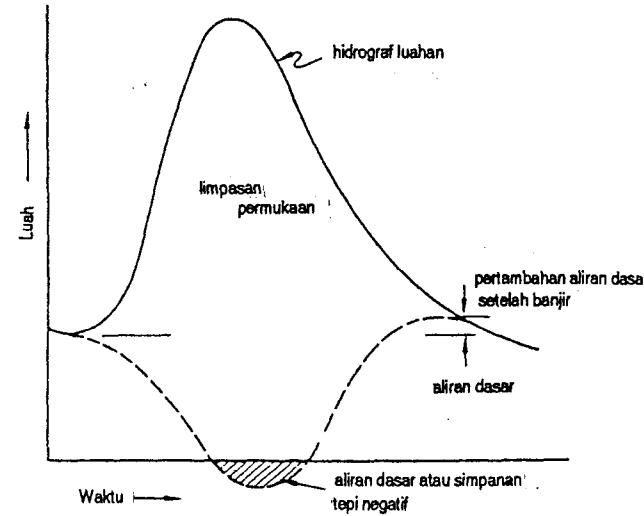
Gambar 7.3 Sungai merugi

Simpanan tebing menyangkut bagian limpasan pada banjir ketika menaik, yang terserap oleh batas batang air yang ada di atas muka airtanah normal; hal itu terlukis pada gambar 7.3 dan 7.4. Pada gambar yang terakhir itu, arah anak panah yang menunjukkan masuknya airtanah ke dalam sungai adalah terbalik selama waktu banjir, ketika permukaan sungai itu ada di atas muka airtanah. Akibatnya, hidrograf banjir tertentu boleh jadi memberi saham cukup banyak pada aliran dasar sebagaimana dinyatakan pada gambar 7.5. Pemisahan seperti tergambar itu sebenarnya tak mungkin secara kuantitatif, tetapi benar secara kualitatif.

Pada banyak sungai alami, dengan sendirinya, bergantung pada kelulusan tebing dan lereng permukaan freatiknya, keragaman aliran dasar akan lebih kecil ketimbang yang dinyatakan pada gambar 7.5. Hal itu akan menyebabkan hanya

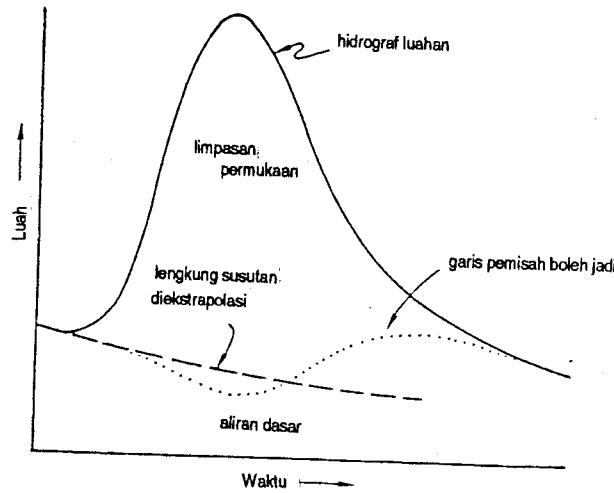


Gambar 7.4 Sungai melaba



Gambar 7.5 Aliran dasar negatif

tukikan yang kecil dari ekstrapolasi lengkung penyusutan, yang disusul dengan kenaikan secara berangsur-angsur hingga ke nilai yang lebih tinggi daripada nilai awalnya, seperti tertera pada gambar 7.6.

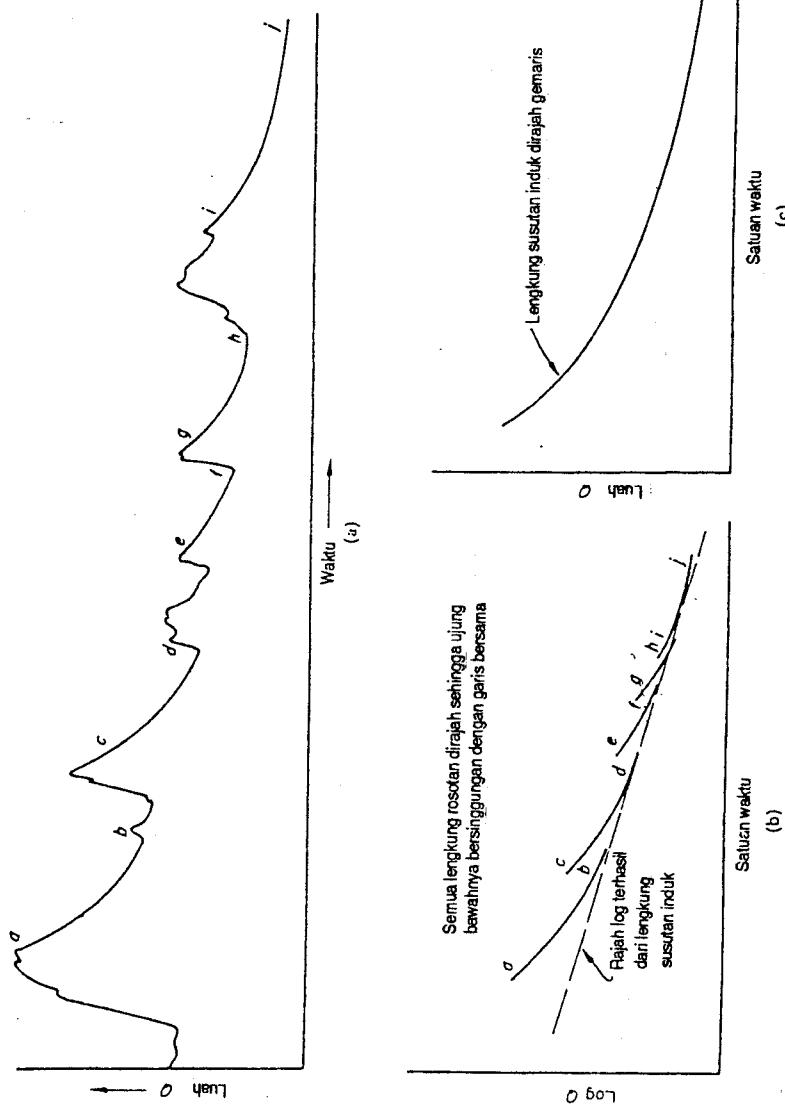


Gambar 7.6 Memisahkan aliran dasar

7.3 Memisahkan aliran dasar dan limpasan

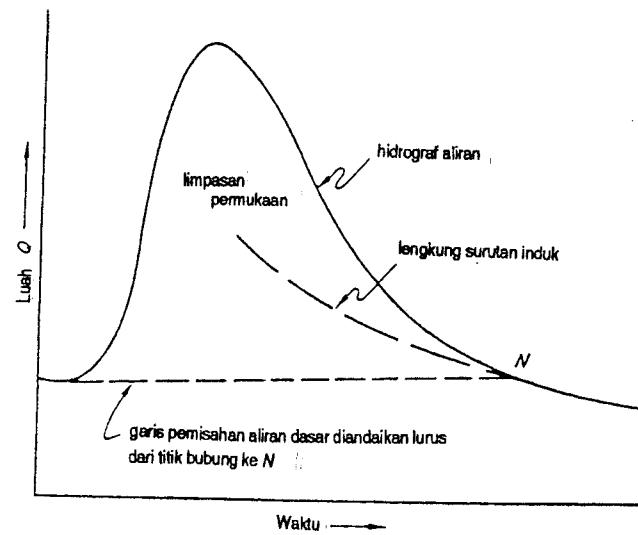
Telah dinyatakan dalam pasal sebelumnya, bahwa garis pemisah antara limpasan dan aliran dasar tidaklah dapat ditentukan dan dapat berbeda besar. Karena untuk *mengupas* kedudukannya yang tepat akan diperlukan pengetahuan yang rinci mengenai hidrogeologi daerah yang bersangkutan, termasuk luas dan dayahantar semua aquifernya, umumnya lebih praktis jika digunakan cara pemisahan yang taatasas. Mana di antara yang berikut ini yang akan digunakan, bergantung pada data yang tersedia.

Jika tersedia rekaman luahan terus-menerus mengenai sungai yang bersangkutan, yang meliputi jangka waktu beberapa tahun, hidrograf itu harus dirajah dengan cara yang tertera pada gambar 7.7a. Ini diperiksa untuk bagian-bagian yang mencakup lengkung surutan yang hanya masuk ke dalam saham untuk aliran dasar, setelah limpasannya terhenti. Hal itu dilakukan pada sebanyak mungkin tingkat. Semua bagian itu disarikan dari hidrograf yang tak terputus-putus dan dirajah lagi pada skala tegak log Q dan sekala waktu gemaris, seperti tertera pada gambar 7.7b. Dimulai dengan aliran menyurut terendah dalam rekaman, sekarang dibuat lengkung yang bersinggungan pada bagian yang bawah-bawah (yaitu, lengkung surutan yang sebenarnya) dari



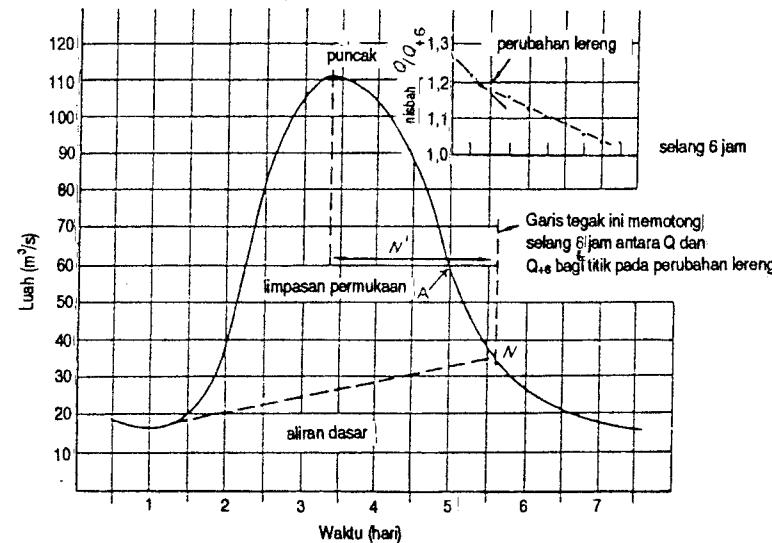
Gambar 7.7 Menurunkan lengkung surutan induk. a Hidrograf normal dengan lengkung surutan yang terpilih. b Rajah log lepasil dari lengkung susutan induk. c Rajah gemaris lengkung surutan induk

rajan yang tersari log Q . Ini paling mudah dilakukan dengan menggeser-gesarkan kertas kalkir di atas rajahan itu, dengan absisnya bertindihan, sehingga setiap rajahan Q dengan besaran yang naik secara berturut-turut menjadi cocok pada lengkung yang mengembang itu, dan memanjangkannya ke atas sebagian demi sebagian. Lengkung singgung yang ditentukan sedemikian sehingga didapat ketinggian yang paling mungkin itu kemudian dialihkan kembali ke skala tegak gemaris. Lengkung itu disebut *lengkung surutan induk* bagi tempat penyukatan tertentu. Lengkung itu sekarang dapat digunakan bagi hidrograf waktu badai tertentu dengan cara seperti dinyatakan dalam gambar 7.8. Dalam hal ini lengkung surutannya dicocokkan bersama pada ujung bawahnya dan dengan titik lengcongnya yang ditandai sebagai N . N menggambarkan titik tempat limpasan permukaan terhenti secara nyata dan ditariklah garis lurus menuju ke padanya dari titik naik tiba-tiba. Garis ini, yang pada gambar 7.8 dinyatakan dengan garis terputus-putus, menggambarkan garis alas hidrograf larian permukaan yang kemudian dapat dianalisis.



Gambar 7.8 Tata cara untuk memisahkan aliran dasar

Tata kerja yang diuraikan secara singkat di atas mungkin yang terbaik dari yang ada; meskipun demikian hal itu bergantung pada data yang sebelumnya diamati, dan data itu tidak selalu tersedia. Tata kerja yang lain ialah menentukan titik



Gambar 7.9 Pilihan lain untuk memisahkan aliran dasar

yang berkelengkungan terbesar pada tungku surutan hidrograf. Ini barangkali paling mudah dilakukan dengan menghitung nisbah antara Q pada sebarang waktu dan, katakan saja, 2 jam kemudian (atau selang waktu lain yang mudah). Contoh di bawah akan memberi gambaran mengenai cara tersebut tadi. Gambar 7.9 adalah hidrograf sungai yang teramat, meliputi jangka waktu beberapa hari. Diharapkan, agar dibedakan limpasan permukaan dan aliran dasar. Dengan mulai dari titik A dan dengan menggunakan selisih 6 jam bagi nisbah yang berurutan, hasil perhitungan itu disajikan pada tabel 7.1.

Dapat dilihat dari grafik sisipan pada gambar 7.9 tentang nisbah Q/Q_{+6} lawan selang waktu, bahwa nyata ada dua lereng yang berdiri sendiri-sendiri; lereng yang atas dihubungkan dengan pelimpasan dan lereng yang bawah dengan penyusutan airtanah. Pada titik potongnya dapatlah ditentukan nisbah gawatnya. Titik pertama di luar daerah perpotongan itu pada sisi airtanahnya menyatakan kedudukan N yang tidak peka. Analisis hidrograf berikutnya tidak sangat peka terhadap kedudukan N yang tepat, dan pada pk 03.00 atau 06.00 pada hari ke-6 kiranya akan mencukupi. Sekarang digambar garis lurus ke N dari titik tempat hidrograf itu mulai naik, seperti sebelumnya. Jumlah limpasan seluruhnya sekarang dapat diperoleh dengan mengukur luas daerah di bawah lengkung itu dan di atas garis lurus tersebut.

Tabel 7.1 Perhitungan untuk menolong menemukan N

Hari	Jam	Q (m ³ /det)	Q_{+6} (m ³ /det)	Nisbah Q/Q_{+6}
5	12.00	60,1	47,5	1,27
	18.00	47,5	39,0	1,22
	24.00	39,0	33,2	1,18
6	06.00	33,2	28,6	1,16
	12.00	28,6	25,2	1,13
	18.00	25,2	22,7	1,11
	24.00	22,7	20,9	1,09
7	06.00	20,9	19,7	1,06
	12.00	19,7	18,9	1,04
	18.00	18,9	18,2	1,04
	24.00	18,2	-	

Letak N penting, juga pada penyusunan hidrograf. Ini akan kita lihat pada pasal 7.11, karena untuk sebagian hal itu akan menentukan *panjang alas* hidrografnya. Panjang alas itu terdiri dari bagian yang ada di depan puncak, yang bergantung pada lamanya waktu hujan dan pada t_c , yaitu jangka waktu pengumpulan air, dan pada tungkai surutan setelah puncaknya, dan terutama bergantung pada watak DAS-nya. Dari pengamatan di banyak DAS yang alamiah, letak N dapat ditentukan berdasar pengalaman dari tabel 7.2 dalam beberapa hari setelah puncak banjir yang bersangkutan.

Tabel 7.2 DAS sebagai pedoman untuk N

DAS (km ²)	Waktu dari puncak ke N (hari)
250	2
1250	3
5000	4
12500	5
25000	6

7.4 Menilai aliran dasar

Cara untuk menilai aliran dasar bagi DAS yang tak bersukat diberikan pada acuan 1. Dengan analisis regresi angka kebasahan DAS (AKD, lihat pasal 4.4.4) dan ciri sejumlah besar DAS Inggris, persamaan di bawah ini diusulkan untuk ‘aliran-tak-terpisahkan rata-rata’ atau ATTR:

$$\text{ATTR} = (3,26 \times 10^{-4})(\text{AKD-125}) + (7,4 \times 10^{-4})\text{RSMD} + (3 \times 10^{-3}) \quad (7.1)$$

Dalam hal ini ATTR adalah aliran dasar dalam m³/det/km² dan RSMD adalah angka potensi banjir yang bergantung pada iklim, dan batasannya diberikan pada pasal 9.4.

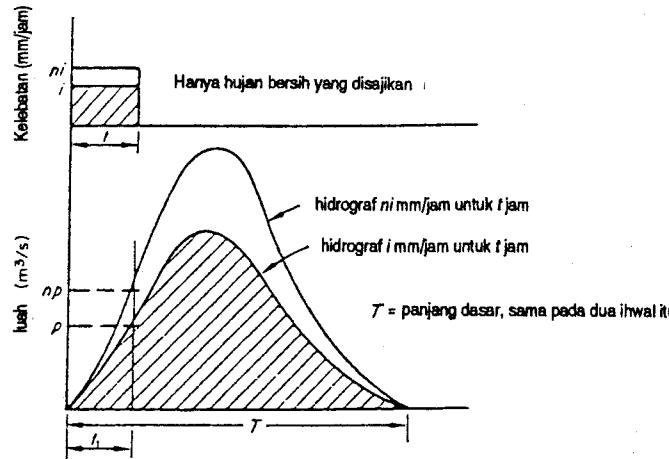
7.5 Hidrograf satuan

Setelah hidrograf limpasan permukaan diturunkan dengan cara yang telah dibahas dalam beberapa pasal di depan, sekarang timbul masalah bagaimanakah hal itu dapat dinasabkan dengan curah hujan yang menyebabkannya. Jelas, banyak dan hebatnya hujan kedua-duanya ada pengaruhnya langsung pada hidrograf, tetapi hal itu belum dijelaskan bagaimana sebenarnya, dan sampai sejauh apa, masing-masing itu berpengaruh. Cara untuk melakukannya merupakan kiat yang sebagian dasarnya adalah pengalaman yang menggunakan anggitan (konsep) *hidrograf satuan*, yang pertama kali dibicarakan oleh Sherman [2].

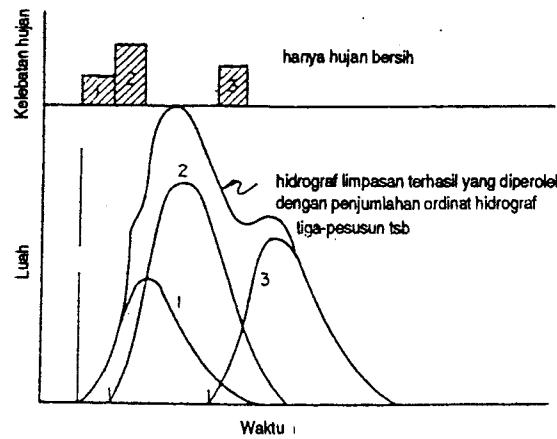
Harus ditekankan, bahwa nasaban yang dicari adalah antara *hujan bersih* atau *hujan sangkil* (yaitu hujan yang tetap berupa limpasan setelah dikurangi semua yang hilang akibat penguapan, pencegatan, dan peresapan) dan limpasan permukaan (yaitu hidrograf limpasan dikurangi aliran dasar).

Cara itu meliputi tiga asas yang berikut:

- 1 Dengan curah hujan bersih berkelebatan seragam pada DAS tertentu, kelebatan hujan yang berbeda-beda menghasilkan jujuh yang sama untuk jangka waktu yang sama, meskipun banyaknya berbeda-beda. Ini merupakan kaidah empiris yang secara hampiran sama dan terlukis pada gambar 7.10.
- 2 Dengan hujan bersih berkelebatan seragam pada DAS tertentu, kelebatan hujan yang berbeda-beda dengan jujuh (lama hujan) yang sama menghasilkan hidrograf limpasan untuk jangka waktu yang sama. Ordinat hidrograf itu, pada sebarang waktu, memiliki perbandingan yang sama satu dengan yang lain dengan kelebatan hujannya. Dengan kata lain, bahwa hujan sebanyak n kali dalam waktu tertentu akan memberikan ordinat sebesar n kali. Pada gambar 7.10, ordinat pada waktu t_1 masing-masing adalah np untuk kelebatan hujan ni dan i .
- 3 Asas superposisi berlaku untuk hidrograf dari jangka waktu malar dan/atau yang berdiri sendiri-sendiri dari hujan bersih berkelebatan seragam. Ini terlukis dalam gambar 7.11. Di dalamnya dapat dilihat, bahwa hidrograf jumlah limpasan yang disebabkan oleh hujan badai yang berdiri sendiri-sendiri merupakan jumlah tiga hidrograf yang terpisah-pisah.



Gambar 7.10 Asas kesebandingan hidrograf kesatuan



Gambar 7.11 Asas superposisi diterapkan pada hidrograf kesatuan

Setelah ketiga asas itu ditentukan, anggitan hujan satuan itu sekarang sudah diperkenalkan. Satuan hujan dapat ditentukan sebarang banyaknya, yang diukur sebagai kedalaman pada daerah tadi; kedalaman itu biasanya 1 cm, meskipun tidak harus selalu sebesar itu. Hujan satuan itu kemudian seluruhnya harus

tampak dalam **hidrograf satuan**. Luas di bawah lengkung hidrograf itu mempunyai matra luahan sesaat dikalikan waktu, atau

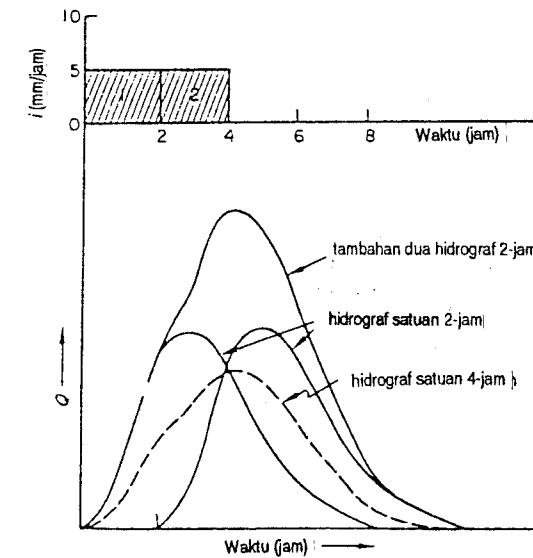
$$\frac{L^3}{T} \times T = L^3 = \text{volum limpasan}$$

sehingga, meskipun hujan satuan dinyatakan sebagai 1 cm pada seluruh DAS, limpasan yang terhasil dinyatakan dalam meter kubik, dan besarnya angka yang terlibat menjadi sama. Jika hidrograf satuan DAS tertentu, **dan jujuh tertentu dari hujan** diketahui, maka dari asas 2, limpasan dari sebarang hujan yang lain dengan jujuh yang sama dapat diprakirakan.

Ini adalah langkah pertama menuju nasaban lengkap yang dicari, tetapi andaikata saja curah hujan itu berbeda jujuhnya dengan hidrograf satuan, maka hidrograf satuan itu harus diubah sebelum kita dapat menggunakannya.

7.6 Hidrograf satuan dari berbagai jujuh

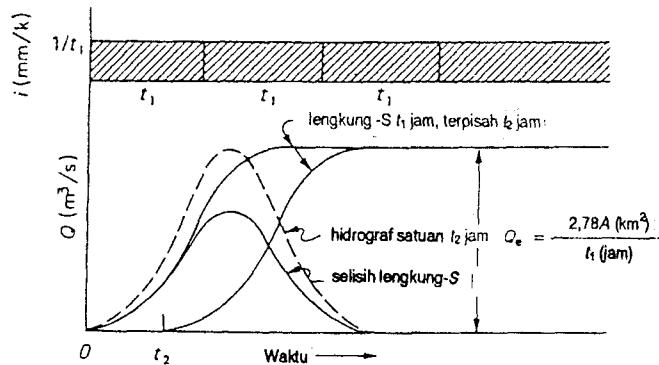
7.6.1 Mengubah hidrograf satuan jujuh pendek ke hidrograf satuan dengan jujuh yang lebih panjang Cara yang paling sederhana untuk menghasilkan hidrograf satuan bagi jujuh hujan yang lebih lama terlukis pada gambar 7.12.



Gambar 7.12 Mengubah hidrograf satuan pendek ke hidrograf panjang (jika yang panjang itu merupakan perkalian genap dari yang pendek)

Andaikan diberikan hidrograf satuan 2 jam dan yang diminta adalah hidrograf satuan 4 jam. Ini dapat diperoleh dengan mengandaikan adanya jangka waktu hujan bersih 2 jam berikutnya langsung menyusul yang pertama, yang akan menimbulkan hidrograf satuan yang sama tetapi bergeser ke kanan, dalam waktu, selama 2 jam. Jika sekarang kedua hidrograf satuan itu digabungkan lewat gambar, maka jumlah hidrograf yang diperoleh melukiskan limpasan hujan 4 jam dengan kelebatan $1/2$ cm/jam. (Ini tentu begitu, karena hidrograf satuan 2 jam tadi mengandung hujan 1 cm.) Maka dari itu, hidrograf satuan ini merupakan hasil hujan dengan kelebatan dua kaliya sebagaimana dibutuhkan dan hidrograf satuan 4 jam itu diturunkan dengan membagi ordinatnya dengan 2. Ini ditunjukkan dengan garis terputus-putus pada gambar 7.12. Akan dapat dilihat, bahwa hidrograf satuan 4 jam itu mempunyai dasar waktu 2 jam lebih lama daripada hidrograf satuan yang 2 jam; ini masuk akal karena hujan itu telah turun dengan kelebatan yang lebih kecil selama waktu yang lebih lama.

7.6.2 Mengubah hidrograf satuan jujuh-panjang ke hidrograf satuan jujuh lebih pendek Untuk menurunkan hidrograf-satuan hujan waktu-pendek dari hidrograf-satuan hujan jangka-waktu lebih panjang adalah perlu untuk menggunakan kiat lengkung-S. Lengkung-S tidak lain adalah jumlahan hidrograf yang terhasil dari sederet badai terus-menerus dengan kelebatan seragam, yang memberikan 1 cm dalam t_1 jam pada DAS; yaitu, hidrograf limpasan dari curahan hujan terus-menerus dengan kelebatan $1/t_1$. Hidrograf yang demikian bentuknya seperti pada gambar 7.13, yang luahannya menjadi panggah (tetap) setelah t_c , waktu pengumpulannya, ketika setiap bagian DAS memberi sahamnya, dan keadaannya bertahan tunak. Jadi, setiap lengkung-S adalah khas bagi jujuh hidrograf satuan tertentu, dalam DAS tertentu.



Gambar 7.13 Memindah-mindah satuan hidrograf dengan lengkung-S

Jika lengkung-S kedua digambarkan satu satuan waktu di kanan yang pertama, maka jelas beda antara kedua lengkung-S itu jika dinyatakan dengan grafik, akan sama dengan limpasan satu hidrograf satuan berjatuhan t_1 jam.

Jika yang diperlukan hidrograf satuan badai hujan pendek berjangka waktu t_2 jam, hal itu dapat diperoleh dengan jalan menggambarkan lagi lengkung-S itu, tetapi bergeser hanya t_2 jam sepanjang sumbu waktu. Selisih pada gambar antara ordinat kedua lengkung-S itu sekarang menggambarkan limpasan hujan t_2 jam dengan kelebatannya sebesar $1/t_1$ cm/jam. Maka dari itu, ordinat grafik selisih lengkung-S ini harus dikalikan dengan t_1/t_2 , sehingga kelebatan hujan yang tergambar adalah $t_1/t_2 \times 1/t_1 = 1/t_2$ cm/jam, yang merupakan kelebatan yang diperlukan untuk hidrograf satuan t_2 . Tatacara itu terlukis pada gambar 7.13.

Jika dasar waktu hidrograf satuan adalah T jam, maka limpasan tahana-tunak harus terdapat pada T jam; jadi yang diperlukan hanya hidrograf satuan T/t_1 untuk mengembangkan pengaliran-keluar panggah dan dengan demikian menghasilkan lengkung-S. Aliran seimbang, Q_e , dengan mudah bisa diperoleh karena 1 cm pada DAS dibekalkan dan diambil setiap t_1 jam:

$$Q_e = \frac{2,78A}{t_1} \quad \text{atau} \quad Q_e = \frac{645A}{t_1}$$

dengan A adalah DAS (km^2)
 t_1 adalah jangka waktu (jam); t_1 adalah jangka waktu (jam)
dan Q_e dinyatakan dalam m^3/detik . dan Q_e dinyatakan dalam $\text{kaki}^3/\text{detik}$.

Akan jelas kiranya, bahwa cara ini dapat digunakan untuk mengubah hidrograf satuan ke arah mana saja, menjadi lebih panjang atau lebih pendek. Jika proses itu dari jangka waktu lebih pendek ke jangka waktu yang lebih panjang, maka t_2 tidak harus merupakan perkalian langsung t_1 . Meskipun cara tersebut telah diuraikan dengan gambar, dalam praktik penggunaannya biasanya dibuat dalam bentuk tabel seperti yang diterangkan oleh contoh 7.1.

Tabel 7.3 Kiat lengkung-S (semua nilai kecuali yang ada pada lajur (1) dinyatakan dalam satuan m^3/detik)

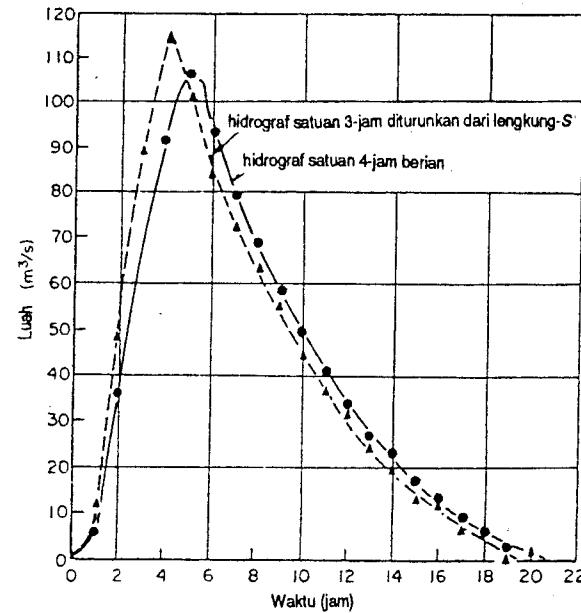
(1) Waktu (jam) 4 jam	(2) Hidr. sat. 4 jam	(3) Tamb. lengk. S	(4) Lajur lengk. (2) + (3)	(5) Lengk. S ter- pancal	(6) Lajur (4) dikurangi lajur (5)	(7) Lajur. 6 x (4/3) = 3 jm hidro. sat.
0	0	-	0	-	0	0
1	6	-	6	-	6	8
2	36	-	36	-	36	48
3	66	-	66	0	66	88
4	91	0	91	6	85	113
5	106	6	112	36	76	101
6	93	36	129	66	63	84
7	79	66	145	91	54	72
8	68	91	159	112	47	63
9	58	112	170	129	41	55
10	49	129	178	145	33	44
11	41	145	186	159	27	36
12	34	159	193	170	23	31
13	27	170	197	178	19	25
14	23	178	201	186	15	20
15	17	186	203	193	10	13,5 ^a
16	13	193	206	197	9	12 ^a
17	9	197	206	201	5	6,5 ^a
18	6	201	207	203	4	5,5 ^a
19	3	203	206	206	0	0 ^a
20	1,5	206	207	206	1	1,5 ^a
21	0	206	206	207	-1	

^a Perlu disesuaikan sedikit pada ujung hidrograf satuan 3 jam. Ini paling mudah dikerjakan dengan mata (lihat gambar 7.14).

Contoh 7.1 Jika diberikan hidrograf satuan 4 jam seperti yang disenaraikan pada lajur (2) tabel 7.3, turunkanlah hidrograf satuan yang 3 jam. DAS-nya 300 km^2 .

Aliran keseimbangan lengkung-S $Q_e = (2,78 \times 300)/4 = 208 \text{ m}^3/\text{det}$.

Perlu diperhatikan, bahwa $Q_e = 208 \text{ m}^3/\text{det}$, seperti telah dihitung, cocok benar dengan nilai akhir lengkung-S sebesar 207 seperti yang disenaraikan. Ini merupakan petunjuk, bahwa jangka waktu 4 jam hidrograf satuan itu ditaksir dengan benar. Sering sekali, dengan sebaran hujan yang tak merata, orang perlu mencoba untuk menyusutkan hujan bersih ke hujan dengan kelebatan seragam



Gambar 7.14 Hidrograf satuan yang diturunkan dengan kiat lengkung-S

dengan jujuh tertentu. Dengan itu, lengkung-S dapat digunakan sebagai cara untuk memeriksa nilai yang telah dipilih tadi. Andaikata saja nilai akhir lengkung-S itu naik-turun tak keruan dan tidak menjadi mantap hingga tak banyak ragamnya, maka hal itu kiranya menjadi petunjuk akan waktuhujan yang tidak tepat bagi hidrograf satuan tersebut.

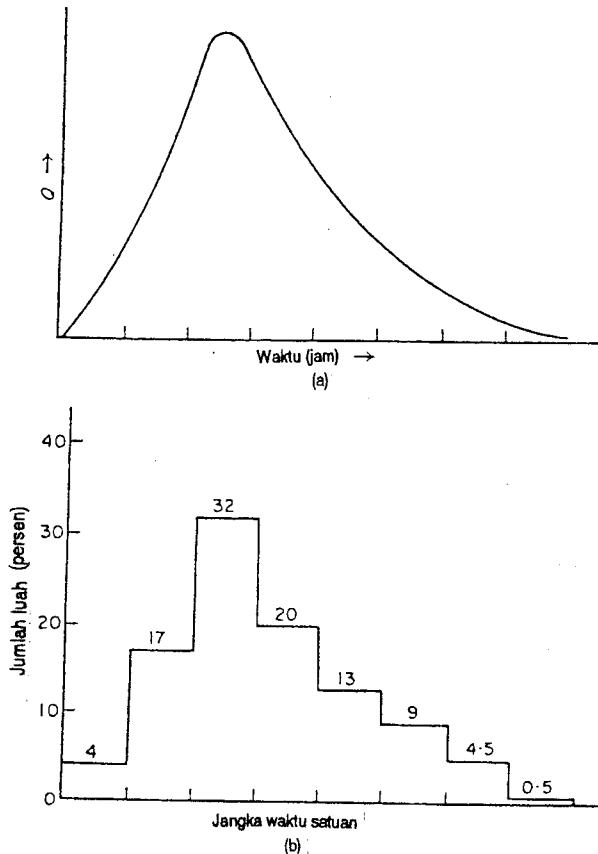
Catat pula, bahwa tidak perlu pada tabel 7.3 untuk mencantumkan lajur T/t_1 hidrograf satuan yang 4 jam; dan menambahkan itu secara menyamping.

Tambahan lengkung-S adalah ordinat lengkung-S yang tergeser waktunya 4 jam. Karena hidrograf satuan 4 jam yang pertama dan lengkung-S adalah sama, tambahan lengkung-S dan lajur lengkung-S telah terisi, dalam langkah yang berganti-ganti. Hasilnya sama dengan mencantumkan baris-baris ordinat hidrograf satuan, berturut-turut beringsut dengan 4 jam, karena tambahan lengkung-S itu menggambarkan jumlah semua ordinat hidrograf satuan sebelumnya.

7.7 Hidrograf satuan sebagai sebaran persen

Grafik sebaran, pertama kali digunakan oleh Bernard [3], menggambarkan hidrograf satuan dalam bentuk persen aliran jumlah yang terjadi pada jangka waktu satuan tertentu. Karena luahan yang digambarkan dengan hidrograf satuan berbanding lurus dengan hujan bersih, persennya dalam waktu satuan akan tetap sama, bagaimana pun juga hujan bersihnya. Ini merupakan alat yang berguna untuk menerapkan cara hidrograf satuan itu dalam beberapa hal.

Pada gambar 7.15 terlukis sebuah hidrograf, bersama grafik turunan yang menggambarkannya. Luas di bawah lengkung dan di bawah garis berjenjang adalah sama; jadi, pada penurunan hidrograf satuan dari persen sebaran, harus



Gambar 7.15 a Hidrograf satuan. b Grafik sebaran yang diturunkan

digambar garis yang licin melewati semua jenjang itu untuk memperoleh luas yang sama.

Oleh sebab itu, grafik sebaran kurang tepat ketimbang hidrograf, tetapi lebih cocok untuk proses penurunan yang berulang-ulang seperti akan dilihat pada pasal 7.8.

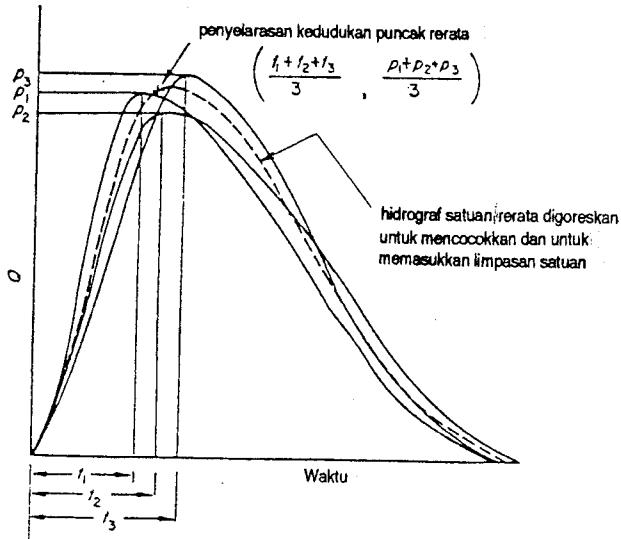
7.8 Penurunan hidrograf satuan

Hidrograf satuan untuk DAS tertentu dapat diturunkan dari hidrograf alami yang terhasil dari sebarang badai yang meliputi DAS itu dan yang kelebatannya seragam secara wajar. Jika DAS itu sangat luas, lebih besar daripada (katakan saja) 5000 km^2 , daerah seluas itu mungkin saja tidak pernah terliliti oleh badai dengan kelebatan yang seragam. Badai yang seragam ukurannya terbatas, disebabkan oleh keadaan meteorologi. Dalam hal seperti itu, DAS tersebut harus terbagi-bagi dalam daerah aliran anak sungai, dan masing-masing DAS itu ditentukan sendiri-sendiri.

Langkah pertama adalah memisahkan aliran dasar dari limpasan permukaan (pasal 7.3), dan merajah limpasan itu dan grafik hujannya pada dasar waktu yang sama. Banyaknya hujan badai bersih kemudian harus ditaksir dan kelebatan dan jujuhnya ditentukan. Sekarang diperiksa banyaknya hujan bersih pada DAS dan banyaknya limpasan di bawah hidrograf. Kedua-duanya harus sama dan salah satu di antaranya mungkin perlu penyesuaian.

Hidrograf satuannya sekarang dapat diperoleh dengan membagi ordinat hidrograf limpasan dengan hujan bersihnya dalam cm. Ordinat yang disesuaikan itu menggambarkan hidrograf satuan untuk jujuh tertentu yang telah ditetapkan itu.

Sebaiknya untuk selalu menentukan beberapa hidrograf satuan, dan jika tersedia, dengan menggunakan badai dengan kelebatan seragam yang nyata dan berdiri sendiri-sendiri. Peristiwa alam seperti badai hujan dan limpasan terpengaruh oleh bermacam-macam faktor dan tidak ada dua di antaranya yang sama benar. Sering data alami yang terbaik adalah untuk jujuh hujan yang berbeda-beda dan hidrograf yang terhasil akan perlu diubah ke jujuh yang sama (pasal 7.6). Sekali kita memperoleh sejumlah hidrograf yang demikian itu untuk jujuh yang sama, maka kita dapat menentukan hidrograf satuan ‘rata-rata’ atau yang khas seperti disajikan pada gambar 7.16. Ordinatnya *tidak* dirata-ratakan karena hal itu akan menghasilkan puncak yang tidak khas. Nilai puncak hidrograf yang sendiri-sendiri itu dirata-ratakan, seperti halnya dengan nilai waktunya sejak awal limpasan hingga ke puncaknya. Semua nilai itu ditentukan



Gambar 7.16 Hidrograf satuan rata-rata dari sejumlah penurunan bagi sebuah DAS

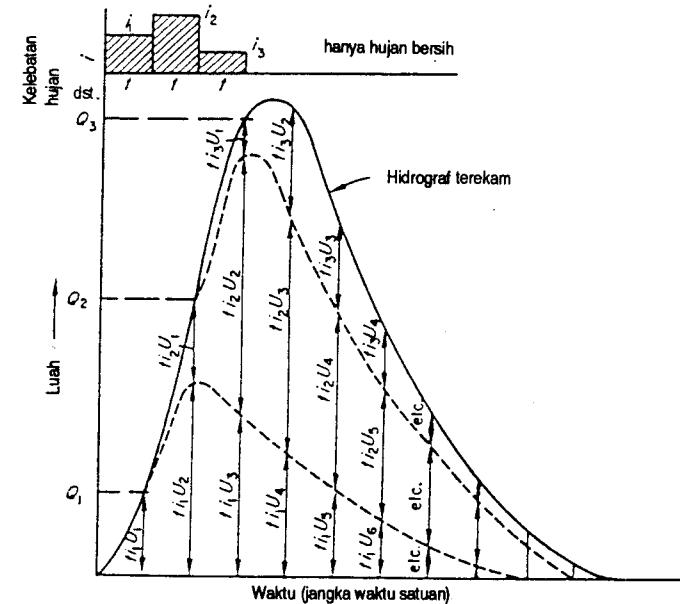
bagi hidrograf satuan rata-ratanya yang kemudian digambarkan bagannya pada bentuk nilai tengah (median) baik pada tungkai naik maupun tungkai turun, sehingga luas seluruhnya yang di bawah lengkung menjadi sama dengan limpasan 1 cm.

7.9 Hidrograf satuan dari badai rumit atau badai masa-ganda

Pendekatan yang garis besarnya disajikan pada pasal 7.8 adalah sederhana dan langsung. Meskipun demikian hal itu mengandaikan bahwa rekamannya mengandung sejumlah badai yang berdiri sendiri-sendiri dengan kelebatan seragam, dan juga hidrograf alami yang bersesuaian. Yang sering, justru bukan demikian. Maka diperlukan adanya cara untuk menurunkan hidrograf satuan dari badai yang lebih rumit. Untuk itu digunakan hujan dengan berbagai kelebatan dengan hidrograf limpasan yang terdiri dari beberapa hidrograf badai terpisah-pisah yang disuperposisikan.

Untuk menurunkan hidrograf satuan dari data yang demikian itu memakan lebih banyak tenaga daripada untuk badai yang sederhana. Tetapi untuk itu tersedia berbagai cara, dan di bawah ini akan dibicarakan dua di antaranya.

Yang pertama dibicarakan oleh Linsley drr. [4]. Cara ini memerlukan penulisan dan penyelesaian secara berturut-turut sederet persamaan untuk setiap ordinat hidrograf yang rumit itu. Aliran dasarnya diandaikan telah dipisahkan sebelumnya. Proses itu dapat digambarkan dengan mengacu kepada gambar 7.17.



Gambar 7.17 Menurunkan hidrograf satuan dari suatu hidrograf badai masa-ganda

Waktu hujan yang pertama yang jujuh dan kelebatannya t dan i_1 , menimbulkan limpasan seperti tergambar dengan hidrograf berdasarkan hipotesis yang dibatasi oleh garis terputus-putus yang bawah. Setiap ordinat hidrograf ini adalah t_i kali ordinat satuan U_1, U_2, \dots, U_n . Begitu juga, hujan yang kedua dan ketiga dengan kelebatan i_2 dan i_3 , masing-masing menghasilkan limpasan tambahan yang ordinatnya t_i dan t_i , yang merupakan perkalian hidrograf satuan t jam yang tergeser sewajarnya mengikuti waktu. Jika hidrograf satuan yang terdiri dari banyak bagian itu sekarang ditentukan oleh ordinat pada selang

sama yang sesuai, maka ordinat pertama hidrograf satuan itu, U_1 , diperoleh dari $Q_1 = t_i U_1$, dengan Q_1 adalah limpasan yang teramat. Dengan demikian U_1 dapat ditemukan. Selang tadi untuk mudahnya ditentukan sebagai perkalian bulat t jam, meskipun tidak harus. Untuk ordinat yang kedua, $Q_2 = t_i U_2 + t_i U_1$; dalam hal ini persamaan U_2 adalah satu-satunya yang tak diketahui.

Ordinat yang ketiga diperoleh dengan cara itu juga dari $Q_3 = t_i U_3 + t_i U_2 + t_i U_1$; dalam hal ini U_3 adalah satu-satunya yang tak diketahui. Dengan meneruskan cara ini, ordinat hidrograf satuan t jam yang secara berturut-turut dapat ditentukan.

Dalam contoh di atas tadi, semua waktu hujan, meskipun kelebatannya berbeda-beda, diandaikan berjuluh t jam. Ini merupakan syarat untuk menerapkan cara ini, karena jika tidak, peubah yang lain U'_1, U'_2 , dst., yaitu ordinat pada hidrograf satuan t jam harus dimasukkan. Peubah itu adalah ordinat hidrograf satuan t' jam.

Cara itu tampaknya memang mudah, karena setiap ordinat U bergantung pada ordinat yang sebelumnya, dan juga pada andaian mengenai kelebatan dan jujuh curahan hujan dan aliran dasar yang diterima lewat penurunan. Tetapi galat akan berlonggok dan mungkin diperlukan beberapa kali usaha dan memulai lagi untuk menemukan hidrograf satuan yang cukup wajar.

Cara yang kedua merupakan hasil usaha Collins [5] dan yang paling sederhana di antara cara berlelar (iteratif) yang pernah dianjurkan. Untuk memberi gambaran mengenai penggunaannya, akan diturunkan sebuah hidrograf satuan dari data curah hujan dan luahan alami bagi DAS Rother di Woodhouse Mill, York, Inggris.

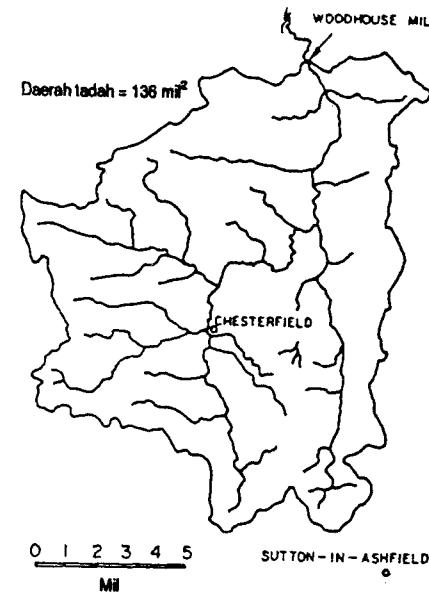
Cara Collins untuk menentukan hidrograf satuan untuk badai masa-ganda.
Cara ini pada awalnya memilih sekumpulan koefisien, atau sebaran persentasi hidrograf satuan (pasal 7.7). Grafik sebaran ini kemudian diterapkan pada waktu hujan yang berbeda-beda, kecuali hujan yang terbesar, dan luahan yang berhasil dikurangkan dari luahan yang sebenarnya untuk memperoleh sekumpulan ‘sisa’. Sisa itu harus menggambarkan luahan hidrograf satuan yang diterapkan untuk hujan yang terbesar. Jika kesesuaian buruk, koefisien awalnya diubah, dan dibuat usaha yang lain. Dengan sederet hampiran yang bersifat menumpu (konvergen), grafik sisa itu dibuat agar sesuai dengan grafik sebaran yang diandaikan.

Tatacara itu diuraikan di bawah ini, selangkah demi selangkah, dan diacukan kepada Sungai Rother di Woodhouse Mill. Untuk itu diturunkan hidrograf

satuan dari badai pada 14/15 Mai 1967. Tahap A adalah tatacara baku, dan tahap B adalah cara pendekatan Collins.

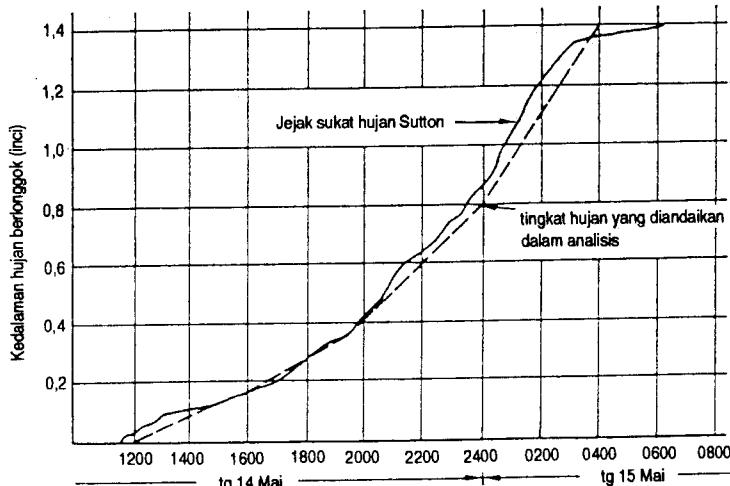
Tahap A: mengumpulkan dan menyiapkan data

- 1 Kumpulkanlah semua data curah hujan yang ada bagi DAS yang akan dipelajari dan waktu badai, termasuk amatan harian, data sukat hujan, dan peta cuaca sinopsis, jika ada.
- 2 Turunkan lengkung rerata banyaknya hujan untuk DAS itu, untuk jangka waktu hujan yang menghasilkan hidrograf yang sedang dipelajari itu. Pilahlah untuk sementara hujan itu menjadi waktu seragam yang terpisah-pisah.

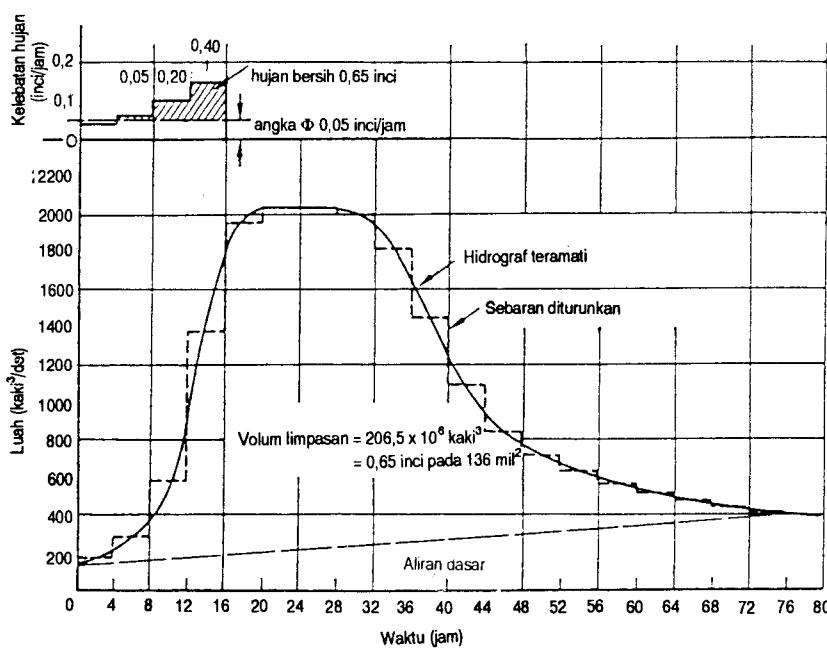


Gambar 7.18 DAS Rother di Woodhouse Mill

DAS Rother di Woodhouse Mill, Yorkshire terlukis pada gambar 7.18. Data curah hujan yang terus-menerus (lengkung massa) di Sutton-in-Ashfield untuk jangka waktu badai itu tertera pada gambar 7.19. Garis terputus-putus yang ditindihkan pada lengkung massa menggambarkan kelebatan idaman yang digunakan dan dirajah pada jangka waktu yang



Gambar 7.19 Badai hujan tanggal 14/15 Mai 1967 di Sutton-in-Ashfield



Gambar 7.20 Hidrograf limpasan badai dan grafik hujan untuk S. Rother di Woodhouse Mill, Yorkshire, 14–17 Mai 1967

cocok pada gambar 7.20. Kedalaman curah hujan jumlah diukur harian di Chesterfield di tengah-tengah DAS. Jumlah yang terrekam di Chesterfield pada 15 Mai, pukul 09.00 pagi adalah 1,42 inci (36,1 mm) dan 1,43 inci (36,3 mm) di Sutton. Curahan itu pada perenggan, tersebar luas, dan nisbi seragam; maka curahan yang terrekam di Sutton dianggap meliputi seluruh DAS.

- 3 Rajalah hidrograf dan aluran jumlahnya, dan pisahkan aliran dasarnya (pasal 7.3).

Pada hidrograf untuk Sungai Rother di Woodhouse Mill (gambar 7.20), kedudukan garis pemisah aliran dasar itu sangatlah tidak pasti; maka akhir limpasan permukaannya (titik N) dibuat sekitar 2 hari setelah puncaknya.

- 4 Putuskan mengenai jangka waktu satuan. Sebagai pedoman umum, ini hendaknya tidak lebih besar daripada seperempat waktu dari awal limpasan hingga puncaknya. Perhatikan pula akan grafik hujan sementara (dari 2), h. 189

Pilihan 4 jam untuk analisis ini memadai baik untuk hujan maupun limpasannya.

- 5 Perhatikan kekurangan kelengasan tanah DAS itu dan gunakan cara penunjuk atau cara f_{av} untuk menaksir kehilangan akibat badai bagi setiap waktu hujan. Jika angka curahan hujan untuk setiap DAS disimpan, gunakan data itu. Buatlah taksiran mengenai kehilangan tingkat awal dan yang berikutnya. Bandingkan hujan bersih dengan cara ini dengan limpasan permukaannya yang dinyatakan sebagai kedalaman pada DAS. Jika hasil kedua-duanya tidak cocok, salah satu di antaranya harus disesuaikan. *DAS Rother dalam keadaan basah, tetapi tidak jenuh, dari hujan gerimis hari pertama sebelum hujan badai tadi. Masuk akal untuk mengandaikan, bahwa hujan dari waktu hujan pertama hilang sama sekali untuk mengimbangi kehilangan kelengasan tanah. Setelah itu, angka penunjuk tadi dipilih untuk mengimbangi hujan bersih dengan limpasan permukaan.*

Tahap B: menggunakan data yang ada untuk menurunkan hidrograf satuan

- 6 Tabelkan data yang ada hubungannya dalam lajur (1)–(9) pada tabel yang serupa dengan tabel 7.4 dan berikan lajur untuk banyaknya waktu satuan dalam hidrograf satuan di bawah ‘Koefisien sebaran’.

Lajur pada tabel 7.4 di bawah ‘Koefisien sebaran’ berjumlah 16. Ini adalah banyaknya waktu satuan dari awal waktu hujan terakhir hingga akhir limpasan permukaan.

Tabel 7.4 Penurunan hidrograf satuan dari badai masa-ganda

- 7 Tentukan koefisien sebaran hidrograf satuan (yang menggambarkan persentasi limpasan jumlah setiap waktu satuan) dan susun dalam lajur yang cocok.

8 Tentukan luahannya, yang dengan mengalir secara tetap untuk satu waktu satuan kiranya akan tepat sama dengan hujan bersih 1 inci pada DAS.

Angka itu untuk ihwal ini ditemukan sebagai

$$\frac{136 \times 27,9 \times 10^6}{12 \times 4 \times 3600} = 21960 \text{ kaki}^3/\text{detik}$$

9 Hujan bersih yang pertama dikalikan dengan luahan ini dan hasilkalinya disebarluaskan dalam persenan pada seluruh lajur koefisien sebaran yang pada gilirannya dikalikan dengan setiap koefisien persentasi. Angka yang berbagai macam itu dimasukkan ke dalam lajur secara sudut-menyudut.

Dalam hal ini $0,05 \times 21960 = 1098$, jadi dalam lajur pertama $0,05 \times 1098 = 55$, dst. Perhatikan, bahwa 55 dimasukkan berhadapan dengan hujan yang bersesuaian dan tidak pada baris yang paling atas, yang diabaikan.

10 Tatacara pada 9, di atas, diulang bagi semua hujan bersih kecuali yang terbesar, dan untuk itu dimasukkan garis sengkang.

Adalah kebetulan bahwa hujan terbesar terdapat pada akhir ihwal yang ini.

11 Luahan yang ragamnya bermacam-macam itu sekarang dijumlahkan secara mendatar dan dimasukkan dalam lajur .

12 Jumlahan luahan lajur itu sekarang dikurangkan dari lajur (9) dan sisanya dimasukkan ke dalam lajur ‘Sisa’. Semua sisa itu kemudian dijadikan persenan grafik sebaran satuan dengan membaginya dengan luahan pada (8) (lihat halaman ...) dikalikan dengan hujan yang terbesar, dan setelah itu dikalikan dengan 100. Angka jumlah lajur persenan itu haruslah 100. Persenan yang tidak dapat terpengaruh oleh curah hujan yang terbesar ditempatkan pada kurung dan disebarluaskan lagi pada koefisien yang lain sehingga jumlahnya, yang 100 persen, tetap sama. Semua persenan itu menggambarkan sebaran yang kiranya akan perlu untuk hujan yang terbesar untuk mengimbangi Q bersih pada lajur (9). Jika persenan itu sama dengan koefisien yang diandaikan, maka grafik sebaran satuan telah ditentukan.

Maka sisa 1090 dari jangka waktu 6, misalnya, diubah menjadi

$$\frac{1090}{0,40 \times 21960} \times 100 = 12,5 \text{ pers.}$$

Angka jumlah persenan itu mencapai 100,4 karena pembulatan. Angka yang ditempatkan dalam kurung belum disebarluaskan lagi karena percobaan berikutnya memerlukan perubahan besar pada setiap ihwal.

- 13 Jika selisih antara koefisien percobaan dan koefisien sesuaian (setelah disebarluaskan kembali) terlalu besar, maka perlu diambil sekumpulan angka percobaan yang baru lagi dan langkah 9-12 diulang lagi hingga selisih itu menjadi cukup kecil sampai dapat diabaikan (katakan saja persen). Rata-rata terbobot dari percobaan sebelumnya dan koefisien sesuaian yang berhasil harus digunakan, sebagai berikut.

Jika P = jumlah sisa

Q = jumlah luahan semua waktu, ketika curah hujan terbesar akan memberikan sahamnya

C_1 = koefisien usaha

C_2 = koefisien yang dihitung dan yang disesuaikan

C_3 = koefisien usaha baru yang diusulkan,

maka

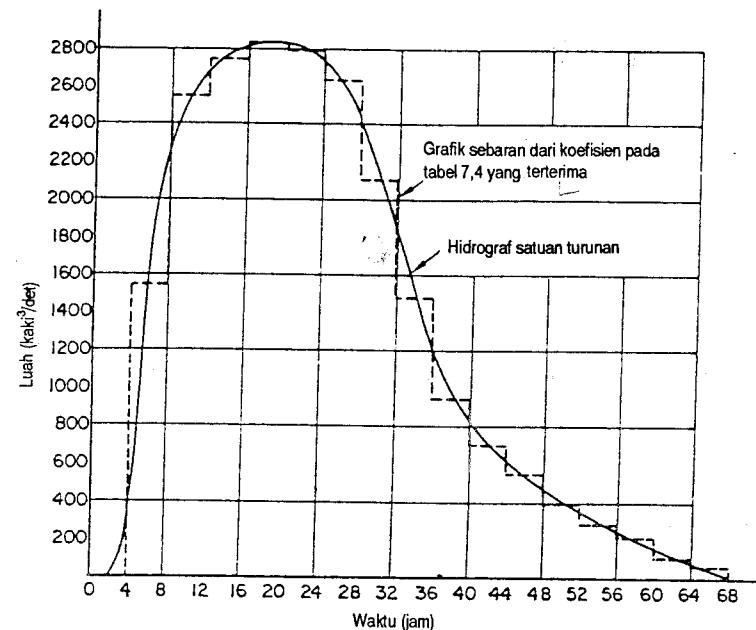
$$C_3 = \frac{QC_1 + PC_2}{Q + P}$$

Jika digunakan jalan lain, pembobotan itu sering dilakukan, untuk mudahnya, sebanding dengan kedalaman hujan jumlahan, dan koefisien usahanya memiliki bobongan kedalaman hujan yang digunakan sebenarnya, dan koefisien yang dihitung adalah curah hujan yang terbesar.

- 14 Akan selalu bijaksana untuk merajah grafik sebarannya sebelum menentukan koefisien yang dapat diterima. Mungkin akan ditemukan, bahwa penyesuaian kecil-kecil dapat menolong kita memperoleh lengkung yang licin untuk hidrograf satuan yang kita terima itu.

Dalam ihwal yang dilukiskan ini dibuat tiga usaha dengan perhitungan dan penyesuaian akhir (tanpa penghitungan kembali) yang dibuat setelah grafik sebarannya dirajah, dan setelah itu hidrograf satuan yang terlukis pada gambar 7.21 diturunkan.

Cara ini terutama berguna bila curah hujan terbesarnya sangat besar dibandingkan dengan yang lainnya, karena kemudian dengan cepat terjadi penumpuan (konvergensi) semua koefisien. Inilah yang terjadi pada contoh yang tergambar tadi. Kita tidak boleh terlalu mengandalkan pada hidrograf satuan yang diturunkan dengan jalan ini, sampai angka yang diperoleh itu digunakan dalam praktek dan/atau diturunkan dari sederet badai yang



Gambar 7.21 Hidrograf satuan 4 jam untuk S. Rother di Woodhouse Mill yang diturunkan dari badai masa-ganda seperti terlukis pada gambar 7.19

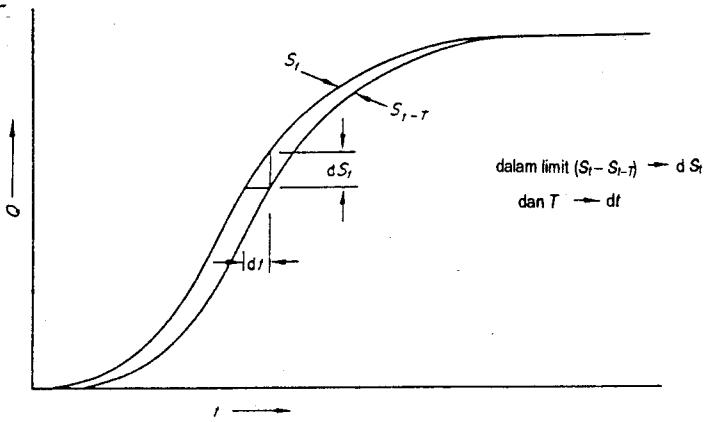
berbeda-beda, karena angka tingkat kehilangan yang dipilih ada pengaruhnya yang menentukan pada hidrograf satuan yang berhasil.

7.10 Hidrograf satuan sesaat

Lanjutan teori hidrograf satuan adalah anggitan (konsep) hidrograf satuan sesaat atau HSS. HSS adalah hidrograf satuan limpasan dari hasil penggunaan sesaat hujan sangkil pada suatu DAS.

Mengacu ke gambar 7.13 pasal 7.6, lengkung-S tadi dilihat sebagai cara sederhana menurunkan hidrograf satuan dari waktu T jam dari hidrograf satuan sebarang waktu t yang lain, dengan menggambar dua lengkung-S t jam yang masing-masing terpisah $T(h)$. Ini dinyatakan dengan persamaan

$$U(T,t) = \frac{t}{T} (S_t - S_{t-T}) \quad (7.2)$$



Gambar 7.22 Hidrograf satuan sesaat sebagai turunan lengkung-S

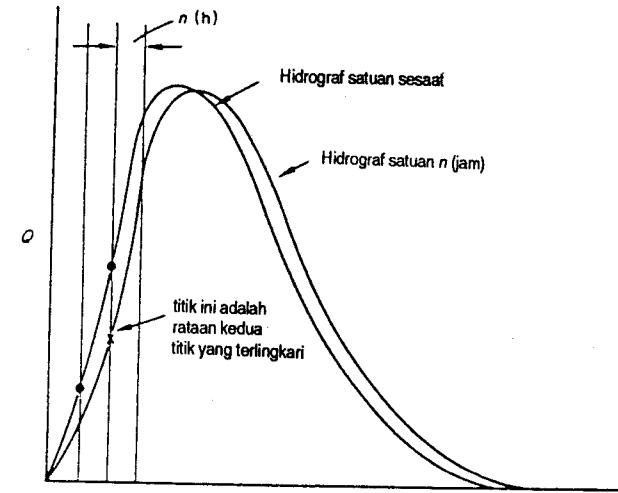
Dalam hal ini, $U(T, t)$ menggambarkan ordinat hidrograf satuan T jam yang diturunkan dari ordinat hidrograf satuan t jam. Sekarang, karena T , berangusur-angsur susut menuju ke nol, mendekati dt , sisi bagian kanan persamaan 7.2 mendekati turunan lengkung-S, sebagaimana dapat dilihat pada gambar 7.22. Dalam bentuk persamaan, ini adalah

$$U(0, t) = \frac{d(S_t)}{dt}$$

yaitu, ordinat HSS pada sebarang waktu t dinyatakan dengan dS_t/dt pada saat t . HSS merupakan gambaran khas tanggapan sebuah DAS tertentu terhadap hujan, tak bergantung pada jujuhnya, sama halnya dengan hidrograf satuan adalah tanggapannya terhadap hujan yang tertentu jujuhnya. Karena tak bergantung waktu, maka HSS adalah ungkapan grafik rangkunan (integrasi) semua parameter DAS mengenai panjang, bentuk, keadaan lereng dst yang menguasai tanggapan seperti itu.

Perubahan sebuah HSS ke hidrograf satuan dengan waktu berhingga adalah sederhana. Ordinat sebuah hidrograf satuan n jam pada saat t adalah ordinat rerata HSS untuk n jam sebelum t . Dari gambar 7.23 dapat dilihat bahwa HSS itu dibagi menjadi selang waktu n jam, dan rerata ordinat pada awal dan akhir setiap selang dirajah pada akhir selang tersebut untuk memperoleh hidrograf satuan n jam itu.

HSS dapat digunakan untuk menurunkan hidrograf satuan dengan pelacakan banjir seperti dibicarakan pada pasal 8.6.



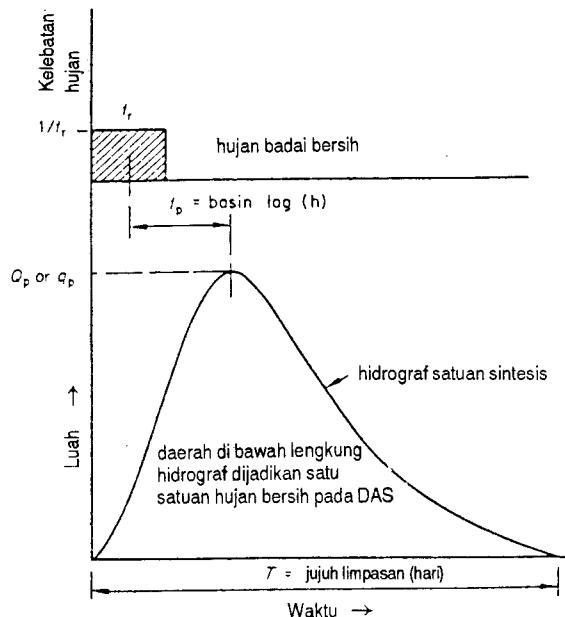
Gambar 7.23 Hidrograf satuan n (jam) yang diturunkan dari HSS

7.11 Hidrograf satuan sintesis

Dalam beberapa pasal di depan selalu diandaikan bahwa ada sementara data rekaman yang tersedia untuk menurunkan hidrograf satuan. Tetapi ada banyak DAS yang tidak memiliki data limpasannya sama sekali, padahal untuk itu mungkin saja diperlukan hidrograf satuannya. Dalam hal seperti itu, orang dapat membuat (mensitesikan) atas dasar pengalaman masa lalu di daerah lain dan kemudian hasilnya digunakan sebagai hampiran pertama pada DAS yang tak berdata. Gawai seperti itu disebut *hidrograf satuan sintesis*.

Pendekatan yang mula-mula berasal dari Snyder [6] yang memilih ketiga paramater berupa *lebar dasar hidrograf*, *luahan puncak*, dan *pancal DAS* akan cukup untuk memberi batasan bagi hidrograf satuan tersebut. Hal itu terlukis pada gambar 7.24.

Snyder menganggap ciri DAS yang mungkin berpengaruh pada bentuk hidrograf satuan adalah luas DAS, bentuk cekungan, rupabumi, lereng alur, kerapatan sungai, dan simpanan alur. Ia meniadakan semua parameter itu kecuali yang dua pertama dengan memasukkannya ke dalam koefisien C_1 . Ia



Gambar 7.24 Parameter hidrograf satuan sintesis

menghadapi ukuran dan bentuk DAS dengan mengukur panjangnya alur sungai induk dan ia mengusulkan bahwa

$$t_p = C_t (L_{ca} L)^{0,3}$$

Dalam hal ini,

- t_p = puncak cekungan dalam jam (yaitu, waktu antara pusat massa hujan satuan dengan jujuh t_r jam dan aliran puncak limpasan)
- L_{ca} = jarak antara tempat menyukat dengan pusat massa DAS, yang diukur sepanjang alur sungai induknya sampai ke titik yang terdekat, dalam mil
- L = jarak antara tempat penyukatan ke batas DAS, diukur sepanjang alur sungai induknya, dalam mil
- C_t = koefisien yang bergantung pada satuan dan ciri DAS dan berkisar antara 1,8 dan 2,2, untuk DAS di Pegunungan Appalachia yang diselidikinya.

Persamaan untuk aliran puncak (untuk setiap mil persegi luasan) grafik satuan t_r dinyatakannya sebagai

$$q_p = C_p \cdot \frac{640A}{t_p} \quad (7.3)$$

Dalam hal ini q_p dinyatakan dalam kaki kubik setiap detik, dan C_p adalah koefisien yang bergantung pada satuan dan ciri DAS yang berkisar antara 0,56 dan 0,69 bagi DAS Appalachia dan umumnya mendekati nilai terbesarnya ketika C_t mendekati nilai terkecilnya, dan demikian pula sebaliknya.

Maka dari itu, aliran puncaknya bagi hidrograf satuan itu adalah

$$Q_p = C_p \cdot \frac{640A}{t_p}$$

Dalam hal ini A = luas DAS dalam mil persegi.

Lamanya limpasan permukaan, atau panjangnya alas hidrograf satuan, T dinyatakan oleh Snyder dengan ungkapan empiris yang berikut

$$T = 3 + 3 \left(\frac{t_p}{24} \right)$$

Di sini T adalah dalam hari dan t_p dalam jam. Ungkapan ini memberikan panjang alas terpendek sebesar 3 hari bagi daerah yang kecil-kecil; disebabkan oleh simpanan alir, maka jangka waktu itu jauh berlebih.

Menurut Snyder hal ini disebabkan oleh ‘aliran-badi bawah permukaan’; Hursh [7] memberi batasan untuk itu sebagai ‘bagian dari aliran badi yang meresap ke dalam tanah tetapi menjauh dari daerah ybs melalui berbagai lapisan teratas tanah dengan tingkat yang melebihi rembasan airtanah yang sebagaimana lazimnya’. Inilah yang ditunjukkan dalam pustaka akhir-akhir ini sebagai *aliran antarlapisan*; untuk kebanyakan keperluan praktis aliran itu dianggap sebagai limpasan permukaan.

t_p , yaitu lamanya hujan satuan, dalam penelitian tersebut dianggap sama dengan $t_r/5,5$, karena dibutuhkannya untuk memilih sebuah buku saja bagi semua DAS-nya untuk menurunkan rumusnya. Nilai yang khusus ini dipilih untuk membuat waktu satuan sama dengan nilai terkecil; di bawah angka itu nilai tadi pengaruhnya kecil saja atau tidak ada pengaruhnya sama sekali pada puncak DAS atau luahan puncak hidrograf satuan. Jika panjang sebenarnya badi ybs tidak sama dengan t_p , tetapi t_R , persamaan 7.3 menjadi

$$q_{pR} = C_p \cdot \frac{640}{t_p + (t_R - t_r)/4}$$

Dalam hal ini q_{pR} = luahan puncak (setiap mil persegi) hidrograf satuan t_R , yang memungkinkan susutnya sebagaimana umumnya teramat pada aliran puncak hidrograf satuan dengan jangka waktu hujan yang lebih panjang. Snyder setelah

itu [8] mengusulkan sebuah ungkapan yang memungkinkan adanya keragaman dalam pancal DAS dengan jalan meragamkan lamanya curah hujan sangkil

$$\begin{aligned} t_{pR} &= t_p + (t_R - t_p)/4 \\ \text{dengan } t_{pR} &= \text{pancal DAS untuk badai yang lamanya } t_R \end{aligned}$$

Setelah itu, Linsley menyajikan data [9] yang didasarkan pada hasil penelitian sejumlah DAS Kalifornia dan menyarankan adanya ubahan pada rumus Snyder dan memberi nilai pada berbagai koefisiennya sebagai berikut.

Pancal DAS: ia memasukkan sebuah faktor baru, t_{p0} – yaitu pancal DAS sebuah badai sesaat- dan menggunakan untuk menurunkan t_{pR} yang mempunyai makna sama dengan sebelumnya.

$$\begin{aligned} t_{p0} &= C_t(L_{ca}L)^{0,3} \quad \text{dengan } C_t (\text{rerata}) = 0,5 \\ t_{pR} &= t_{p0} + (C_8 - 0,5)t_R \end{aligned}$$

dengan C_8 (rerata) = 0,85.

Aliran puncak hidrograf satuan (setiap mil persegi): $q_{pR} = C_p \cdot 640/t_{pR}$, dengan C_p berkisar antara 0,35 dan 0,50, dan $Q_{pR} = q_{pR}A$

Dasar waktu untuk hidrograf satuan: $T = 3 + (3t_{pR}/24)$ hari

Derajat pencaran (divergensi) koefisiennya merupakan petunjuk betapa pentingnya untuk memperoleh beberapa data yang sebenarnya mengenai pancal pada DAS yang tak tersukat. Dengan demikian dimungkinkan untuk menggunakan nilai C_t dengan kepastian yang masuk akal.

Kemajuan lebih lanjut dalam hal pokok ini dibuat oleh Taylor dan Schwarz [10] dari hasil penelitian pada 20 DAS dengan luas antara 20 dan 1600 mil persegi, di beberapa negara bagian Amerika Serikat yang berbatasan dengan Samudera Atlantik. Mereka menggunakan parameter L, L_{ca} seperti sebelumnya dan juga memasukkan lereng aliran air utama dengan menentukan S_{st} sebagai lereng alur seragam yang mempunyai panjang yang sama dengan jalan air yang terpanjang dan waktu tempuh yang sama. Persamaan yang diturunkan adalah sbb.

$$\text{Pancal DAS: } t_{pR} = C'e^{m't_R}$$

dengan t_{pR} = pancal dalam jam dari pusat massa hujan bersih ke puncak hidrograf

t_R = waktu dalam jam dari awal hingga akhir hujan bersih

e = 2,7183

m' = laju perubahan pancal dengan lamanya badai

C' = pancal hidrograf satuan sesaat

m' dan C' diturunkan dari persamaan yang berikut

$$m' = 0,212/(LL_{ca})^{0,36}$$

$$C' = 0,6/\sqrt{(S_{st})}$$

di sini L dan L_{ca} memiliki batasan yang sama seperti sebelumnya dan

$$S_{st} = \left[\frac{n}{(1/S_1^2 + 1/S_2^2 + \dots + 1/S_n^2)} \right]^2$$

di sini n = koefisien kekasapan Manning untuk jalan air alami itu

S_1, S_2 , dst. = lereng masing-masing ruas, dengan panjang sama; untuk mudahnya, jalan air itu terbagi dalam sejumlah ruas yang sama panjangnya.

Luah puncak (setiap mil persegi) hidrograf satuan: $q_{pR} = C''e^{m''t_R}$

dengan

$$C'' = 382(LL_{ca})^{-0,36}$$

$$m'' = 0,121S_{st}^{0,142} - 0,05$$

Lebar dasar hidrograf satuan: $T = 5(t_{pR} + t_R/2)$ jam

Para penulis itu dalam makalahnya memberikan nomogram untuk penyelesaian semua persamaan itu dan membuat sejumlah pengamatan mengenai penggunaan cara mereka. Di dalamnya termasuk saran bahwa anak sungai yang besar-besar hendaknya ditangani sendiri-sendiri, dan bahwa persamaan ybs hendaknya terbatas pada hasil badai yang sedang-sedang saja dan yang penting-penting, dengan sebaran yang seragam pada daerah yang mirip dengan yang dipakai untuk menurunkan persamaan tersebut. Persamaan itu diberikan di sini karena merupakan tambahan yang berguna pada pustaka mengenai sintesis hidrograf satuan.

Hidrograf satuan juga dapat disintesiskan dengan cara pelacakan aliran sungai dan pasal 8.6 membahas mengenai kiat seperti itu. Pasal itu ditempatkan dalam bab 8 karena pengetahuan tatacara pelacakan merupakan hal pokok untuk memahaminya.

7.12 Hidrograf satuan sintesis dari ciri DAS dengan cara FSR

FSR menyediakan suatu cara untuk mensintesiskan hidrograf satuan 1 jam bagi DAS yang tak tersukat dan untuk memilih hujan ripta (rencana) yang cocok untuk digunakan padanya [1].

Hidrograf satuan itu didasarkan pada tiga parameter yang serupa dengan yang digunakan oleh para peneliti sebelumnya: waktu hingga puncak, luah puncak dan lebar dasar hidrograf. Tetapi batasannya tidak sama benar.

Waktu hingga puncak T_p (jam) adalah waktu hingga puncak hidrograf-satuan 1 jam yang diukur dari sejak *dimulainya limpasan tanggapan*, dan dinyatakan dengan

$$T_p = 46,6(\text{MSL})^{0,14}(\text{S1085})^{-0,38}(1+\text{URBAN})^{-1,99}(\text{RSMD})^{-0,4} \quad (7.4)$$

Dalam hal ini

- MSL adalah panjang sungai utama (km), yang diukur dari peta 1 : 25.000 (tatacara rinci untuk memperoleh MSL diberikan pada acuan 1 (1.4.2.2.)).
- S1085 adalah lereng yang diperoleh dengan mengenali dua titik, masing-masing pada jarak 10 persen dan 85 persen daripada panjang sungai utama itu dari mulut DAS seperti yang terlukis pada peta 1 : 25.000 dan menentukan selisih ketinggiannya dan panjang sungai di antaranya. Lereng itu dinyatakan dalam m/km.
- URBAN adalah bagian DAS dalam perkembangan perkotaan.
- RSMD adalah curahan hujan M5 satu hari, dikurangi kekurangan kelengasan tanah rerata sangkil. Nilai RSMD untuk sebarang titik di Inggris Raya dan Irlandia dapat dibaca dari gambar 7.25, 7.26 dan 7.27, yang diterakan di sini dari acuan [11]. Nilai dapat juga dihitung dengan cara yang telah diuraikan dalam contoh 7.2.

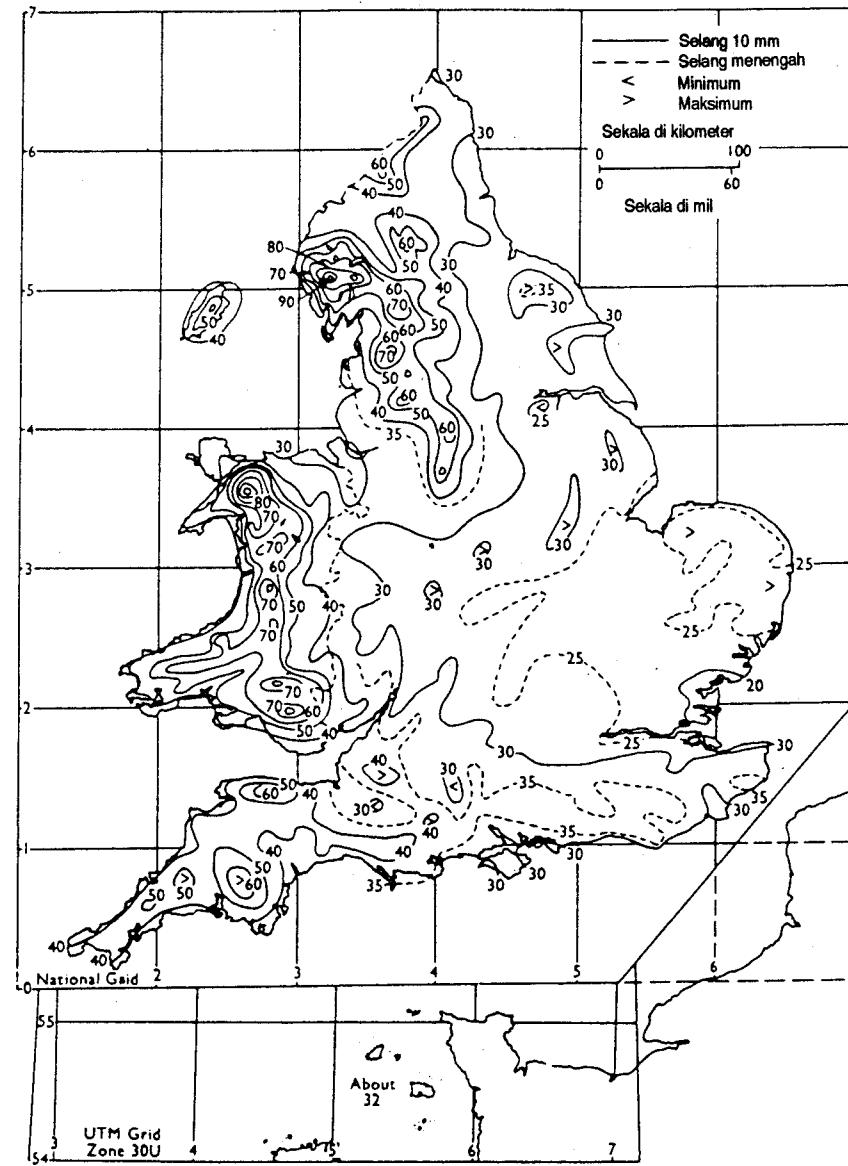
Jika ada rekaman hujan dan tanggapan limpasan, maka orang dapat membuat taksiran yang lebih handal dari

$$T_p = 0,9 \text{ LAG}$$

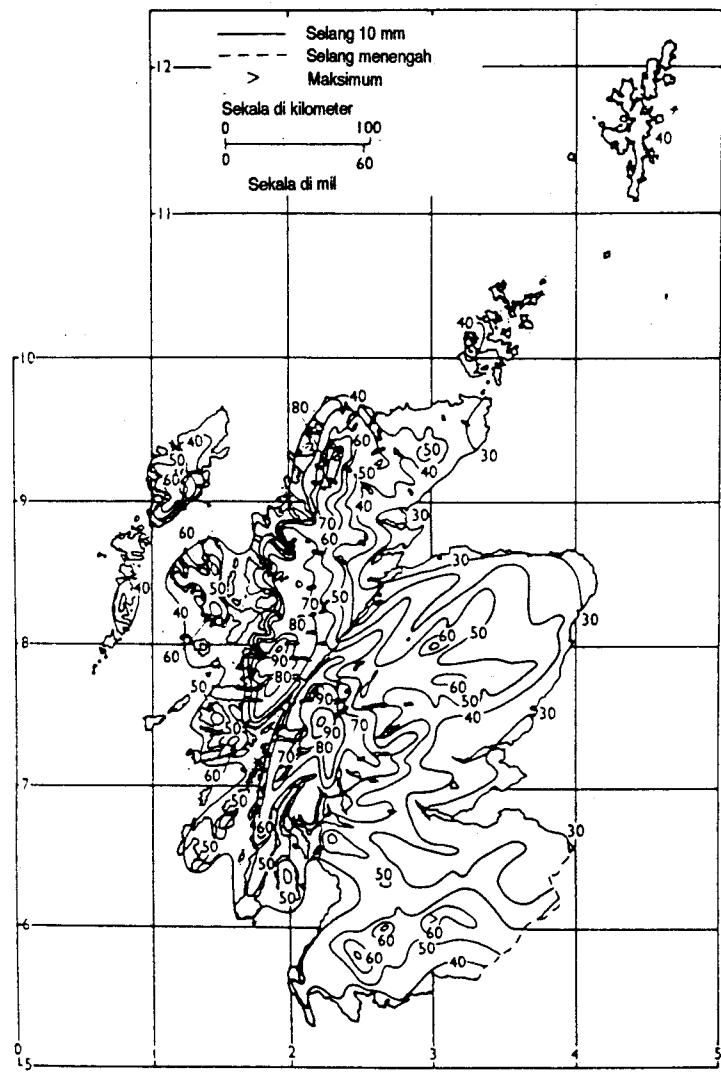
Di sini LAG adalah waktu (jam) dari pusat massa penampang hujan ke puncak limpasannya, atau ke ‘pusat massa puncak’, jika penampang yang ada lebih dari sebuah.

Puncak hidrograf satuan Q_p dalam m^3/det setiap 100 km^2 ditaksir dari

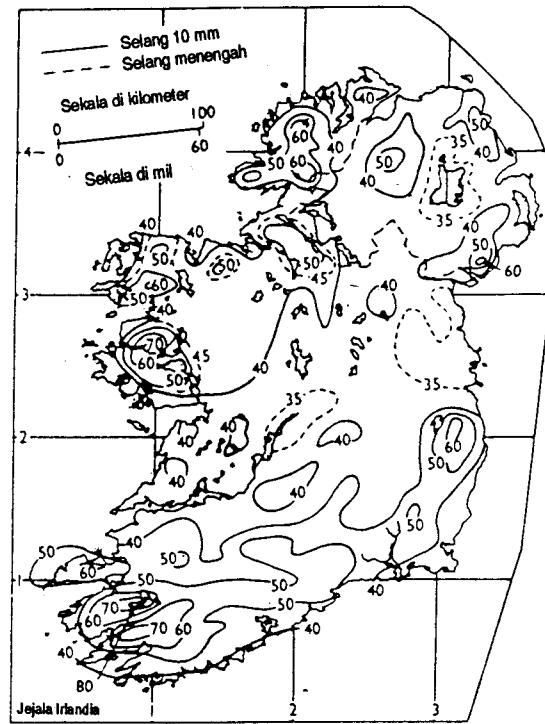
$$Q_p = 220/T_p \text{ dan dasar waktunya } TB = 2,52T_p$$



Gambar 7.25 RSMD (mm) untuk daerah Inggris dan Wales



Gambar 7.26 RSMD (mm) untuk Skotlandia



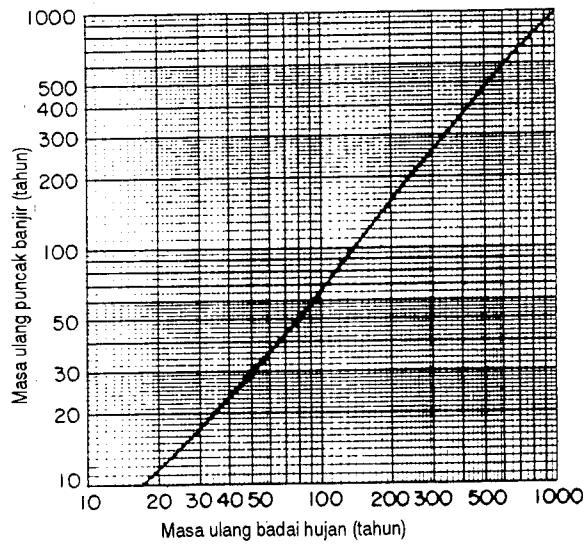
Gambar 7.27 RSMD (mm) untuk Irlandia

Dengan ketiga parameter T_p , Q_p , dan TB ini, mungkin kita menggambarkan hidrograf satuan segitiga. Ini adalah hidrograf satuan 1 jam; lihatlah yang terlukis pada gambar 7.30.

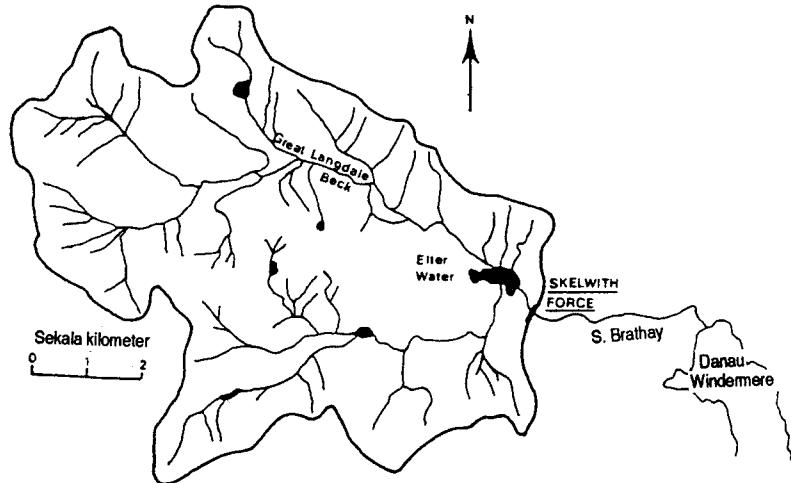
Jumlah (lamanya) D (jam) badi ripta bergantung pada T_p dan pada curah hujan rerata tahunan (CHRT), dan dinyatakan dengan

$$D = (1 + \text{CHRT}/1000)T_p \quad (7.5)$$

Kelebatan curah hujan yang akan dipilih bergantung pada masa ulang banjir ripta. Masa ulang itu adalah waktu yang, reratanya, berlalu di antara dua kejadian yang sama atau melebihi paras tertentu (lihat juga ayat 9.3.2); masa ulang banjir dan curah hujan penyebabnya tidak harus sama, karena ada faktor lain yang terlibat. Tetapi FSR itu memberikan hubungan untuk masa ulang badi yang diusulkan bagi timbulnya puncak banjir dengan masa ulang yang



Gambar 7.28 Masa ulang badai yang dianjurkan untuk menghasilkan puncak banjir dengan masa ulang yang diperlukan oleh cara meripta ini.



Gambar 2.29 DAS Brathay di Skelwith Force

diperlukan oleh cara meripta yang dibahas itu, yang kemudian merupakan pangkal untuk menurunkan gambar 7.28.

Setelah ditetapkan masa ulang yang diperlukan bagi curah hujan dengan jujuh D , maka curah hujan badai jumlahnya di atas DAS tertentu dapat diperoleh. Sebuah contoh akan menggambarkan rincian seluruh proses itu.

Contoh 7.2 Dengan pertolongan hidrograf-satuan sintesis, taksirlah puncak banjir dengan masa ulang 200 tahun untuk Sungai Brathay di Skelwith Force (gambar 7.29).

- 1 Berilah DAS itu batas pada peta 1:25.000 yang tersedia dan ukur luas daerahnya (AREA) dan panjang sungai utamanya (MSL):

$$\text{AREA} = 50,4 \text{ km}^2$$

$$\text{MSL} = 12,2 \text{ km}$$
- 2 Lereng alur (S1085) adalah lereng rerata dalam m/km antara dua titik pada 10 persen dan 85 persen panjang sungai utamanya diukur dari titik pengeluarannya. Karena ketinggian pada titik 85 persen = 137 m dan
ketinggian pada titik 10 persen = 58 m
maka
$$S1085 = 8,6 \text{ m/km}$$

- 3 Curah hujan tahunan rerata (CHRT) diperoleh dari rerata terbobotnya di seluruh DAS:
$$\text{CHRT} = 2500 \text{ mm}$$

- 4 Taksiran RSMD dapat dibuat dengan mengacu kepada gambar 7.25. Dengan cara lain, nilainya dapat dihitung dengan menemukan

curah hujan M5 2-hari (rerata untuk DAS)	= 135 mm
r (rerata untuk DAS)	= 15 persen

 jadi dengan menentukan (tabel 2.9)

$$\text{M5 24 jam} = 0,75 \times 135 = 101 \text{ mm}$$
 Dengan mengubah ini menjadi M5 1 hari (tabel 2.10)

$$101/1,11 = 91,2 \text{ mm}$$
 dan dengan mengetahui

ARF (tabel 2.8)	= 0,95
memberikan curah hujan DAS M5 1 hari	= 86,6 mm

 Akhirnya mengurangi ketunaan kelengasan tanah (gambar 4.8) (= 4mm) memberikan

$$\text{RSMD} = 82,6 \text{ mm}$$

atau dibulatkan

$$RSMD = 83 \text{ mm}$$

- 5 Tidak ada perkembangan perkotaan, jadi

$$URBAN = 0$$

- 6 $T_p Q_p$ dan TB sekarang dapat dihitung dari persamaan 7.4.

$$T_p = 46,6(12,2)^{0,14} (8,6)^{-0,38} (83)^{-0,4} = 4,99$$

Sehingga

$$T_p = 5,0$$

$$Q_p = 220/T_p/100 \text{ km}^2$$

$$= 44 \text{ m}^3/\text{det}/100 \text{ km}^2$$

$$= 22,2 \text{ m}^3/\text{det} \text{ untuk } 50,4 \text{ km}^2$$

$$T_B = 2,52T_p = 12,6$$

Sehingga

$$T_B = 13 \text{ jam.}$$

- 7 Selang data dasar $T = T_p/5$. Maka $T = 1$ jam.

- 8 Jujuh (lamanya) badai ripta sekarang dapat dihitung dari persamaan 7.5

$$\begin{aligned} D &= (1 + CHRT/1000)T_p \\ &= (1 + 2500/1000)5 \\ &= 17,5 \end{aligned}$$

Lebih serasi untuk membuat D kelipatan bilangan bulat gasal T .

Jadi

$$D = 17 \text{ jam.}$$

- 9 Sekarang kita perlu menentukan masa ulang badai yang dapat menghasilkan aliran puncak masa ulang yang cocok. Untuk aliran puncak 200 tahun, masa ulang yang disarankan diperoleh dari gambar 7.28: masa ulang badainya adalah 240 tahun.

- 10 Badai hujan yang lamanya 17 jam, yang memiliki masa ulang 240 tahun, dapat ditemukan dengan mula-mula melihat tabel 2.9, menggunakan nilai r yang ditemukan pada langkah 4 di atas, dan jujuh 17 jam.

$$r = 15 \text{ sehingga } M5 17 \text{ jam} / M5 2 \text{ hari} = 62 \text{ persen}$$

dan

$$62 \text{ persen dari } M5 2 \text{ hari} = 0,62 \times 135 = 83,7$$

Maka ambillah

$$M5 17 \text{ jam sebagai } 84 \text{ mm.}$$

- 11 Sekarang perlu untuk mengubah M5 17 jam menjadi M240 17 jam. Dari tabel 2.6, untuk $M5 = 84 \text{ mm}$, dengan interpolasi M240 diperlukan faktor pertambahan sebesar 1,71; maka

$$M240 17 \text{ jam} = 84 \times 1,71 = 144 \text{ mm.}$$

- 12 Ini adalah nilai curah hujan titik dan sekarang harus disusutkan ke rerata DAS dengan menggunakan ARF. Menginterpolasi

$$ARF (\text{untuk } 17 \text{ jam dan } 50 \text{ km}^2) = 0,95$$

Maka

$$\text{curah hujan } P = 137 \text{ mm.}$$

- 13 Nilai angka kebasahan DAS sekarang diperoleh dengan menggunakan CHRT = 2500 mm dalam gambar 4.9:

$$PKD = 127$$

- 14 Sekarang diperlukan angka limpasan dalam persen. Angka itu bergantung pada bagian DAS yang tertutup oleh berbagai kelas tanah. (Batasan SOIL akan ditemukan pada pasal 9.4.) Bagi daerah yang telah maju, seperti di Inggris, memang orang dapat memperoleh peta peluang limpasan. Bagi kita di Indonesia, yang tidak memiliki peta yang demikian itu, kita harus membuat penilaian berdasarkan tabel 4.2. Dalam hal yang kita bicarakan ini, DAS Brathay, seluruh DAS bergunung dan kelas tanahnya 5. Maka dari pasal 9.4 diperoleh

$$SOIL = 0,5$$

Limpasan dalam persen yang baku dihitung dari

$$SPR = 95,5 SOIL + 0,12 URBAN$$

Jadi

$$SPR = 47,7 \text{ persen}$$

dan persen limpasan (PR) yang cocok untuk kejadian rencana diperoleh dari

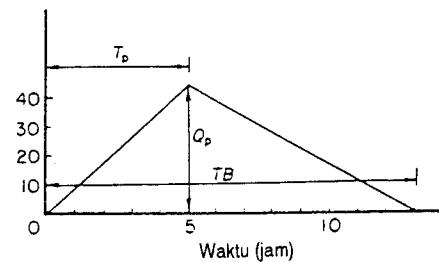
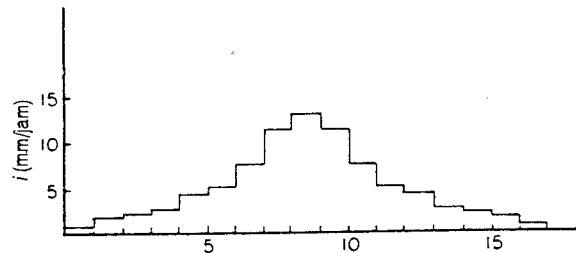
$$\begin{aligned} PR &= SPR + 0,22(PKD - 125) + 0,1(P - 10) \\ &= 4,77 + 0,22(127 - 125) + 0,1(127) \\ &= 60,8 \text{ persen} \end{aligned}$$

Maka dari itu, hujan bersih untuk digunakan pada hidrograf satuan sintesis itu = $137 \times 0,608 = 84$ mm.

- 15 Hujan bersih itu sekarang harus digunakan pada hidrograf satuan dengan 75 persen penampang badai musim dingin. Sebarannya harus berlangsung pada jangka waktu badai 17 jam, maka diperlukan grafik sebaran berjenjang pada 17 waktu badai satu-jam. Setiap selang panjangnya kira-kira 6 persen.

Persentasenya diperoleh dari gambar 2.17.

Lamanya (persen)	6	18	30	42	54	66	78	90	100
Hujan (persen)	16	43	61	73	83	89	94	98	100
Hujan tambahan (persen)	16	27	18	12	10	6	5	4	2
Hujan tambahan (mm)	13,4	22,7	15,1	10	8,4	5,0	4,2	3,4	1,6



Gambar 7.30 Hidrograf satuan sintesis 1 jam dan histogram untuk contoh 7.2

Jam	Hujan bersih (cm)	Jam dan sejak awal dan ordinat hidrograf satuan 1 jam x (luas/100) (m³/s)																	Jam (m/det)
1	0,08	0	0,4	0,7	1,1	1,4	1,8	1,6	1,3	1,1	0,9	0,7	0,4	0,2	0	0	0	0	
2	0,17	0	0,8	1,5	2,3	3,0	3,8	3,3	2,8	2,4	1,9	1,4	0,9	0,5	0	0	0	0	
3	0,21	0	0,9	1,9	2,8	3,7	4,7	4,1	3,5	2,9	2,3	1,8	1,2	0,6	0	0	0	0	
4	0,25	0	1,1	2,2	3,3	4,4	5,6	4,8	4,2	3,5	2,8	2,1	1,4	0,7	0,7	0	0	0	
5	0,42	0	1,9	3,7	5,6	7,5	9,3	8,2	7,0	5,8	4,7	3,5	2,3	1,2					
6	0,50	0	2,2	4,4	6,7	8,9	11,1	9,7	8,3	6,9	5,6	4,2	2,8						
7	0,75	0	3,3	6,7	10,0	13,3	16,6	14,6	12,5	10,4	8,3	6,2							
8	1,14	0	5,1	10,1	15,2	20,2	25,3	22,1	19,0	15,8	12,6								
9	1,34	0	6,0	11,9	17,8	23,8	29,7	26,0	22,3	18,6									
10	1,14	0	5,1	10,1	15,2	20,2	25,3	22,1	18,0										
11	0,75	0	3,3	6,7	10,0	13,3	16,6	14,6	12,5	10,4	8,3	6,2							
12	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
13	0,42	0	2,2	4,4	6,7	8,3	9,7	8,9	7,5	6,7	5,6	4,2	3,3	2,2	1,1	0,9	0,7		
14	0,25	0	1,9	3,7	6,7	9,7	12,5	10,4	8,3	6,7	5,6	4,2	3,3	2,2	1,1	0,9	0,7		
15	0,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
16	0,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
17	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	8,38	0	0,4	1,5	3,5	6,7	11,7	18,3	27,0	39,6	55,9	74,5	92,3	107,6	116,2	116,6	109,9	99,5	
																		119,9	
																		3,3	

Aliran puncak banjir dengan masa ulang 200-tahun ialah $120 \text{ m}^3/\text{detik}$ aliran dasar

*Setiap pertambahan adalah hujan 1 jam dikalikan pada gilirannya dengan setiap ordinat jam-jam hidrograf satuan, dan hasil kalinya berturut-turut digesekkan ke kanan. Aliran dasar dihitung dari persamaan 7.1.

$$\text{ANSF} = (3,26 \times 10^{-4}) (\text{PKD} - 125) + (7,4 \times 10^{-4}) \text{RSMD} + (3 \times 10^{-3})$$

Karena PKD = 127 dan RSMD = 83, maka

$$\begin{aligned} \text{ANSF} &= (621 \times 10^{-4}) + 0,003 \\ &= 0,0651 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2 \end{aligned}$$

Jadi

$$\text{aliran dasar} = 50,4 \times 0,0651 = 3,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Setiap pertambahan itu, kecuali yang pertama (puncaknya), menggambarkan jumlah dua waktu hujan 1 jam yang sama. Hujan itu sekarang disusun setengah di kanan-kiri garis tengah dan digunakan pada hidrograf-satuan sintesis.

Grafik sebaran hujan terjenjang terlukis pada gambar 7.30 dan penggunaannya pada hidrograf-satuan sintesis dipakai pada tabel 7.5.

7.13 Penggunaan hujan pada hidrograf satuan

7.13.1 Umum Pada penggunaan hidrograf satuan untuk prakiraan hidrologi, perlu jika hidrograf satuannya disesuaikan kepada rentang waktu hujan yang seragam. Jadi, hujan seragam terus-menerus t_1 jam harus digunakan pada hidrograf satuan t_1 jam, dan hujan t_2 jam pada hidrograf t_2 jam. Cara untuk mengalihkan hidrograf satuan t_1 ke yang t_2 telah diuraikan sebelumnya dalam bab ini. Tetapi yang satu-satunya disebut sampai sekarang, bagaimanakah memilih lama dan kelebatan hujan yang khas untuk digunakan terdapat pada pasal 7.12 dan contoh 7.2, yang menggunakan saran FSR.

Langkah untuk menggunakan hujan pada hidrograf-satuan dilakukan karena alasan yang berbeda-beda. Perencanaan dan pembangunan bermacam-macam projek mungkin melibatkan penaksiran banyak banjir yang berenaka rupa. Misalnya, seorang perencana bendungan ingin membuat pelimpahnya cukup besar sehingga keamanan bendungan itu tidak terancam selama umur bendungan itu. Pembangun bendungan itu ingin mengetahui risiko apakah yang mengancamnya dari berbagai banjir yang terjadi selama 3 atau 4 tahun ia membangun dalam alur sungai, sehingga ukuran bendungan elak dan terowongannya dapat dibuat sehemat mungkin. Pihak insinyur pengaman banjir ingin kepastian bahwa tanggulnya tidak akan terlimpahi lebih sering ketimbang kekerapan rencana tertentu yang dianggapnya ekonomis; atau bahwa tanggul tersebut bahkan tidak boleh terlimpahi sama sekali jika yang dipertaruhkan adalah jiwa orang. Pihak pengelola pelabuhan di muara atau tepian sungai ingin mengetahui kedalaman air yang dapat diandalkannya pada alur yang dapat dilayari sampai ke peluang akan adanya alur yang demikian itu, dst.

Dalam salah satu atau semua kejadian itu mungkin saja lebih baik untuk memilih hujan rencana dengan kekerapan dan kebesaran tertentu dan menggunakan pada hidrograf-satuan suatu DAS sebagai alat untuk memprakirakan aliran. Terutama hal ini berlaku karena di banyak bagian dunia tersedia catatan hujan yang menyangkut jangka waktu yang layak, meski data limpasannya hanya jarang atau berjangka waktu pendek saja.

Maka dari itu, catatan curah hujan tadi harus diperiksa dan dibuat analisis kekerapan terjadinya kedalaman curah hujan sepiantan (24 jam) yang khas. Menurut perbandingan, orang memang jarang membuat pengamatan curah hujan lebih sering ketimbang yang ini, meskipun jelas badai hujan yang sangat hebat sering berlangsung pada jangka waktu yang lebih pendek. Banyak hal yang bergantung pada ukuran DAS. Jika DAS itu sangat besar, maka kekerapan piantanan mungkin memadai untuk hujan rencana. Tetapi yang paling sering, jangka waktu hujan yang lebih pendek dengan kelebatan yang lebih besar dapat menggambarkan bahaya banjir yang terbesar dan orang harus berusaha mendapatkan data selang yang lebih pendek; orang juga dapat mulai mengukur curah hujan itu dengan pencatat otomatis, segera setelah penyelidikan untuk projek ybs. dimulai. Ekstrapolasi dapat dibuat dengan merekam kerapatan itu yang kedalaman hujan tertentunya berlangsung dengan jangka waktu 96 jam, 72 jam, 48 jam dan 24 jam. Banyak data yang kini tersedia dari sumber di Amerika Serikat [12-16], yang meskipun jelas tertuju ke DAS di AS, juga dapat digunakan di tempat lain. Di Britania Raya, orang perlu mengacu ke *Flood Studies Report* (Laporan Penelitian Banjir) [17]. Saham Kantor Meteorologi kepada Laporan ini memungkinkan taksiran mengenai banyaknya curah hujan yang dibuat untuk sebarang tempat di Inggris Raya dengan masa ulang dengan jangka waktu dari 15 detik hingga 30 hari, seperti dibahas dalam bab 2. Orang juga dapat mengacu kepada Bleasdale [18], *British Rainfall 1939 (et seq.)* (*Curah hujan di Inggris, 1939 (dst.)*) dan Wiesner [19].

Maka dari itu, proses penggunaan hidrograf satuan meliputi langkah berikut ini.

- a Pemeriksaan semua data yang ada hubungannya (termasuk analisis kekerapan); khususnya, rekaman hujan dengan alat otomatis jika ada, dan pemilihan selanjutnya jumlah curahan yang, dalam penilaian satu-satu yang bersangkutan, terjadi dalam jangka waktu yang cukup pendek, di atas DAS ybs. (Ingat, di tempat DAS itu besar dan terasa bahwa tidak mungkin atau tidak akan terjadi pencurahan seragam, DAS itu harus dipecah menjadi sederet anak-DAS yang masing-masing diberi curahan.)
- b Dari jumlah curahan yang dipilih itu, harus dikurangkan semua yang hilang. Ini mencakup cegatan, resapan (dengan mempertimbangkan ketunaan kelengasan tanah) dan uap kerigatan.
- c Curah hujan hasilan bersih (atau sangkil) kemudian digunakan kepada hidrograf satuan yang disesuaikan kepada dasar waktu yang benar, dan orang pun memperoleh ordinat hidrograf badai yang berhasil itu. Jika yang tersangkut lebih dari sebuah hidrograf, kita perlu memutuskan jarak hujan

dalam waktu, biasanya, tetapi harus, untuk memperoleh gabungan yang paling mungkin dari semua ordinat.

- d Aliran dasar, yang ditaksir tersendiri, sekarang dibubuhkan untuk memberikan limpasan badai jumlahan.

Pilihan kkt (ketunaan kelengasan tanah) tempat akan tercurahnya badai ripta adalah penting. Tidak selalu masuk akal untuk menduga sebelumnya DAS yang jenuh. Dengan membayangkan ini, dapat digunakan lengkung daya resap khayalan, angka atau grafik nasaban sesumbu (misalnya gambar 4.7). Untuk DAS di Kepulauan Inggris, bila tidak ada informasi lain, maka digunakan nilai rerata kkt dari gambar 4.8.

7.13.2 Hidrograf satuan 1 jam

Dalam tahun-tahun terakhir ini, anggitan hujan rencana telah berubah untuk mengimak (membuat simulasi) secara lebih tepat peristiwa alam. Hujan tidaklah tercurah di alam dengan kelebatan yang seragam selama jangka waktu lama. Karena sekarang orang di mana-mana menggunakan komputer, semua yang disederhanakan yang tadinya diinginkan, sekarang tidak lagi perlu, karena perhitungan yang menjemukan untuk itu tidak lagi perlu dilakukan dengan tangan.

Peristiwa curahan hujan sekarang dinyatakan sebagai kedalaman jumlahan (mm) yang jatuh dengan jujuh (jangka waktu) tertentu dan pada penampang badai tertentu; penampang (profil) itu dibandingkan dengan menggunakan keberpuncakan (sifatnya yang memiliki puncak) dan kemusimannya (sifatnya yang berhubungan dengan musim). Jadi, 75 persen penampang musim dingin Inggris Raya adalah penampang badai yang khas hujan badai dari Oktober hingga Maret, atau musim dingin di sana.

Untuk keperluan perencanaan, umumnya orang sebagai dasar pemikiran, bertolak dari peristiwa yang besar-besaran. Maka lamanya hujan juga cenderung berjam-jam. Oleh sebab itu, sering untuk mudahnya digunakan pertambahan hujan 1-jam kepada grafik satuan 1-jam, dan untuk menukar penampang hujan bersih dengan ordinat jam-jaman hidrograf satuannya, seperti telah dilakukan pada contoh 7.2.

Acuan

- 1 Natural Environment Research Council. *Flood Studies Report*, v. I, NERC, 1975, bab 6.
- 2 Sherman, L.K., Stream flow from rainfall by the unitgraph method. *Eng. News Record*, **108**, (1932), 501
- 3 Bernard, M. An approach to determinate stream flow. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **100**, (1935) 347
- 4 Linsley, R.K., Kohler, M.A., dan Paulhus, J.L.H., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1949, h. 448-9.
- 5 Collins, W.T., Runoff distribution graphs from precipitation occurring in more than one time unit, *Civ. Eng.*, **9**, n. 9 (Sept. 1939) 559
- 6 Snyder, F.F., Synthetic unitgraphs. *Trans. Am. Geophys. Union, 19th Annual Meeting 1938*, Parwa 2, h. 447
- 7 Hursh, C.R., Discussion on Report of the committee on absorption and transpiration, *Trans. Am. Geophys Union, 17th Annual Meeting 1936*, h. 296
- 8 Snyder, F.F., Pembahasan dalam acuan 6.
- 9 Linsley, R.K., Application of the synthetic unitgraph in the western mountain States, *Trans. Am. Geophys. Union, 24th Annual Meeting 1943*, Parwa 2, h. 580.
- 10 Taylor, A.B. dan Schwarz, H.E. Unit hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Trans. Am. Geophys. Union*, **33** (1952) 235
- 11 Institution of Civil Engineers, *Flood and Reservoir Safety: an engineering guide*, I.C.E., London, 1978
- 12 Paulhus, J.L.H. dan Gilman, C.S. Evaluation of probable maximum precipitation, *Trans. Am. Geophys. Union*, **34** (1953) 701
- 13 Generalised estimates of probable maximum precipitation over the U.S. east of the 105th meridian. *Hydrometeorological Report n. 23*, U.S. Weather Bureau, Washington D.C., 1947
- 14 Generalised estimates of probable maximum precipitation of the United States west of the 105th meridian for areas to 400 square miles and durations to 24 hours. *Tech. Paper 38*, U.S. Weather Bureau, Washington D.C., 1960
- 15 Manual for depth duration area analysis of storm precipitation. *U.S. Weather Bureau Co-operative Studies Tech. Paper n. 1*, Washington D.C., 1946

- 16 Hershfield, D.M., Estimating the probable maximum precipitation. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **87**, (Sept. 1961) 99
- 17 National Environmental Research Council. *Flood Studies Report*, v. II, NERC, 1975
- 18 Bleasdale, A., The distribution of exceptionally heavy daily falls of rain in the United Kingdom. *J. Inst. Water Eng.*, **17**, (Febr. 1963) 45
- 19 Wiesner, C.J., Analysis of Australian storms for depth, duration, area data. *Rain Seminar, Commonwealth Bureau of Meteorology*, Melbourne, 1960

Bacaan selanjutnya

- Barnes, B.S., Consistency unitgraphs. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **85**, HY8 (Agustus 1959) 39
- Buil, J.A., Unitgraphs for non uniform rainfall distribution. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **94**, HY1 (Januari 1965) 235
- Morgen, P.E. dan Johnson, S.M., Analysis of synthetic unitgraph methods. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **88**, HY5 (September 1962) 199
- Morris, W.V., Conversion of storm rainfall to runoff. *Proc. Symposium n. 1, Spillway Design Floods*, N.R.C., Ottawa, 1961, h. 172

Soal

- 7.1 Sebuah DAS mengalami masa tak berhujan berkepanjangan. Luah sungai yang menyalirkannya adalah $100 \text{ m}^3/\text{det}$ setelah 10 hari tanpa hujan, dan $50 \text{ m}^3/\text{det}$ setelah 40 hari tanpa hujan. Turunkan persamaan lengkung penyusutannya dan taksir luahnya setelah 120 hari tak ada hujan.
- 7.2 Sebuah DAS menderita karena kekeringan. Luah sungai yang menyalirkannya adalah $75 \text{ m}^3/\text{det}$ setelah 12 hari tanpa hujan dan $25 \text{ m}^3/\text{det}$ setelah 40 hari tanpa hujan. Turunkan lengkung penyusutannya dan taksirlah luahnya 60 hari setelah masuk masa kering itu.
- 7.3 Tungkai rosotan sebuah hidrograf, yang disenaraikan di bawah, perlu dibagi ke dalam limpasan dan aliran dasar. Lakukan hal itu
 - a dengan menemukan titik ketaksinambungan pada tungkai rosotan itu,
 - b dengan menemukan persamaan lengkung penyusutannya dan mengekstrapolasikan kembali dalam waktu.

Berilah ulasan mengenai hasilnya.

Waktu (jam)	Ajiran (m^3/det)	Waktu (jam)	Ajiran (m^3/det)
15	41,1	33	10,0
18	35,8	36	8,3
21	25,0	39	7,0
24	19,2	42	5,8
27	15,1	45	4,9
30	12,2	48	4,1

- 7.4 Bahaslah bagaimana menurunkan lengkung-penyusutan induk untuk sebuah sungai. Untuk apakah Anda menggunakan dan mengapa?
- 7.5 Kekeringan berakhir pada sebuah DAS seluas 100 km^2 dengan hujan seragam sebesar 36 mm yang tercurah selama 6 jam. Hidrograf yang berhubungan dengan itu pada sungai yang menyalirkan daerah tersebut diberikan di bawah ini, dengan lamanya hujan berkisar antara 3 dan 9 jam. Gunakan data itu untuk memprakirakan luah maksimum yang mungkin dapat diharapkan yang menyusul curahan sebesar 50 mm dalam 3 jam pada DAS itu. Gambarkan prakiraan itu secara wajar.

Jam	Luah (m^3/det)	Jam	Luah (m^3/det)
0	3	24	25
3	3	27	21
6	10	30	17
9	25	33	13,5
12	39	36	10,5
15	43	39	8
18	37	42	5,5
21	30,5	45	4
		48	3,9

- 7.6 Uraikan bagaimana akan melangkah untuk memisahkan aliran dasar dari hidrograf luahan sungai itu.
- 7.7 Tuliskan ketiga asas yang penting-penting teori hidrograf satuan yang menggambarkan penerapannya dengan bagan.
Yang diberikan di bawah adalah tiga hidrograf satuan (semua nilai dalam kaki^3/det) yang diturunkan dari badai yang berdiri sendiri-sendiri pada sebuah DAS kecil, yang semuanya diyakini terhasil dari hujan 3 jam. Turunkan hidrograf satuan reratanya dan tentukan keabsahannya jika luas DAS itu 5,25 mil persegi.

Jam	Badai 1	Badai 2	Badai 3
0	0	0	0
1	165	37	25
2	547	187	87
3	750	537	260
4	585	697	505
5	465	608	660
6	352	457	600
7	262	330	427
8	195	255	322
9	143	195	248
10	97	135	183
11	60	90	135
12	33	52	90
13	15	30	53
14	7	12	24
15	0	0	0

- 7.8 Yang disenaraikan di bawah adalah hidrograf yang diturunkan dari tiga badai terpisah-pisah dengan kelebatan seragam, yang masing-masing lamanya 3 jam. Curah hujan kotor untuk badai A adalah 14 mm; untuk badai B, 24 mm; dan untuk badai C, 19 mm. Angka-Φ untuk DAS itu ditaksir 1 1/3 mm/jam. Turunkan hidrograf satuan rerata untuk DAS itu dan pastikan keabsahannya jika luasnya $13,60 \text{ km}^2$. Semua nilai dalam m^3/det .

Jam	Badai A	Badai B	Badai C
0	0	0	0
1	1,84	0,82	0,42
	6,10	4,16	1,46
3	8,36	11,98	4,35
4	6,52	15,54	8,45
5	5,18	13,56	11,04
6	3,92	10,20	10,04
7	2,92	7,36	7,14
8	2,17	5,68	5,39
9	1,59	4,34	4,16
10	1,08	3,02	3,06
11	0,67	2,00	2,27
12	0,37	1,16	1,50
13	0,17	0,66	0,89
14	0,08	0,26	0,41
15	0	0	0

- 7.9 Hidrograf satuan 3 jam yang diturunkan dari sebuah DAS seluas $14,5 \text{ km}^2$ diberikan di bawah ini.

Jam	Hidrograf satuan (m^3/det)	Jam	Hidrograf satuan (m^3/det)
0	0	8	3,6
1	0,3	9	2,8
2	1,0	10	2,0
3	2,9	11	1,5
4	5,6	12	1,0
5	7,3	13	0,6
6	6,7	14	0,3
7	4,8	15	0

Luah puncak berapakah yang kiranya dapat diharapkan dari curah hujan 4 jam dengan kelebatan seragam sebesar 15 mm/jam, yang disusul langsung dengan badai 3 jam dengan kelebatan seragam sebesar 10 mm/jam? Andaikan kehilangan badai tetap sebesar 3 mm/jam dan adanya aliran dasar yang mulai pada $1,2 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam 0 dan meningkat sebesar $0,1 \text{ m}^3/\text{det}$ setiap jam hingga melewati puncaknya.

- 7.10 Hidrograf yang didaftarkan di bawah teramat untuk sebuah sungai yang menyalirkannya DAS dengan luas 40 mil persegi, menyusul badai yang berlangsung 3 jam.

Jam	Kaki $^3/\text{det}$	Jam	Kaki $^3/\text{det}$	Jam	Kaki $^3/\text{det}$
0	450	24	3.500	48	1.070
3	5.500	27	3.000	51	950
6	9.000	30	2.600	54	840
9	7.500	33	2.210	57	750
12	6.500	36	1.890	60	660
15	5.600	39	1.620	63	590
18	4.800	42	1.400	66	540
21	4.100	45	1.220		

Pisahkan aliran dasar dari limpasan dan hitunglah volum limpasan jumlahan. Berapakah curah hujan bersih dalam inci setiap jam? Berilah ulasan mengenai kelebatan dan kekerapan yang mungkin badai semacam itu.

- 7.11 Hidrograf satuan 4 jam bagi tempat penyukatan sungai yang menyalirkannya DAS seluas 554 km^2 , diberikan di bawah.

Waktu (jam)	Hidrograf satuan (m^3/det)	Waktu (jam)	Hidrograf satuan (m^3/det)
0	0	11	76
1	11	12	62
2	60	13	51
3	120	14	39
4	170	15	31
5	198	16	23
6	184	17	16
7	153	18	11
8	127	19	6
9	107	20	3
10	91	21	0

Periksalah sejauh mungkin keabsahan hidrograf satuan itu. Temukan luah puncak sungai itu yang mungkin, pada tempat penyukatan tadi, dari badai yang meliputi DAS itu dan terdiri dari dua jangka waktu 3 jam, berturut-turut hujan bersih dengan kelebatan masing-masing 12 dan 6 mm/jam. Andaikan aliran dasar itu naik secara gemaris selama jangka waktu limpasan dari 30 hingga $70 m^3/det$.

- 7.12 Hidrograf satuan 3 jam bagi tempat penyukatan yang menyalirkan DAS seluas $835 km^2$ disenaraikan di bawah.

Waktu (jam)	Hidrograf satuan 3 jam (m^3/det)	Waktu (jam)	Hidrograf satuan 3 jam (m^3/det)
0	0	12	85
1	22	13	68
2	120	14	55
3	240	15	42
4	318	16	30
5	298	17	20
6	250	18	12
7	206	19	7
8	174	20	3
9	144	21	0
10	123		
11	102		

Badai berjeda yang lamanya 7 jam meliputi DAS itu, terdiri dari curahan 17 mm/jam selama 4 jam, disusul oleh curahan 12 mm/jam selama 3 jam berikutnya. Angka Φ -nya untuk DAS itu 7 mm/jam. Dengan mengandaikan aliran dasar tetap $40 m^3/det$, berikan taksiran luah maksimumnya dan waktu terjadinya dari sejak awal badai tersebut.

- 7.13 Dengan menggunakan data dan DAS soal 7.11, temukan luah puncak yang mungkin di sungai itu, pada tempat penyukatan, dari badai yang meliputi DAS itu dan terdiri dari hujan jangka waktu 2 jam berturut-turut, masing-masing dengan limpasan 7, 14, dan 12 mm. Andaikan aliran dasar menaik dari $10 m^3/det$ hingga $20 m^3/det$ selama jangka waktunya dari limpasan.

- 7.14 Hidrograf satuan 4 jam untuk DAS seluas $550 km^2$ diberikan di bawah.

Jam	Q (m^3/det)	Jam	Q (m^3/det)
0	0	11	76
1	11	12	62
2	71	13	51
3	124	14	40
4	170	15	31
5	198	16	27
6	172	17	17
7	147	18	11
8	127	19	5
9	107	20	3
10	90	21	0

Badai berkelebatan seragam dengan lamanya 4 jam dengan kelebatan 6 mm/jam disusul, setelah terhenti 2 jam, oleh badai berkelebatan seragam yang lamanya 2 jam dengan kelebatan 11 mm/jam. Kehilangan hujan ditaksir sebesar 1 mm/jam pada kedua badai itu. Aliran dasar ditaksir sebesar $10 m^3/det$ pada awal badai yang pertama dan $40 m^3/det$ pada akhir jangka waktu limpasan badai yang kedua.

Hitunglah luah puncak yang mungkin dan waktu terjadinya.

- 7.15 Dengan menggunakan hidrograf satuan sintesis Laporan Penelitian Banjir (LPB, 1975) dengan $T_p = 8$ jam bagi DAS seluas $350 km^2$, turunkanlah saham limpasan permukaan kepada luah sungai yang menyalirkan DAS itu pada akhir jam keempat hujan terus-menerus sebesar 10 mm/jam, jika koefisien limpasantya adalah 70 persen. Andaikanlah limpasan itu mulai pada saat hujan mulai.

Berilah batasan parameter yang terpakai sebagai dasar hidrograf satuan Snyder yang mula-mula dan berilah ulasan pada perbedaannya dengan nilai hidrograf satuan LPB.

- 7.16 Sebuah DAS seluas $76 km^2$ menyalirkan ke mulut DAS pada titik Acuan Kekisi Nasional Inggris SS 742 480.

Panjang sungai utamanya 15 km. Andaikan CHRT = 1750 mm dan S1085 = 15,0 dan tanpa adanya perkembangan kota.

Taksirlah aliran banjir itu pada mulut DAS dengan masa ulang 65 tahun, dengan mengandaikan bahwa 50% dari curah hujan timbul sebagai limpasan dan dengan mengabaikan aliran dasar.

7.17a Hidrograf satuan 2 jam untuk DAS seluas 370 km^2 disenaraikan di bawah.

Ubahlah itu menjadi hidrograf satuan 6 jam dan taksirlah luah puncaknya dari badai berkelebatan seragam yang lamanya 6 jam yang berkelebatan 4 mm/jam. Andaikan kehilangan hujan mencapai 1 mm/jam dan bahwa aliran dasarnya tetap sebesar $3 \text{ m}^3/\text{det}$. Adakah cara untuk memeriksa, apakah hidrograf satuan itu absah?

Jam	$\text{Qm}^3 (\text{det})$	Jam	$\text{Qm}^3 (\text{det})$	Jam	$\text{Qm}^3 (\text{det})$
0	0	12	65	24	18
2	8	14	54	26	13
4	22	16	45	28	9
6	44	18	37	30	5
8	67	20	29	32	2
10	72	22	23	34	0

b Berilah ulasan mengenai andaian aliran dasar yang tetap, dan bahaslah cara yang dapat dipakai untuk menaksir aliran dasarnya pada akhir jangka waktu limpasan permukaan.

8

Melacak banjir

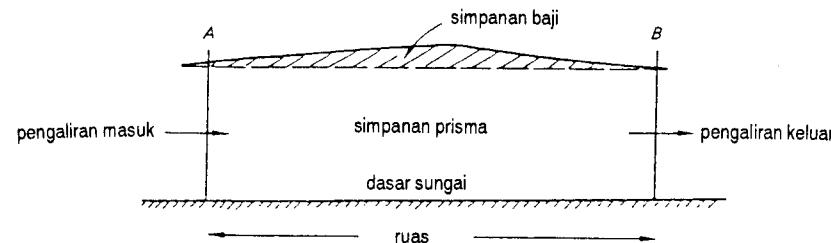
8.1 Pendahuluan

Peradaban selalu berkembang di sepanjang sungai. Jika ada sungai, orang pedalaman memiliki peluang dapat mencapai pantai dan sebaliknya, dapat mengairi tanamannya, dapat memperoleh air untuk penyediaan air bagi masyarakat kota, dan pada akhir-akhir ini, membangkitkan tenaga listrik dan menyediakan air bagi industri. Keuntungan yang banyak itu selalu diimbangi oleh bahaya banjir, dan pada masa lampau, *tangkis* dan tanggul banjir dibangun orang di sepanjang sungai yang penting-penting agar terhindar dari penggenangan selama musim banjir. Pada zaman yang lebih ke belakang ini, orang membangun waduk karena orang mulai memahami asas pembangunan bendungan, dan di banyak bagian dunia ini orang terus-menerus membuat bangunan yang lain seperti saluran pelega dan kolam penyimpanan dan memperbaiki alur. Bagi bangunan seperti itu, penting jika orang dapat menaksir, bagaimanakah tindakan yang diusulkan itu akan berpengaruh terhadap gelombang banjir di sungai, sehingga dapat ditemukan penyelesaian yang ekonomis, jika dihadapi hal yang khusus-khusus. *Melacak banjir* adalah usaha untuk menggambarkan proses ini. Ini merupakan sebuah tatacara yang digunakan orang untuk menentukan keragaman luahan sejalan dengan waktu di sebuah titik di alur sungai, dengan cara mempertimbangkan data serupa bagi sebuah titik di bagian hulu. Dengan kata lain, ini adalah proses yang menunjukkan bagaimanakah gelombang banjir dapat dikurangi besarnya dan diperpanjang waktunya (*diperlemah*) dengan memanfaatkan penyimpanan pada *ruas* di antara dua titik.

8.2 Persamaan penyimpanan

Karena cara melacak banjir bergantung pada pengetahuan tentang penyimpanan di suatu ruas sungai, orang harus menemukan jalan untuk dapat menilainya. Ada dua cara untuk melakukannya. Yang pertama adalah membuat pengukuran topografi dan penyigian hidrografi rinci mengenai ruas sungai ybs dan lahan di sepanjang tepi sungai, dan dengan jalan itu menentukan daya tampung pada ketinggian yang berbeda-beda. Yang kedua adalah menggunakan data rekaman ketinggian gelombang banjir dari masa lampau pada kedua titik tersebut; jadi dengan cara menurunkan (mendeduksi) daya tampung ruas tadi. Diandaikan, bahwa daya tampung yang demikian itu tidak akan berubah banyak dengan waktu, dan dengan demikian dapat digunakan untuk melacak banjir besar dan lebih gawat, yang telah diprakirakan. Untuk cara yang kedua itu, yang biasanya dipakai orang, diperlukan data sebanyak-banyaknya, termasuk data rekaman aliran pada awal dan akhir ruas, dan yang menyangkut anak sungai yang mana pun yang mengalir masuk ke dalamnya, dan data curah hujan di daerah mana pun yang memberi limpasan langsung kepadaanya.

Simpanan dalam ruas sungai terbagi menjadi dua bagian, simpanan *prisma* dan simpanan *baji* (lihat gambar 8.1). Ini untuk mudahnya, karena kemiringan permukaan selama banjir tidaklah seragam (lihat pasal 6.2).



Gambar 8.1 Simpanan dalam ruas sungai

Jika kita sekarang memperhatikan aliran yang terus-menerus melewati ruas itu (gambar 8.1), maka jelaslah bahwa apa yang masuk pada titik A harus muncul lagi pada titik B, atau masuk dalam simpanan untuk sementara.

$$I = D + \frac{dS}{dt}$$

di sini I = aliran masuk ke ruas

D = lahan dari ruas itu

dS/dt = laju perubahan dalam simpanan ruas terhadap waktu

Persamaan ini dihampiri, untuk selang waktu t , dengan

$$\frac{I_1 + I_2}{2} t - \frac{D_1 + D_2}{2} t = S_2 - S_1 \quad (8.1)$$

Dalam hal ini, tikals 1 dan 2 menyatakan nilai, masing-masing, pada awal dan akhir waktu t . Waktu t itu disebut masa pelacakan dan orang harus memilihnya yang cukup pendek sehingga andaian yang terkandung dalam persamaan 8.1 (yaitu, hidrograf aliran masuk dan aliran keluar terdiri dari sederet garis lurus), tidak menyimpang jauh dari yang sebenarnya. Khususnya, jika t terlalu panjang, ada kemungkinan kita tidak dapat menangkap puncak lengkung aliran masuk, jadi masa itu perlu dibuat lebih pendek daripada waktu tempuh puncak gelombang banjir melewati ruas tersebut. Sebaliknya, makin pendek masa pelacakan itu makin banyak perhitungan yang harus dibuat.

8.3 Pelacakan waduk

Jika persamaan 8.1 sekarang disusun sedemikian rupa, hingga semua suku yang diketahui terdapat di sisi yang satu, maka pernyataannnya menjadi

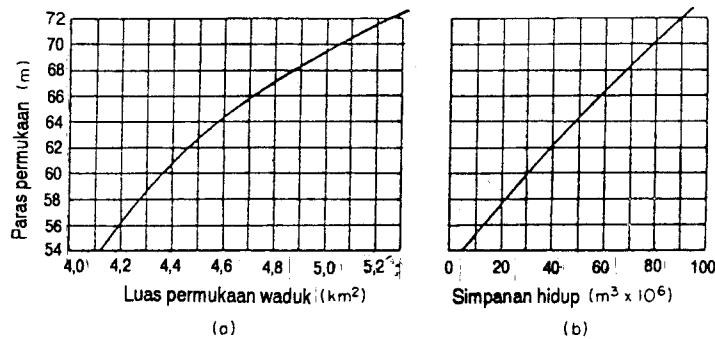
$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)t + (S_1 - \frac{1}{2}D_1t) = (S_2 + \frac{1}{2}D_2t) \quad (8.2)$$

Proses melacak itu terdiri dari langkah memasukkan semua nilai yang diketahui untuk memperoleh $S_2 + \frac{1}{2}D_2t$ dan setelah itu menurunkan nilai D_2 yang bersesuaian, dari hubungan yang mengaitkan simpanan dengan luahan. Cara ini pertama kali dikembangkan oleh L.G. Puls dari US Army Corps of Engineers, Korps Zeni Angkatan Darat A.S.

Hal yang paling sederhana adalah yang menyangkut waduk yang mendapat aliran air masuk pada ujung yang satu dan meluahkannya di ujung yang lain lewat pelimpah. Dalam waduk yang demikian itu, diandaikan tidak ada simpanan baji, dan bahwa peluahan itu merupakan fungsi ketinggian permukaan, asal saja tatanan pelimpah itu berupa pengaliran bebas atau berpintu dengan lubang pintu yang tetap. Waduk dengan pintu pun dapat diperlakukan sebagai waduk sederhana, jika pintu airnya terbuka hingga lubang tertentu pada paras air permukaan yang sudah dirinci. Dengan demikian, orang pun dapat menggambarkan lengkung ketinggian – luahan. Data lainnya yang diperlukan adalah lengkung ketinggian – simpanan waduk tersebut, dan hidrograf aliran masuk.

Contoh 8.1 Sebuah waduk yang tertutup oleh bendungan memiliki luas permukaan yang berubah-ubah dengan ketinggian airnya sebagaimana

diperlihatkan oleh hubungan pada gambar 8.2a. Bendungan itu dilengkapi dengan dua lubang pintu peluah berbentuk lingkaran, yang masing-masing memiliki garis tengah 2,7 m, dengan titik pusatnya pada ketinggian 54,0 m, dan sebuah pelimpah yang airnya mengalir keluar dengan bebas, dengan panjang 72,5 m dan paras mercu pada ketinggian 66,0 m. Pintu pelimpahnya semua terbuka dan paras air permukaannya pada ketinggian 63,5 m pada saat $t = 0$. Hidrograf banjir pada tabel 8.2, lajur (3), diramalkan. Berapakah paras waduk yang tertinggi, dan bilamanakah hal itu akan terjadi?



Gambar 8.2 Ciri waduk: a paras air lawan luas; b paras air lawan simpanan

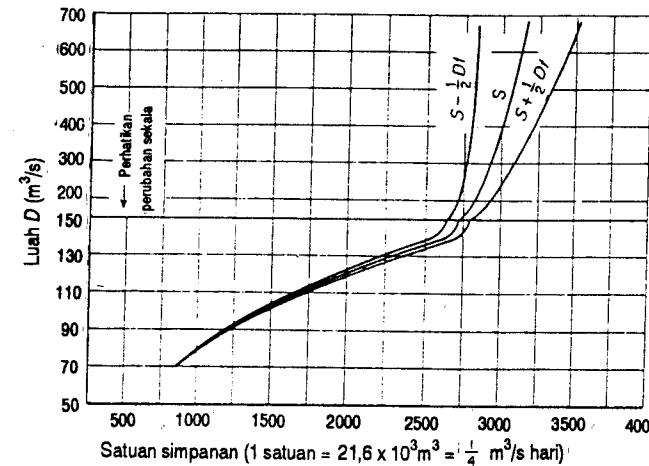
- 1 Andaikan semua lubang pengeluaranya memiliki koefisien luahan, $C_d = 0,8$, maka $Q = 2(C_d A \sqrt{2gH})$ dan pada saat $t = 0$, $Q = D$ (tabel 8.2, lajur (5)) = $2(0,8 \times 5,7 \times \sqrt{186,5}) = 125 \text{ m}^3/\text{det}$. (Perhatikan $g = 9,81 \text{ m/det}^2$.) Masukkan nilai ini pada baris pertama lajur (5).
- 2 Hitung lengkung ketinggian lw. simpanan pada gambar 8.2b. Ingat, bahwa simpanan hidup berasal pada ketinggian 52,65, paras balik lubang pengeluar tadi, dan berjumlah sebesar $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Simpanan antara 54,0 dan 56,0 = rerata luas waduk antara kedua paras $\times 2 \text{ m} = 8,33 \times 10^6 \text{ m}^3$. Pertambahan berturut-turut yang dihitung dengan cara ini, dirajah secara melonggok dengan 52,65 sebagai tolak.
- 3 Hitung tabelan ketinggian-D dari tabel 8.1.

Tabel 8.1 Tabel ketinggian-luahan^a

Ketinggian permukaan air (m)	Hulu di atas 54,0 (m)	Luahan dr lubang pengeluar (m ³ /det)	Hulu di atas 66,0 = H (m)	$H^{3/2}$	Luahan pelimpah (m ³ /det)	Luahan jumlahan (m ³ /det)
58,0	4,0	81,0	-	-	-	81
60,0	6,0	99,5	-	-	-	100
62,0	8,0	114,8	-	-	-	115
64,0	10,0	128,0	-	-	-	128
66,0	12,0	140,7	0	0	0	141
66,1	12,1	141,2	0,1	0,032	5,1	146
66,2	12,2	141,8	0,2	0,089	14,2	156
66,3	12,3	142,6	0,3	0,164	26	169
66,4	12,4	143,0	0,4	0,252	40	183
66,5	12,5	143,7	0,5	0,353	56	200
66,7	12,7	144,8	0,7	0,58	93	238
66,9	12,9	146,0	0,9	0,85	136	282
67,0	13,0	146,4	1,0	1,0	160	306
67,5	13,5	149,3	1,5	1,84	294	443
68,0	14,0	152,0	2,0	2,83	453	605

^a Andaikan Q (pelimpah) = $CLH^{3/2}$ dan gunakan $C = 2,2 \text{ m/s}$.

- 4 Dari gambar 8.2b dan tabel 8.1, orang dapat menggambar lengkung simpanan-D pada gambar 8.3; yaitu, lengkung pusat. Absis gambar 8.3 dibagi-bagi ke dalam ‘satuan simpanan’. Setiap satuan simpanan = masa



Gambar 8.3 Lengkung simpanan pelacakan waduk

pelacakan $\times 1 \text{ m}^3/\text{det}$. Karena hidrograf ramalan pada tabel 8.2, maka lajur (3) diberikan pada selang 6-jam, sehingga akan mudahlah untuk membuat ini sebagai masa pelacakan. Maka setiap satuan simpanan $= 6 \times 3600 \times 1 = 21,6 \times 10^3 \text{ m}^3 = 1/4 \text{ m}^3/\text{det}$. hari. Penggunaan semua satuan itu perlu untuk mempertahankan semua matra pada tabel 8.2, lajur (4), (6), dan (7) cocok.

Tabel 8.2 Perhitungan pelacakan waduk

(1) Waktu (jam)	(2) Masa pela- cakan	(3) Pengaliran masuk (m^3/s)	(4) $\frac{(I_1 + I_2)t}{2}$	(5) D (m^3/det)	(6) $S - \frac{1}{2}Dt$ ($\frac{1}{4} \text{ m}^3/\text{det}$ hari)	(7) $S + \frac{1}{2}Dt$ ($\frac{1}{4} \text{ m}^3/\text{det}$ hari)	(8) paras permuka- an (m)
0	1	50	62	125	2095	2157	63,4
6	2	75	127	122	2035	2162	63,0
12	3	180	265	122	2040	2305	63,0
18	4	350	400	127	2178	2578	63,8
24	5	450	485	136	2442	2927	65,1
30	6	520	512	200	2727	3239	66,5
36	7	505	475	425	2814	3289	67,4
42	8	445	402	460	2829	3231	67,5
48	9	360	325	416	2815	3140	67,35
54	10	290	270	347	2793	3063	67,15
60	11	250	230	288	2775	3005	66,95
66	12	210	192	242	2763	2955	66,7
72	13	175	157	208	2747	2904	66,55
78	14	140	125	190	2714	2839	66,45
84	15	110	97	165	2674	2771	66,25
90	16	85	75	144	2627	2702	66,05
96	17	65	60	140	2562	2622	66,0
102	18	55	52	138	2484	2536	65,3
108	19	50	47	134	2402	2449	64,7
114	20	45	42	132	2317	2359	64,3
120	21	40	39	129	2230	2269	64,0
126		38	127				63,7

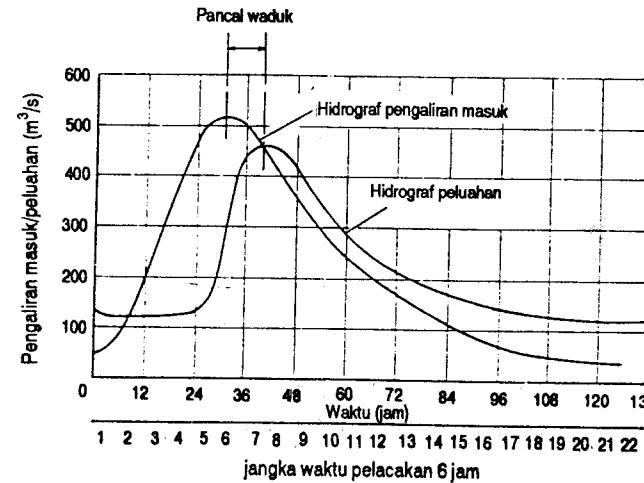
Sekarang lengkung $S \pm \frac{1}{2}Dt$ ini ditambahkan kepada kedua sisi lengkung simpanan. Karena absisnya dalam satuan simpanan, jadi $t = 1$ dan lengkung itu dapat dirajah tanpa perhitungan; misalnya, pada $\frac{1}{2}D = 200$, $Dt = 100$ jadi dua titik dapat dibuat 100 satuan simpanan pada kedua sisi lengkung-S, dan serupa dengan itu, juga untuk titik yang lainnya.

5 Perhitungan pelacakan sekarang dapat dimulai pada tabel 8.2. Angka yang tebal-tebal diketahui.

Untuk mulai, hitung lajur (4) dengan meratakan pasangan berturut-turut nilai aliran masuk. Sekarang temukan nilai parameter ini yang bersesuaian

dengan $D = 125 \text{ m}^3/\text{det}$. dari lengkung $S - \frac{1}{2}Dt$ pada gambar 8.3. Nilai itu 2095 dan angka ini dimasukkan pada ruang pertama lajur (6).

- 6 Gambar dalam lajur (4) ditambahkan kepada lajur (6) dan jumlahnya dimasukkan ke dalam lajur (7) (sebagai misal, 2095 + 62 = 2157). Sisi kiri persamaan 8.2 sekarang telah dinilai. Temukan nilai lajur (7) pada lengkung $S + \frac{1}{2}Dt$ dan baca nilai D yang bersesuaian, dengan memasukkan ini ke dalam lajur (5) (sebagai misal, dari lengkung $S + \frac{1}{2}Dt$ temukan $D = 122$ yang bersesuaian dengan 2157).
- 7 Gunakan nilai D yang baru ini untuk menemukan lagi $S - \frac{1}{2}Dt$ seperti pada langkah 5. Perhatikan bahwa nilai ini dapat langsung diperoleh tanpa menggunakan lengkung tadi dengan mengurangkan nilai D dari nilai lajur (7) pada garis di atas (sebagai misal, 2157 - 122 = 2035). Angka lajur (4) setelah itu ditambahkan kepada lajur (6) yang baru untuk memperoleh angka lajur (7) baru (misalnya, 127 + 2035 = 2162). Lengkapi tabel itu dan rajah hidrograf aliran keluarannya (gambar 8.4). Aliran keluar puncaknya harus jatuh pada tungku surutan hidrograf aliran masuk. Selisih waktu antara puncak hidrograf aliran masuk dan hidrograf luahan diistilahkan *pancal waduk* dan surutnya aliran puncak bersama tersebutnya lengkung surutan dinyatakan sebagai *pelemahan*.



Gambar 8.4 Hidrograf aliran masuk dan luahan untuk waduk dalam contoh 8.1

8 Nilai lajur (8) untuk paras air permukaan diturunkan dari nilai luahan dan paras pada tabel 8.1. Paling mudah, orang menemukannya dengan merajah grafik dan membaca paras yang bersesuaian dengan nilai lajur (5).

Paras air tertinggi dalam hal contoh ini adalah 67,5 yang terjadi sekitar jam 40.

8.4 Melacak alur sungai

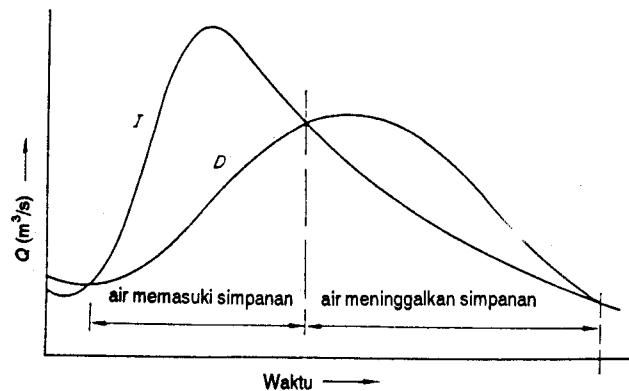
Penyelesaian persamaan simpanan dalam hal ini lebih berliku-liku ketimbang untuk waduk yang sederhana, karena melibatkan simpanan baji. Simpanan tidak lagi merupakan fungsi luahan saja, seperti halnya pada contoh 8.1. McCarthy [1], dalam cara yang kini dikenal sebagai cara Muskingum, mengusulkan simpanan haruslah dinyatakan sebagai fungsi, baik dari aliran masuk maupun luahan, dalam bentuk

$$S = K[xI + (1 - x)D] \quad (8.3)$$

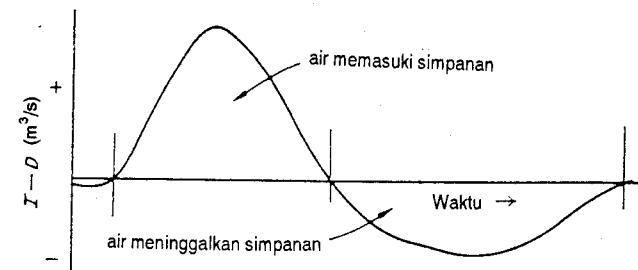
Di sini x = tetapan tanmatra bagi ruas sungai tertentu

K = tetapan simpanan dengan matra waktu yang harus ditemukan dari hidrograf teramati dari I dan D pada kedua stasiun itu.

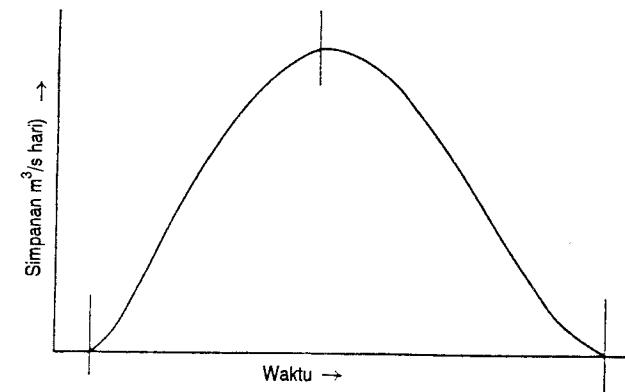
Kedua tetapan itu dapat ditemukan sbb. Katakan saja gambar 8.5 melukiskan aliran berbarengan, yang masuk sesaat I dan aliran yang keluar sesaat D , pada suatu ruas sungai. Karena $I > D$, maka air masuk ke simpanan dalam ruas itu, dan bila $D > I$, maka air meninggalkannya. Diagram selisih dapat



Gambar 8.5 Pengaliran masuk dan pengaliran keluar berbarengan pada sebuah ruas sungai



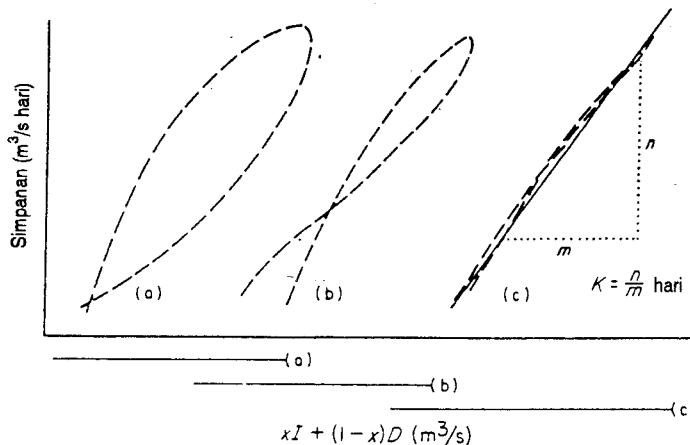
Gambar 8.6 Diagram selisih bagi ruas sungai pada gambar 8.5



Gambar 8.7 Lengkung massa simpanan untuk ruas sungai pada gambar 8.5

digambar, yang menunjukkan hal ini (gambar 8.6) dan berikutnya, sebuah lengkung massa simpanan air (gambar 8.7).

Sekarang andaikan ada sebuah nilai x , katakan saja $x = 0,1$, dan hitung pernyataan $(0,1I + 0,9D)$ untuk berbagai saat dan rajalah semua itu lawan nilai S yang bersesuaian, yang diambil dari gambar 8.7. Rajahan yang terhasil, yang dikenal dengan sebutan *gelung simpanan*, terlukis pada gambar 8.8a; jelas, tidak ada hubungan gemaris. Ambil selanjutnya nilai x (katakan saja 0,2, 0,3, dst.) sehingga ada hubungan yang gemaris, seperti pada gambar 8.8c bila nilai x yang khas dapat diterima. K sekarang dapat diperoleh dengan mengukur kemiringan garis itu.



Gambar 8.8 Gelung simpanan pelacakan sungai

Satuan perlu diperhatikan. Sering berguna untuk bekerja dengan satuan yang agak tidak biasa, baik untuk menghemat perhitungan maupun untuk mempertahankan angka tetap kecil. Sebagai misal, simpanan S untuk mudahnya dinyatakan dalam $\text{m}^3/\text{det.}$ setiap hari: satuan yang demikian itu adalah besaran yang diperoleh dari $1 \text{ m}^3/\text{det.}$ yang mengalir selama sehari = $86,4 \times 10^3 \text{ m}^3$. Jika S dinyatakan dalam $\text{m}^3/\text{det. hari}$ dan ordinat gambar 8.8 dalam $\text{m}^3/\text{det.}$, maka K adalah dalam hari.

Nukilan berikut ini dari Carter dan Godfrey [2] meringkaskan pemilihan x dan K : Faktor x dipilih sedemikian sehingga volum simpanan yang tertunjuk adalah sama, apakah paras air sedang naik atau turun. Untuk luahan pelimpah dari waduk, x dapat dilukiskan sebagai nol, karena paras waduk itu, dan dengan demikian juga simpanannya, secara tunggal ditentukan oleh aliran air keluar; maka pengaruh laju pengaliran masuk itu terhadap simpanan dalam waduk pada sebarang waktu, dapat diabaikan. Untuk aliran yang majunya seragam, x sama dengan 0,50, dan baik aliran yang masuk maupun aliran yang keluar bobotnya sama. Pada gelombang ini, tidak terdapat perubahan dalam bentuk, dan luahan puncak tetap tak terpengaruh. Jadi, nilai x akan berkisar dari 0 hingga 0,50 dengan nilai 0,25 sebagai rerata untuk ruas sungai.

Faktor K bermatra waktu dan merupakan lereng hubungan simpanan-luahan terbobot, yang pada kebanyakan persoalan banjir mendekati garis lurus. Analisis banyak gelombang banjir menunjukkan, bahwa waktu yang dibutuhkan bagi pusat massa gelombang banjir untuk berjalan dari ujung hulu ruas ke ujung hilir ruas sama dengan faktor K . Waktu di antara dua puncak hanya menghampiri

faktor K . Biasanya faktor K dapat ditentukan dengan lebih mudah dan lebih pasti ketimbang nilai x .

Setelah nilai K dan nilai x diperoleh, aliran keluar D dari ruas itu dapat diperoleh, karena dengan menggabung dan menyederhanakan kedua persamaan

$$\frac{I_1 + I_2}{2} t - \frac{D_1 + D_2}{2} t = S_2 - S_1 \quad (8.1)$$

dan

$$S_2 - S_1 = K[x(I_2 - I_1) + (1-x)(D_2 - D_1)]$$

(yang terakhir itu adalah pers. 8.3 untuk selang waktu farik), maka diperolehlah pers. (8.4)

$$D_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 D_1 \quad (8.4)$$

dan di sini,

$$C_0 = -\frac{Kx - 0,5t}{K - Kx + 0,5t}, \quad C_1 = \frac{Kx + 0,5t}{K - Kx + 0,5t}, \quad C_2 = \frac{K - Kx - 0,5t}{K - Kx + 0,5t} \quad (8.5)$$

Di sini t = jangka waktu melacak, yang harus diambil antara $\frac{1}{3}$ dan dari $\frac{1}{4}$ waktu tempuh gelombang banjir melewati ruas sungai itu (yang diperoleh dari hidrograf aliran masuk).

Sebuah contoh yang telah dikerjakan yang menggambarkan penerapan cara ini disajikan di bawah ini.

Contoh 8.2. Melacak alur sungai dengan cara Muskingum.

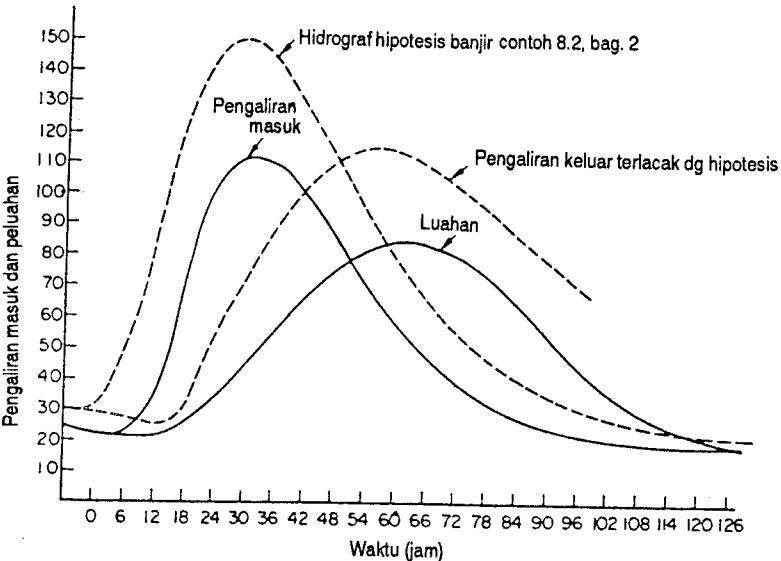
Bagian 1

Jika diberikan hidrograf aliran masuk dan aliran keluar di gambar 8.9, turunkan tetapan x dan K untuk ruas sungai itu.

Datanya dinyatakan dalam bentuk tabel, yaitu tabel 8.3. Pada lajur 1 dan 2, kedua hidrograf berian itu disenaraikan pada selang masa pelacakan, yang diambil sebagai 6 jam. Satuan simpanan di sini diambil sebagai ($\frac{1}{4}\text{m}^3/\text{det. hari}$) karena masa pelacakan $\frac{1}{4}$ hari. Lajur (4), (5) dan (6) hanyalah pernyataan bertabel semua proses yang terlukis dalam gambar 8.6 dan 8.7.

TABEL 8.3 Menghitung gelung simpanan

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
														x = 0,3
Jam	Pengaliran masuk m ³ /det	Pengaliran keluar m ³ /det	I - D (m ³ /s)	Simpanan (1/4 m ³ /det. hari)	rataan longgokan (1/4 m ³ /det. hari)	0,2I	0,8D	Jumlah	0,25I	0,75D	Jumlah	0,3I	0,7D	Jumlah
0	22	22	0	0	0	4	17	21	5	16	21	7	15	22
6	23	21	2	1	1	5	17	22	6	16	25	7	15	25
12	35	21	14	8	9	7	17	24	9	16	25	10	15	39
18	71	26	45	29	38	14	21	35	18	19	37	21	18	55
24	103	34	69	57	95	20	27	47	26	25	51	31	24	64
30	111	44	67	68	163	22	35	57	28	33	61	33	31	71
36	109	55	54	60	223	22	44	66	27	41	68	33	38	71
42	100	66	34	44	267	20	53	73	25	49	74	30	46	76
48	86	75	11	22	289	17	60	77	21	56	77	26	52	78
54	71	82	-11	0	289	14	66	80	18	61	79	21	57	77
60	59	85	-26	-18	271	12	68	80	15	64	79	18	59	77
66	47	84	-37	-31	240	9	67	76	12	63	75	14	59	73
72	39	80	-41	-39	201	8	64	72	10	60	70	11	56	67
78	32	73	-41	-41	160	6	58	64	8	55	63	10	51	61
84	28	64	-36	-38	122	6	51	57	7	48	55	8	45	53
90	24	54	-30	-33	89	5	43	48	6	40	46	7	38	45
96	22	44	-22	-26	63	4	35	39	5	33	38	6	31	38
102	21	36	-15	-18	45	4	29	33	5	27	32	6	25	31
108	20	30	-10	-12	33	4	24	28	5	22	27	6	21	27
114	19	25	-6	-8	25	4	21	24	5	19	24	6	17	23
120	19	22	-3	-4	19	4	15	19	4	14	18	5	15	21
126	18	19	-1	-2	19	4	15	19	4	14	18	5	13	18



Gambar 8.9 Hidrograf aliran masuk dan luahan bagi sebuah ruas sungai

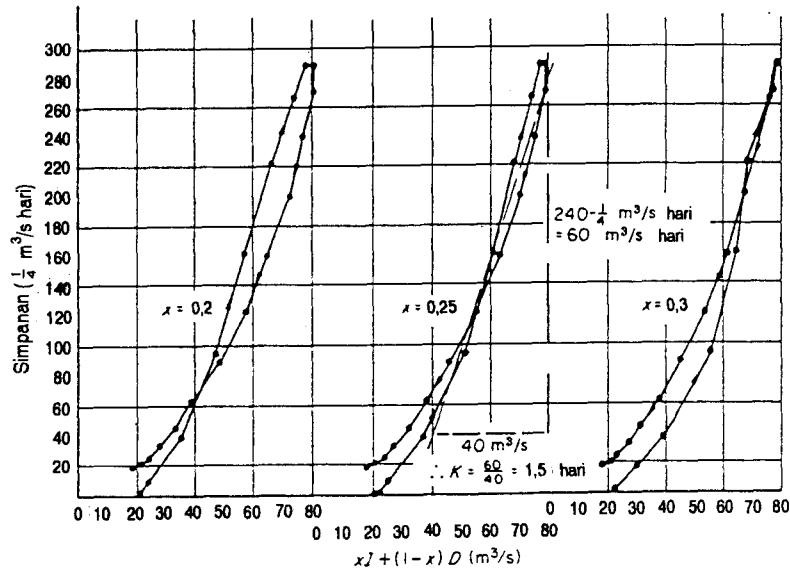
Setelah itu dipilih nilai x , pada kesempatan pertama 0,2, dan nilai di antara tanda kurung siku pada persamaan 8.3 kemudian dinilai dalam lajur (7), (8) dan (9). Lajur (6) dan (9) sekarang dirajah pada gambar 8.10 dan menghasilkan gelung pada sisi kiri gambar itu.

Sekarang dicoba nilai kedua untuk $x = 0,25$ (lajur (10), (11) dan acu (12)) dan rajahan yang terhasil merupakan yang di tengah pada gambar 8.10. Nilai ketiga, $x = 0,3$, juga ditabelkan dan dirajah di sisi kanan gambar itu. Jika diperhatikan, nilai yang tengah sebesar $x = 0,25$, hampir-hampir mendekati garis lurus, jadi inilah yang dipilih sebagai nilai x itu.

K ditentukan dengan mengukur kemiringan garis penengah seperti terlukis pada gambar, dan ditemukan angka 1,5 hari. Ini memastikan waktu puncak-ke-puncak (lebih kurang) yang 33 jam dari gambar 8.9. Maka dari itu, untuk ruas ini, gunakan

$$x = 0,25 \text{ dan } K = 1,5 \text{ hari}$$

Tabel 8.4 Menurunkan luahan



Gambar 8.10 Gelang simpanan bagi ruas sungai pada contoh 8.2

Bagian 2

Dengan menggunakan nilai x dan K yang diturunkan dari hidrograf, lacak banjir dari tabel 8.4, lajur (2), melewati ruas tadi dan turunkan hidrograf aliran keluaranya.

Mula-mula, hitung C_0 , C_1 dan C_2 dari persamaan 8.5. Gunakan jangka waktu pelacakan $t = 6$, $h = \frac{1}{4}$ hari seperti sebelumnya.

$$C_0 = - \frac{(1,5 \times 0,25) - (0,5 \times 0,25)}{1,5 - (1,5 \times 0,25) + (0,5 \times 0,25)} = - \frac{0,25}{1,25} = -0,2$$

(1) Jam	(2) I ($\text{m}^3/\text{det.}$)	(3) $0,2 I_2$ ($\text{m}^3/\text{det.}$)	(4) $0,4 I_1$ ($\text{m}^3/\text{det.}$)	(5) $0,8 D_1$ ($\text{m}^3/\text{det.}$)	(6) D_2 ($\text{m}^3/\text{det.}$)
0	31	-10,0	12,4	24,8	31,0 ^a
6	50	-17,2	20,0	21,8	27,2
12	86	-24,6	34,4	19,7	24,6
18	123	-29,0	49,2	23,6	29,5
24	145	-30,0	58,0	35,0	43,8
30	150	-28,8	60,0	50,4	63,0
36	144	-25,6	57,6	65,3	81,6
42	128	-22,6	51,2	77,8	97,3
48	113	-19,0	45,2	85,2	106,4
54	95	-15,8	38,0	89,1	111,4
60	79	-13,0	31,6	89,0	111,3
66	65	-11,0	26,0	86,1	107,6
72	55	-9,2	22,0	80,9	101,1
78	46	-8,0	18,4	74,9	93,7
84	40	-7,0	16,0	68,3	85,3
90	35	-6,2	14,0	61,8	77,3
96	31	-5,4	12,4	55,7	69,6
102	27	-5,0	10,8	50,2	62,7
108	25	-4,8	10,0	44,8	56,0
114	24	-4,6	9,6	40,0	50,0
120	23	-4,4	9,2	36,6	45,0
126	22	-	-	-	40,8

^aNilai diandaikan.

Nilai $C_1 = 0,4$ dan $C_2 = 0,8$ yang dihitung dengan cara sama memberikan hasil bahwa $-0,2 + 0,4 + 0,8 = 1,0$. Dari persamaan 8.4

$$D_2 = -0,2I_2 + 0,4I_1 + 0,8D_1$$

I_1 , I_2 , dst. diketahui dari hidrograf banjir berdasarkan hipotesa, tetapi D_1 tidak diketahui. Andaikan nilai $D_1 = I_1 = 31 \text{ m}^3/\text{s}$. Ini akan hampir benar karena sungainya berparas rendah dan akan hampir pada tahana tunak. Maka persamaan pertama yang harus diselesaikan adalah

$$\begin{aligned} D_2 &= -0,2(50) + 0,4(31) + 0,8(31) \\ &= -10,0 + 12,4 + 24,8 = 27,2 \end{aligned}$$

Nilai D_2 ini menjadi D_1 untuk perhitungan berikutnya dan semua nilai itu ditabelkan seperti pada tabel 8.4.

Hidrograf aliran keluar dirajah sebagai garis terputus-putus sedikit di luar puncak pada gambar 8.9.

Keuntungan cara Muskingum adalah bahwa di dalamnya tidak tercakup pengaruh seperti gesekan dan pembauran, yang dapat sangat beragam begitu sungai mencapai keadaan tipe dan kemudian melampauinya. Cara yang juga memasukkan semua pengaruh itu, yang dikenal sebagai cara pembauran, dirancang oleh Hayami [3]. Akan tetapi Cunge [4] menunjukkan bahwa penyelesaian persamaan Muskingum dapat dibuat untuk menghampiri penyelesaian cara pembauran, asal saja nilai K dan x dipilih yang cocok. Pada dasarnya, Cunge mengalihkan caranya dari yang diturunkan atas dasar hidrologi kepada cara yang berdasarkan atas hidraulika. Ia melakukannya dengan menuliskan persamaan Muskingum yang semula dengan bentuk selisih berhingga, dengan mengenali besarnya galat yang masuk dan memberi kemungkinan suku ini untuk mengimak pembauran gelombang banjir ke dalam daerah simpanan di sepanjang ruas itu.

Dalam cara yang diubah ini, yang sekarang disebut cara Muskingum-Cunge, ruas itu terbagi ke dalam sederet anakruas, yang panjang khasnya $L/10$, x sekarang diturunkan untuk setiap anakruas dari persifatan ragawi ruas itu, yaitu kemiringan dasar rerata, lebar alur purata termasuk dataran banjir tempat alirannya membaur, kecepatan rerata gelombang banjir ω , dan luahan puncak rerata. K diandaikan $\Delta L/\omega$. Hidrograf aliran masuk kemudian dilacak seperti sebelumnya, melewati anakruas secara berturut-turut, dengan nilai K dan x berbeda-beda sesuai dengan kecocokan dalam tiap-tiap anakruas.

Untuk uraian yang lebih rinci dan keterangan lebih lanjut mengenai cara ini, pembaca hendaknya memeriksa acuan [5,6].

8.5 Cara pelacakan grafik

Jika persamaan 8.3 ditulis dengan $x = 0$, maka

$$S = KD$$

dan karena, didiferensiasikan

$$\frac{dS}{dt} = K \frac{dD}{dt}$$

dan

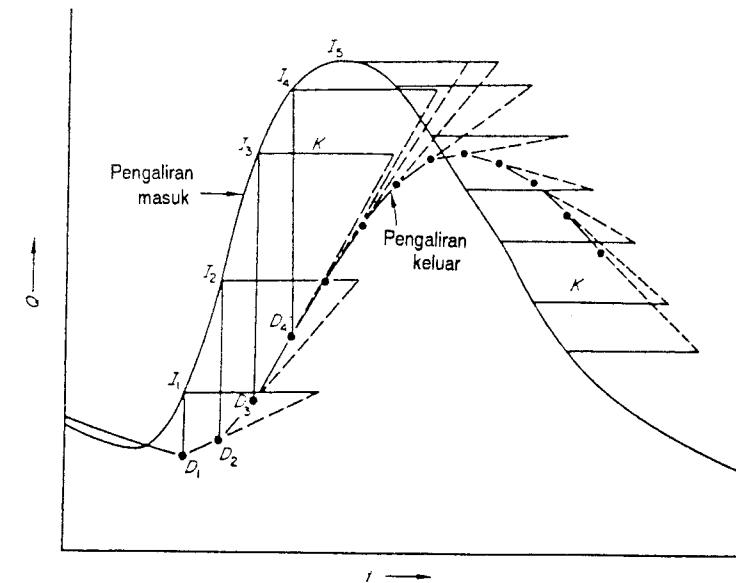
$$I - D = \frac{dS}{dt} \quad (\text{dari pasal 8.2})$$

maka

$$\frac{I - D}{K} = \frac{dD}{dt}$$

Persamaan ini telah digunakan [7] untuk memungkinkan cara pelacakan dengan grafik yang sederhana, karena dD/dt menggambarkan kemiringan hidrograf aliran keluar dan $(I - D)$ serta K adalah besaran yang dapat diukur dalam $m^3/\text{det.}$ dan hari. Gambar 8.11 melukiskan hidrograf aliran masuk I dengan nilai farik I_1, I_2, I_3, \dots yang ditandai dengan selang waktu. Di dalamnya tetapan simpanan K dirajah mendatar dari kedudukan setiap nilai I dan dibuatlah sebuah garis dari ujung garis K ke nilai luahan sebelumnya D . Karena garis ini menggambarkan dD/dt , bagian bawahnya dapat digunakan untuk menyatakan hidrograf aliran keluar yang sebenarnya. Tentu saja, makin kecil selang waktunya, akan makin teliti pula cara yang digunakan, tetapi tidaklah perlu untuk membuat semua selang itu sama.

K dapat diubah-ubah, jika ragamnya diketahui dan dengan mengacu kepada gambar 8.10 dapat diperoleh kesan, bahwa K memang benar-benar dapat besar keragamannya. Nilainya dapat diperoleh dalam hubungan dengan nilai aliran



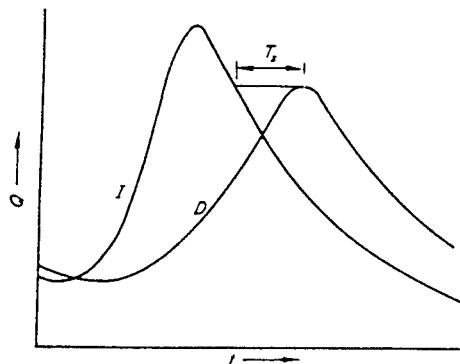
Gambar 8.11 Cara pelacakan dengan grafik

keluar dari gelung simpanan yang demikian itu, yang memberikan lengkung K lawan D seperti terlukis pada gambar 8.13b.

Cara itu juga dapat digunakan sebaliknya, sehingga K setiap saat dapat diperoleh dari hidrograf berbarengan I dan D .

Uraian di depan itu semuanya memenuhi syarat oleh pernyataan pertamanya bahwa $x = 0$; jadi hal itu hanya berlaku bagi kerja waduk yang sederhana saja. Akan tetapi hal itu dapat diluaskan sehingga mencakup pula nilai positif dari x karena pengaruh x yang bertambah, dengan K tetap, adalah untuk memindahkan grafik aliran keluar itu secara keseluruhan ke kanan sehingga nilai puncaknya tidak lagi jatuh pada tungku surutan grafik aliran masuk, dan juga untuk menambah besarnya puncak alirannya.

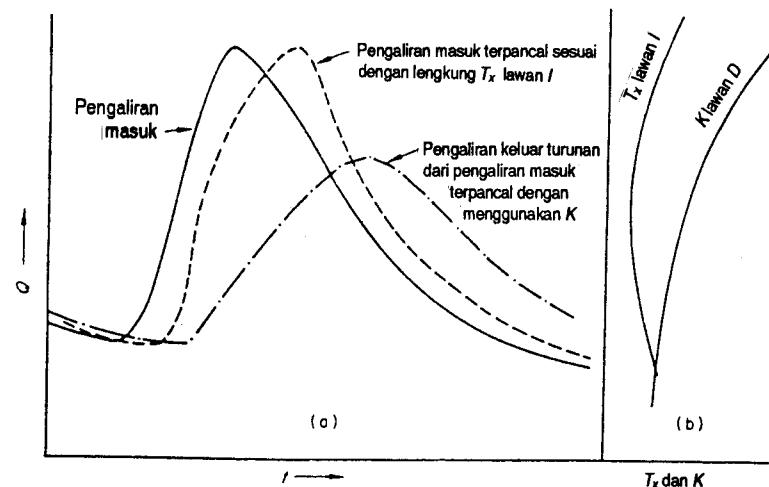
Jika ada banjir bersejarah yang terjadi berturut-turut dianalisis, pancal yang ditimbulkan olehnya dengan x yang bernilai positif, dapat ditentukan. Pancal yang disebabkan olehnya, T_x , diukur dari puncak grafik aliran keluar ke luahan yang sama pada tungku surutan grafik aliran masuk, seperti terlukis pada gambar 8.12 dan dapatlah dibuat rajah yang menghubungkan T_x dengan I yang bersesuaian (gambar 8.13b).



Gambar 8.12 Pancal sebagai akibat tetapan $x > 0$

Sekarang grafik aliran masuk ruas itu dengan $x > 0$ terpental seperti terlukis dalam gambar 8.13; besarnya pancal itu pada setiap cakrawala ditentukan dari T_x terhadap lengkung I , agar diperoleh grafik garis aliran masuk yang terputuh-putus, yang kemudian dilacak dengan cara grafik seperti hal itu seakan-akan aliran masuk waduk yang sederhana. Sering memudahkan kita, untuk merajah keragaman K terhadap D di sepanjang sisi lengkung T_x terhadap

I , sehingga kedua keragaman itu dapat dipertimbangkan dalam rajah yang sama. Uraian lebih lengkap kiat melacak ini dan yang serupa, kini tersedia [8,9].



Gambar 8.13 Pelacakan secara grafik dengan pancal dan K yang berubah-ubah

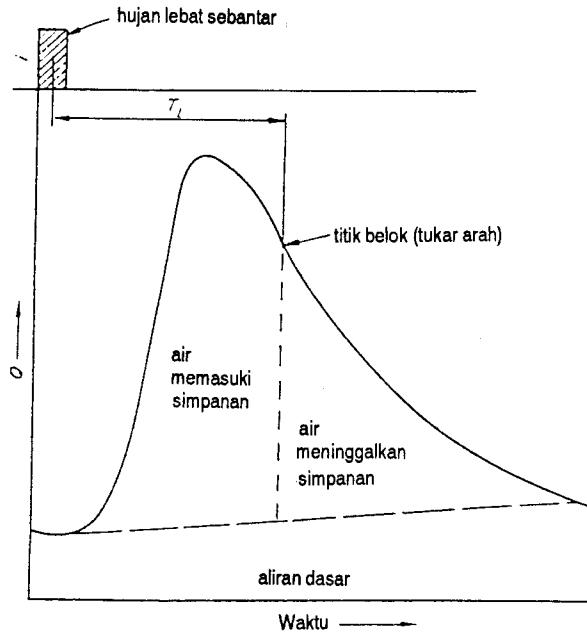
8.6 Hidrograf satuan sintesis dari pelacakan banjir

Asas pelacakan banjir sekarang dapat digunakan untuk menurunkan hidrograf satuan untuk DAS yang tidak memiliki rekaman curah hujan dan limpasan. Caranya tidak seluruhnya bersifat sintesa karena paling tidak harus ada sebuah amatan hidrograf limpasan.

Ambillah DAS sebagai sederet anak-DAS, yang masing-masing, karena guyuran hujan tiba-tiba, memberikan saham aliran masuk ke dalam tata-alur penyalir, yang menyimpan. Maka dari itu, hidrograf satuan sesaatnya terbagi dalam dua bagian, yang pertama menggambarkan aliran masuk dari hujan, dan yang kedua hasil penyusutan berangsur-angsur dari simpanan. Garis pemisah di antara kedua bagian itu dapat diambil untuk mudahnya pada titik balik-arah pada tungku surutan seperti tampak pada gambar 8.14.

Sekarang dibuat andaian, bahwa luahan DAS Q dan simpanan S berbanding lurus, sehingga

$$S = KQ \quad (8.6)$$



Gambar 8.14 Hidrograf dari hujan sebentar memperkirakan HSS

(yaitu, persamaan 8.3 dengan $x = 0$, dan Q digunakan alih-alih D) dan

$$I - Q = \frac{dS}{dt}.$$

Dalam hal ini I menggambarkan aliran masuk yang terhasil dari hujan sesaat. Karena $dS/dt = K dQ/dt$, dengan mendiferensiasi persamaan 8.6, maka

$$K \frac{dQ}{dt} = I - Q$$

dengan menggunakan syarat $Q = 0$ ketika $t = 0$, maka persamaan itu dapat diselesaikan menjadi

$$Q = I(1 - e^{-t/K})$$

Karena pengaliran masuk terhenti pada titik balik-arah pada (katakan saja) waktu T , maka aliran keluar pada waktu t dalam luahan Q_T pada T dinyatakan sebagai

$$Q_t = Q_T e^{-(t-T)/K} \quad (8.7)$$

Koefisien simpanan K harus dibuat dari hidrograf yang teramati di DAS, seperti terlukis pada gambar 8.15, dengan mengambil dua nilai satuan waktu yang terpisah pada titik tukar-arah. Hidrograf itu haruslah dari waktu hujan yang menyendiri. Besarnya hujan tidaklah harus diukur, tetapi yang perlu, bahwa hujan itu cukup pendek, katakan saja hanya 1 jam. Maka

$$Q_1 = Q_T \text{ dan dari persamaan 8.7 } Q_2 = Q_T e^{-(t-T)/K}$$

$$\text{daerah yang diarsir } A = \int_{t = T}^{t = T + 1} Q_T e^{-(t-T)/K} dt$$

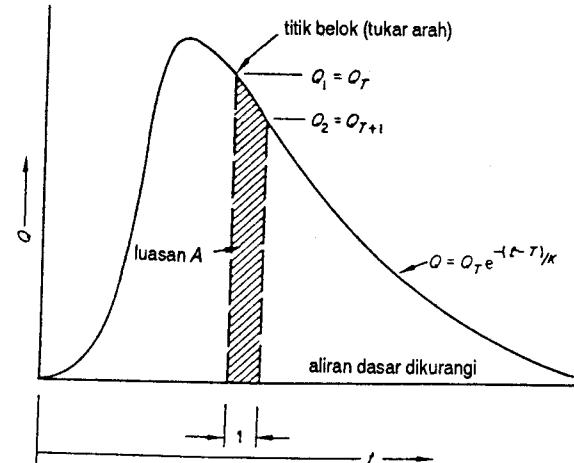
Maka

$$\begin{aligned} A &= \left[-K Q_T e^{-(t-T)/K} \right]_0^1 \\ &= K (Q_T - Q_T e^{-1/K}) \end{aligned}$$

$$\text{jadi } A = K(Q_1 - Q_2)$$

Pengamatan kedua yang harus dilakukan dari hidrograf yang teramati itu ialah pancal DASnya (T_L); yaitu, waktu tempuh maksimum melewati DAS.

Ini dapat diambil sebagai waktu dari pusat massa hujan penyebabnya (jadi syaratnya: hujan itu harus singkat - sehingga di sini tidak terbawa galat besar) ke titik tukar-arah pada tungku surutan.



Gambar 8.15 Menentukan K

Simpanan DAS sekarang dipandang sebagai waduk yang dasarnya hipotesa, yang terdapat pada titik aliran keluar; aliran masuknya dinyatakan sebagai grafik waktu-luasan DAS itu, dengan setiap anak-DASnya diberi batas sedemikian rupa sehingga semua hujan yang jatuh sesaat padanya memiliki waktu tempuh yang sama ke titik aliran keluar, seperti terlukis pada gambar 8.16. Grafik waktu-luasan (I) sekarang memiliki hujan satuan sesaat yang digunakan kepadaanya dan dilacak melewati waduk tersebut, dengan cara yang ada pada pasal 8.3, dan aliran keluarnya (Q) diturunkan. Aliran keluar itu menggambarkan hidrograf satuan sesaat bagi DAS itu dan dapat diubah, kalau diperlukan, ke hidrograf satuan n -jam.

Pada dasarnya, cara ini mengikuti Clark [10], meskipun K ialah seperti yang diturunkan oleh O'Kelly [11]. Dalam beberapa hal, cara ini memang dapat disanggah, dan sekarang terdapat berbagai kiat yang lebih maju [12–15], tetapi ada keuntungannya karena cara itu nisbi sederhana. Untuk menurunkan orang tidak bergantung pada hidrograf teramat yang kehebatannya sama dengan hidrograf satuan.

Keuntungan yang lain ialah bahwa alih-alih menurunkan hidrograf satuan sesaat (dan karena itu juga hidrograf n -jamnya), hujan rencana dapat digunakan secara langsung pada grafik waktu-luasananya, dengan keragaman luasan dan dalam jumlah yang mana pun yang dikehendaki. Ini menghasilkan hidrograf badiarencana sesaat, yang dengan segera dapat diubah ke hidrograf rencana-badi yang berkelebatan seperti dikehendaki dengan mereratakan ordinat seperti dibicarakan di atas.

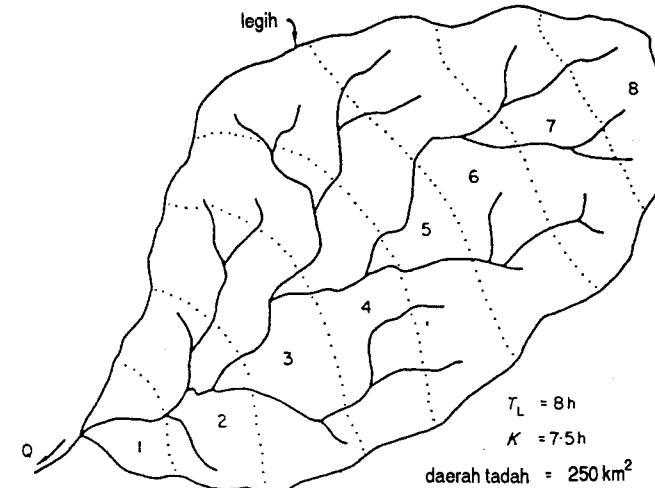
Sebuah contoh yang telah dikerjakan terdapat di bawah ini.

Contoh 8.3 Diketahui DAS pada gambar 8.16 seluas 250 km^2 , dan dari keterangan yang diturunkan dari hidrograf hujan singkat didapat $T_L = 8 \text{ jam}$ dan $K = 7,5 \text{ jam}$; turunkanlah hidrograf satuan 2 jam.

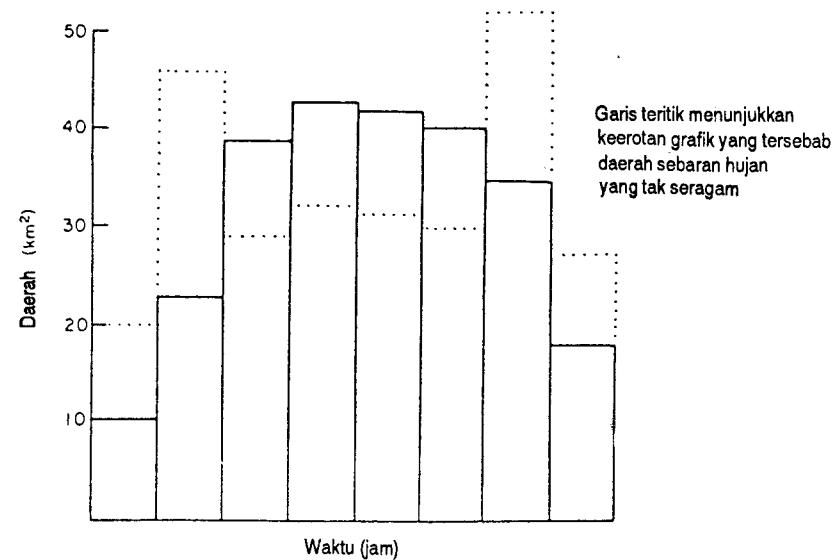
- 1 Bagilah DAS itu dalam delapan bagian yang berdasar jam dengan *isokron*, yaitu garis dengan waktu tempuh yang sama. Diandaikan, bahwa semua limpasan permukaan yang jatuh pada salah satu di antara ke delapan bagian itu tiba pada kala 1 jam pada titik penyukatan.
- 2 Ukurlah dengan planimeter luas setiap daerah yang dasarnya jam-jaman.

Daerah yang terlukis pada gambar adalah

Jam	1	2	3	4	5	6	7	8
Daerah (km^2)	10	23	39	43	42	40	35	18



Gambar 8.16 DAS dengan isokron



Gambar 8.17 Sebaran anakdaerah atau grafik waktu-luasan

- 3 Gambarlah grafik sebaran untuk limpasan tadi dengan menggunakan anakdaerah sebagai ordinat dan selang 1 jam itu sebagai absis. Hasilnya adalah gambar 8.17 – *grafik waktu-luasan* yang terlukis dengan garis penuh.

- 4 Grafik waktu-luasan ini sekarang diperlakukan sebagai aliran masuk I sebagai akibat hujan bersih satuan sebesar 1 cm pada DAS sebuah waduk yang dasarnya hipotesa, yang terdapat pada titik pengeluarannya, dengan simpanan sama dengan simpanan DAS. Maka

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \cdot t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \cdot t = S_2 - S_1 \quad (\text{dari persamaan 8.1})$$

dan

$$S_1 = KQ_1 \quad \text{dan} \quad S_2 = KQ_2 \quad (\text{dari persamaan 8.6})$$

Dari kedua persamaan ini

$$Q_2 = m_0 I_2 + m_1 I_1 + m_2 Q_1$$

dalam hal ini

$$m_0 = \frac{0,5t}{K + 0,5t} \quad m_1 = \frac{0,5t}{K + 0,5t} \quad m_2 = \frac{K - 0,5t}{K + 0,5t}$$

dan karena yang sedang digunakan grafik sebaran dan $I_1 = I_2$, maka

$$Q_2 = m'I + m_2 Q_1$$

di sini

$$m' = \frac{t}{K + 0,5t}$$

dan dalam hal ini

$$m' = \frac{1}{7,5 + 0,5} = \frac{1}{8} = 0,125$$

dan

$$m_2 = \frac{7,5 - 0,5}{7,5 + 0,5} = \frac{7}{8} = 0,875$$

Jadi

$$Q_2 = 0,125I + 0,875Q_1$$

- 5 Tabelkan semua data dan hitunglah Q_2 seperti pada tabel 8.5. Q_2 adalah hidrograf satuan sesaat sintesis yang diperlukan. Hitunglah tetapan untuk mengubah itu bagi lajur (3).

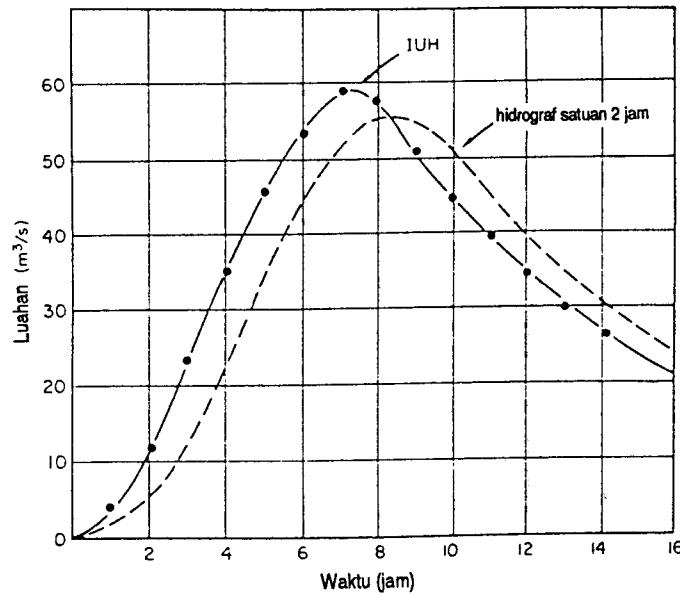
$$1 \text{ cm hujan pada } 1 \text{ km}^2 \text{ selama } 1 \text{ jam} = \frac{10^6 \times 10^{-2}}{3600} = 2,78 \text{ m}^3/\text{det.}$$

- 6 Rajah hidrograf satuan sesaat dan hidrograf satuan 2 jam pada tabel 8.5, lajur (5) dan (6) sebagai gambar 8.18

Untuk melukiskan betapa mudahnya cara ini dalam menampung keragaman curah hujan dalam suatu daerah, andaikan hujan hipotesa itu ditentukan sebagai 20 mm pada anakdaerah 1 dan 2, 7,5 mm pada 3, 4, 5 dan 6, dan 15 mm pada anak daerah 7 dan 8, yang semua tercurah dalam 1 jam. Kiat yang dipakai itu kemudian dengan mudah mengubah grafik waktu-luasan dengan perbandingan tersebut, seperti diperlihatkan dengan garis grafik terputus-putus pada gambar 8.17 sebelum langkah pelacakan menurunkan hidrograf satuan sesaat seperti sebelumnya, dan setelah itu mengubahnya menjadi hidrograf satuan n -jam dengan jalan mereratakan setiap pasang koordinat pada jarak n -jam. Dalam hal yang terakhir ini, ada sedikit kebebasan dalam menggunakan istilah hidrograf satuan sesaat dan hidrograf satuan karena curah hujannya tidaklah seragam dan meliputi seluruh DAS seperti dipersyaratkan berdasarkan batasannya.

Table 8.5 Hidrograf satuan sesaat dengan pelacakan

(1) Waktu (jam)	(2) Diagr. waktu- luasan (km ²)	(3) 0,125I = 2,78x0,125 x laj (2) (m ³ /det.)	(4) 0,875 x laj (5) (m ³ /det.)	(5) Q = laj. (3) + laj. (4) HSS (m ³ /det.)	(6) Hidrogr. satuan (m ³ /det.)
0	0	0	0	0	0
1	10	3,5	0	3,5	
2	23	8,0	3,1	11,1	5,5
3	39	13,5	9,7	23,2	13,4
4	43	14,9	20,3	35,2	23,1
5	42	14,6	30,8	45,4	34,3
6	40	13,9	39,6	53,5	44,3
7	35	12,1	46,8	58,9	52,2
8	18	6,2	51,4	57,6	55,5
9	0	0	50,5	50,5	54,7
10	0	0	44,1	44,1	50,8
11	0	0	39,6	39,6	45,1
12	0	0	34,6	34,6	39,3
13	0	0	30,2	30,2	34,9
14	0	0	26,4	26,4	30,5
15	0	0	dst.	dst.	dst.



Gambar 8.18 HSS turunan dan hidrograf 2 jam

Acuan

- 1 McCarthy, G.T., The unit hydrograph and flood routing. Makalah tak diterbitkan yang disajikan pada Konferensi North Atlantic Division, Corps of Engineers, U.S Army, New London, Connecticut, 24 Juni 1938, Dicetak oleh U.S. Eng. Office, Providence, Rhode Island
- 2 Carter, R.W. dan Godfrey, R.G. Storage and Flood Routing, *U.S. Geological Survey Water Supply paper 1543-B*, 1960, h.93
- 3 Hayami, S. On the propagation of flood waves, *Bulletin 1. Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, Jepang, 1951
- 4 Cunge, J.A. On the subject of a flood propagation method. *J. Hydrol. Res.*, 7, No. 2 (1969), 205–30
- 5 Price, R.K., Flood routing methods for British rivers, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 55 (1973) 913–30
- 6 Natural Environment Research Council. *Flood Studies Report*, Vol. III, NERC. 1975, Lampiran 5.2

- 7 Wilson, W. T. A graphical flood routing method. *Trans. Am. Geophys. Union*, 21, Parwa 3 (1941) 893
- 8 Kohler, M. A. Mechanical analogs aid graphical flood routing. *J. Hydraulics Div.*, 84 (April 1958)
- 9 Lawler, E. A. Flood routing. *Handbook of Applied Hydrology* (ed. Ven Te Chow), McGraw-Hill, New York, 1964, Section 25-II
- 10 Clark, C. O. Storage and the unit hydrograph. *Trans Am. Soc. Civ. Eng.*, 110 (1945) 1419
- 11 O'Kelly, J. J. The employment of unit hydrographs to determine the flows of Irish arterial drainage channels. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Parwa III, (1955) 365
- 12 Nash, J. E. Determining runoff from rainfall. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 10 (1958) 163
- 13 Nash, J. E. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *J. Geophys. Res.*, 64 (1959) 111
- 14 Nash, J. E. A unit hydrograph study, with particular reference to British catchment. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 17 (1960) 249
- 15 Ven Te Chow. *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1964, Section 14

Bacaan lebih lanjut

- O'Donnell, T. A. Direct three-parameter Muskingum procedure incorporating lateral inflow. *Hydrol. Sci. J.*, 30, No.4 (1985) 479
- O'Donnell, T., Pearson, C. P., dan Woods, R. A. An improved three-parameter Muskingum routing procedure. *J. Hydraulic Engineering ASCE*, 114 (1987) 5
- Price, R. K. A comparison of four numerical methods for flood routing. *J. Hydraulics Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 100, HY7 (1974) 879–99
- Thomas, I. E. dan Wormleaton, P. R. Finite difference solution of the flood diffusion equation. *J. Hydrol.*, 12 (1971) 211–21

Soal

- 8.1 Sebuah DAS dapat dibagi menjadi sepuluh anak-DAS dengan isokron lewat cara dalam tabel di bawah, dan panjang DASnya, T_L , adalah 10 jam:
- | Jam | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| Luasan (km^2) | 14 | 30 | 84 | 107 | 121 | 95 | 70 | 55 | 35 | 20 |
- Yang tersedia hanya sebuah rekaman banjir dan dari angka itu ditemukan koefisien simpanannya $K = 8 \text{ jam}$. Turunkan hidrograf satuan 2 jam untuk DAS itu.
- 8.2 Yang tertabel di bawah ini adalah aliran masuk ke dalam ruas sungai yang memiliki tetapan simpanan $K = 10 \text{ jam}$ dan $x = 0$:

Waktu (jam)	I ($\text{m}^3/\text{det.}$)	Waktu (jam)	I ($\text{m}^3/\text{det.}$)
0	28,3	40	90,6
5	26,9	45	70,8
10	24,1	50	53,8
15	62,3	55	42,5
20	133,1	60	34,0
25	172,7	65	28,3
30	152,9	70	24,1
35	121,8		

Temukan secara grafik puncak aliran keluarannya dalam waktu dan besaran. Apakah pengaruhnya untuk membuat $x > 0$? Andaikan aliran keluar pada pukul 11 adalah $28,3 \text{ m}^3/\text{det.}$ dan mulai naik.

- 8.3 Badai di atas DAS yang terlukis pada gambar di bawah membangkitkan secara berbarengan hidrograf pada A dan B seperti disenaraikan di bawah:



Gambar

Jam	Q($\text{m}^3/\text{det.}$)	Jam	Q($\text{m}^3/\text{det.}$)
0	10	24	91
3	35	27	69
6	96	30	54
9	163	33	41
12	204	36	33
15	210	39	27
18	190	42	24
21	129		

Gunakan kiat pelacakan aliran sungai mengikuti Muskingum untuk menentukan luahan maksimum tergabung di C. Waktu tempuh bagi pusat massa nanir antara A dan C adalah 9 jam dan faktor $x = 0,33$. Adanya aliran masuk setempat diabaikan.

- 8.4 Tentukan hidrograf sesaat sebuah DAS, dan uraikan bagaimanakah kita dapat menggunakanya untuk menurunkan hidrograf satuan n -jam.

Sebuah DAS luas seluruhnya 400 km^2 dan tersusun dari anak-DAS yang dibatasi oleh isokron yang ditabelkan di bawah:

Anak-daerah dibatasi oleh isokron (jam)	Luasan (km^2)
1	15
2	30
3	50
4	75
5	80
6	60
7	45
8	25
9	20

Dari hidrograf badai yang singkat diketahui, bahwa $T_L = 9 \text{ jam}$ dan koefisien simpanannya $K = 5,5 \text{ jam}$. Turunkan hidrograf satuan 3 jam.

- 8.5 Yang disenaraikan di bawah adalah hidrograf aliran- masuk badai untuk sebuah waduk yang penuh, yang mempunyai pelimpah tak terkendali untuk melepaskan air banjir:

Selang 3jam	m ³ /det.	Selang 3jam	m ³ /det.
0	1,5	12	54
1	156	13	45
2	255	14	40
3	212	15	34
4	184	16	28
5	158	17	23
6	136	18	17
7	116	19	11
8	99	20	8,5
9	85	21	5,5
10	74	22	3,0
11	62		

Tentukan hidrograf aliran keluar untuk jangka waktu 48 jam setelah mulainya badai. Andalkan aliran keluar sebesar 1 m³/det. pada waktu 0. Ciri simpanan dan aliran keluar waduk dan pelimpahnya ditabelkan di bawah:

Ketinggian di atas mercu (m)	Simpanan (m ³ × 10 ⁶)	Aliran keluar pelimpah (m ³ /det.)	Ketinggian di atas mercu (m)	Simpanan (m ³ × 10 ⁶)	Aliran keluar pelimpah (m ³ /det.)
0,2	0,30	1,21	3,0	6,80	70,15
0,4	0,62	3,42	3,2	7,38	77,28
0,6	0,96	6,27	3,4	7,98	84,64
0,8	1,35	9,66	3,6	8,60	92,21
1,0	1,70	13,50	3,8	9,25	100,00
1,2	2,10	17,75	4,0	9,90	108,00
1,4	2,57	22,36	4,2	10,50	116,20
1,6	3,00	27,32	4,4	11,21	124,60
1,8	3,52	32,60	4,6	11,90	133,19
2,0	4,05	38,18	4,8	12,62	141,97
2,2	4,57	44,05	5,0	13,35	150,93
2,4	5,10	50,19	5,2	14,10	160,08
2,6	5,68	56,60	5,4	14,88	169,40
2,8	6,22	63,25			

- 8.6 Tunjukkan dengan buram bagaimakah dasar kiat melacak Muskingum, setidaknya pada hasil pengamatan sekali banjir yang melewati sebuah ruas sungai. Bandingkan kiat itu dengan pelacakan waduk untuk menerangkan, bagaimana dan mengapa kedua kiat itu berbeda.

Tentukan luahan maksimum yang mungkin untuk ruas sungai yang hidrograf aliran masuknya seperti disenaraikan di bawah, dan tetapan x dan K dari persamaan pelacakannya adalah $x = 0,20$ dan $K = 9$ jam.

Jam	Q(m ³ /det.)	Jam	Q(m ³ /det.)
0	40	18	220
2	52	20	180
4	132	22	150
6	218	24	120
8	294	26	96
10	322	28	80
12	324	30	68
14	308	32	60
16	264	34	54

- 8.7 Hidrograf di bawah ini teramat pada sebuah sungai sebagai akibat hujan satu jam dengan kelebatan seragam, dengan aliran dasar yang telah ditaksir dan dikurangkan:

Jam	Q(m ³ /det.)	Jam	Q(m ³ /det.)
0	0	8	603
1	40	9	582
2	120	10	540
3	265	11	467
4	405	12	385
5	515	13	306
6	580	14	232
7	607	15	167

DAS yang menyebabkan aliran ini terbagi ke dalam anak-DAS oleh isokron dan daripadanya telah diturunkan hubungan waktu-luasan yang berikut ini:

Jam	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Luasan (km ²)	25	40	80	200	340	300	220	170	110	50	20

Jika diketahui $Q_2 = m'I + m_2 Q_1$ dengan $m' = t/(K + \frac{1}{2}t)$ dan $m_2 = (K - \frac{1}{2}t)/(K + \frac{1}{2}t)$, turunkan hidrograf satuan 1-jam untuk DAS itu dan ditentukan Q_p dan t_p .

Taksirlah hujan bersihnya yang menyebabkan hidrograf aslinya.

- 8.8 Persamaan pelacakan Muskingum $S = K(xI + (1-x)D)$ berlaku untuk ruas sebuah sungai. Tunjukkan cara penurunan tetapan x dan K .
 Jika nilai untuk ruas tertentu adalah $K = 9$ jam dan $x = 0,30$, ramalkan hidrograf aliran keluar dari ruas itu jika hidrograf aliran masuk itu adalah sbb.:

Jam	0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42 45 48
Jam	6 5 17 48 81 102 105 103 95 64 45 34 27 20 16 13 12

9

Prakiraan hidrologi

9.1 Pendahuluan

Dalam sejumlah bab sebelum ini berbagai proses alam yang terlibat dalam daur hidrologi telah disebut satu demi satu dan dipelajari dengan rinci. Cara untuk menilai setiap proses itu telah disarankan dan sering pula dijelaskan, dan kiatnya dibahas sehingga banyak di antara pertanyaan itu memperoleh jawaban yang dapat dinyatakan dengan angka.

Masalah yang tersisa yang harus ditangani sekarang ialah, cara menggunakan pengetahuan itu untuk memprakirakan dari data yang tersedia, betapa pun sedikit jumlahnya, apa yang akan terjadi kelak. Ini merupakan masalah dasar dalam semua periptaan (perencanaan) kerekayasaan, karena pihak insinyur meripta dan membangun sesuatu untuk kebutuhan masa depan; pada dasarnya sama saja, apakah yang bersangkutan adalah seorang insinyur bangunan yang meripta perkantoran, insinyur listrik yang meripta sistem penyediaan daya untuk memenuhi tuntutan akan daya listrik di masa datang, entah insinyur bangunan air, yang meripta waduk untuk memenuhi tuntutan kebutuhan air masa mendatang.

Ada satu hal yang berbeda sama sekali di antara ketiga ihwal itu. Sang insinyur bangunan bekerja dengan bahan yang serbasama; kelakuan bahan itu diketahuinya sampai batas yang sekecil-kecilnya. Bangunan yang dibuatnya kelak digunakan oleh orang, yang ruang, ukuran, bobot dan kelakuannya, secara keseluruhan, dapat diprakirakan cukup cermat. Peristiwa alam yang harus ia atasi hanya berupa beban angin, yang biasanya merupakan bagian kecil dari beban seluruhnya, dan gempabumi. Untuk kedua kemungkinan itu, ada peraturan dan ketentuan yang tersedia baginya.

Peripta sistem penyediaan daya harus mengekstrapolasi lengkung kebutuhan daya dari beberapa tahun terakhir; ia harus meneliti arah kecenderungan industri

dan kebiasaan orang. Atas dasar semua itu, ia harus memutuskan, berapa banyakkah daya yang harus disediakan pada tahun-tahun selanjutnya. Meskipun ini merupakan tugas yang rumit dan harus dilakukan secara terus-menerus, tetapi hal itu hampir sama sekali kebal terhadap peristiwa alam kecuali bencana, dan mengenai yang terakhir ini, orang tak dapat berharap ia memiliki kemampuan untuk menangkalnya.

Berbeda sama sekali dengan yang dihadapi oleh insinyur bangunan air yang harus meripta sebuah waduk. Ia hampir-hampir hanya berhadapan dengan peristiwa alam: terjadinya pencurahan hujan, penguapan, dst. Semua kejadian itu umumnya bersifat *acak* dan dapat memiliki nilai nirnafi (*non-negative*) yang mana pun atau semuanya memiliki nilai yang demikian itu. Adalah benar, andaikata saja curah hujan di suatu tempat diukur setiap hari selama jangka waktu tertentu, orang akhirnya dapat mengetahui mengenai peluang curah hujan harian. Bagaimana pun, betapa lama pengukuran itu dilakukan, hal itu tidak akan menghasilkan nilai curah hujan harian tertentu yang mungkin merupakan nilai batas, kecuali nilai yang timbul dari hati kita.

Pihak hidrologi sering ditanya, berapa besarkah kiranya luahan maksimum yang mungkin terjadi pada suatu sungai. Untuk mudahnya, tidak ada nilai yang demikian itu. Satu-satunya jawaban yang dapat diberikan adalah yang berikut: dari data yang tersedia, dan atas dasar berbagai andaian, kiranya nilai tertentu tidak akan terlampaui, secara rerata, lebih dari sekali selama sekitar tahun. Itulah dasar taksiran yang harus digunakan bagi semua periptaan dalam hidrologi, dan bab ini membahas berbagai cara yang dapat menyinjirkan beberapa di antara ketidakpastian itu, atau yang dapat menyempitkan rentangannya.

9.2 Beberapa rumus banjir

9.2.1 Rumus DAS Peubah acak khusus luahan banjir sungai sudah menarik para insinyur dan hidrologi sejak awal adanya ilmu hidrologi. Sejak itu pula, orang telah mengajukan banyak rumus yang menentukan ‘banjir terbesar’ yang kiranya dapat terjadi di DAS tertentu. Semua rumus itu sifatnya empiris, dan diturunkan dari banjir yang teramat di DAS tertentu dan biasanya berbentuk

$$Q = CA^n$$

di sini Q = luahan banjir dalam $m^3/det.$ (atau $kaki^3/det.$)

A = luas DAS, dalam km^2 (atau mil^2)

n = angka penunjuk, biasanya antara 0,5 dan 1,25

C = koefisien, yang bergantung pada iklim, DAS, dan satuan.

Sebuah contoh dini dari rumus yang demikian itu diusulkan oleh Dickens yang dikembangkan di India.

$$Q = 825a^{0,75}$$

Di sini Q dinyatakan dalam $kaki^3/det.$ dan a dalam mil persegi. Tetapi karena tidak mempertimbangkan kelengasan tanah, curah hujan, lereng, ketinggian dst., rumus itu jelas tidak banyak artinya dalam pemakaian secara umum. Ini merupakan kenyataan yang menyangkut semua rumus yang demikian itu, meskipun orang sering menggunakan untuk memperoleh taksiran cepat pertama mengenai tingkat ‘banjir terbesar’ yang dapat diharapkan. Untuk keperluan yang demikian itu, Morgan [1] mengusulkan rumus bagi banjir pembawa bencana di Skotlandia dan Wales sbb.:

$$Q = 3000M^{0,5}$$

Di sini Q dinyatakan dalam $kaki^3/det.$ dan M adalah luas DAS dalam mil persegi, dan ditambah dengan ‘kiat mutakhir’ berupa perulangan T (dalam tahun) dengan memberi contoh

$$\text{banjir ripta (rencana)} = \text{banjir bencana} \times (T/500)^{1/3}$$

untuk kejadian yang tidak membenarkan penggunaan banjir bencana karena bahaya terhadap hidup manusia dan keamanan bendungan. Rumus serupa dari jenis yang sama, usulan Fuller, banyak digunakan orang di Amerika Serikat:

$$Q_{av} = CA^{0,8}$$

Di sini A adalah luas DAS dalam mil persegi

C koefisien, yang sering diambil sebesar 75

Q_{av} nilai rerata luahan banjir tahunan dalam $kaki^3/det.$

Nilai Q_{av} kemudian disulihkan dalam rumus ini

$$Q_m = Q_{av}(1 + 0,8 \log T)$$

di sini T ialah masa ulang dalam tahun dan Q_m ialah banjir tahunan terbesar ‘yang paling mungkin’.

9.2.2 Cara kesebandingan (cara rasional) Memasukkan curah hujan ke dalam rumus memberi kemungkinan untuk berharap bahwa rumus itu menjadi lebih baik. Hal ini didasarkan pada pemikiran, bahwa ada hubungan antara curah hujan dan limpasan (lihat gambar 6.7).

Pada masa lampau, adanya hubungan langsung sejenis ini, antara limpasan dan curah hujan, telah digunakan orang untuk menentukan luahan banjir. Mulvaney [2] adalah orang pertama yang mengusulkan gagasan ini dalam karyanya pada penyaliran di jalan raya Irlandia. Itu pulalah yang merupakan dasar cara Lloyd-Davis dalam meripta saluran limbah [3] dan cara Bransby-Williams untuk menaksir banjir di India [4]. Penggunaannya terus berlangsung hingga sekarang ini, karena sederhananya.

Semua rumus itu memiliki bentuk

$$Q_p = CiA$$

Di sini i = kelebatan curah hujan dalam waktu t

A = luas DAS

t_c = waktu kumpul, yaitu waktu yang diperlukan hujan yang tercurah di DAS yang paling jauh dari tempat penyukatan, untuk sampai ke titik itu

C = koefisien limpasan, tanmatra, yang nilainya bergantung pada sifat DAS

Q_p = luahan puncak sebagai akibat badai hujan tertentu, dan diandaikan terjadi setelah waktu t_c ketika seluruh DAS memberi sahamnya (dari sini berarti, bahwa hujan itu diandaikan seragam di seluruh DAS dan berlangsung paling tidak selama t_c).

Bransby-Williams memberikan rumus untuk lamanya curahan hujan ripta (hujan rencana) D (dalam jam)

$$D = t_c = \frac{L}{d} \sqrt[5]{\left(\frac{a^2}{h}\right)} .$$

Di sini L = jarak terbesar dari tepi DAS ke mulut DAS

d = garis tengah lingkaran dengan luas yang sama dengan luas DAS (Maka, L/d merupakan koefisien kelingkaran tanmatra)

a = luas DAS dalam mil persegi

h = lereng alur (sebagai persenan) mengikuti panjang yang terbesar

t_c = waktu kumpul dalam jam.

Jika i dalam inci/jam, dan A dalam acre, maka Q_p adalah dalam kaki³/det.

Serupa dengan itu, jika i dalam mm/jam, dan A dalam km², maka Q_p adalah dalam m³/det. Agar dimungkinkan untuk menggunakan nilai C yang sama, maka harus dimasukkan faktor peminda (koreksi) sebesar 0,278. Jadi,

$$Q_p (\text{kaki}^3/\text{det.}) = Ci(\text{inci}/\text{jam}) A(\text{acre})$$

jadi,

$$Q_p (\text{m}^3/\text{det.}) = 0,278 Ci(\text{mm}/\text{jam}) A(\text{km}^2)$$

Banyak nilai yang digunakan orang untuk C , dari 0,1 hingga 0,9 bergantung pada sifat DAS-nya. Tetapi karena limpasan juga bergantung pada kelebatan dan lamanya badai, kebasahan DAS dst., cara itu hanya mempunyai arti yang terbatas, kecuali jika tersedia data mengenai DAS yang khusus. Maka nilai itu dapat digunakan untuk menginterpolasi atau mengekstrapolasi sampai batas, data itu.

Akan tetapi ada suatu pemakaian khusus *Cara Kesebandingan* atau *Cara Rasional* ini, yang kadang-kadang mengambil C sebesar 1,0, yaitu untuk ‘tanah’ yang sama sekali kedap. Hal itu digunakan orang dalam periptaan tata-riol dalam kota yang dibicarakan dalam bab 10.

Perbandingan *Cara Kesebandingan* dengan cara yang tercantum dalam Laporan Penelitian Banjir [5] menunjukkan, bahwa *Cara Kesebandingan* secara khas menghasilkan sekitar dua kali puncak banjir LPB untuk DAS di dataran, dan lebih tinggi lagi, bila DAS makin kecil dan makin datar.

9.2.3 Rumus parameter DAS Rumus yang lebih canggih dibahas oleh Farquharson dr. [6]. Rumus itu didasarkan pada taksiran aliran maksimum bagi 80 DAS di Inggris Raya dengan cara hidrograf satuan dan setelah itu dihubungkan dengan sifat DAS.

Banjir maksimum tertaksir (BMT, *estimated maximum flood, EMF*) dinyatakan dengan

$$EMF = 0,835 \text{ AREA}^{0,878} \text{ RSMD}^{0,724} \text{ SOIL}^{0,533} (1+\text{URBAN})^{1,308} S1085^{0,162}$$

(batasan semua peubah ini dibicarakan dalam pasal 9.4).

Rumus ini memperhitungkan luas DAS, iklim, curah hujan,, kemiringan alur penyalir, dan kelulusan tanah di permukaan, termasuk daerah yang mana pun yang dapat dibangun.

Keuntungan besar rumus umum ini adalah kesederhanaan dan mudahnya untuk digunakan, tetapi semuanya terbatas artinya, karena hanya berlaku bagi daerah terturunkan. Rumus itu dalam banyak hal diturunkan dari sederetan terbatas, kejadian yang terekam, dan merupakan taksiran ‘bungkus’ untuk sembiran aman taktertentu. Semuanya tak memiliki kecermatan yang dapat diperoleh dari cara yang lebih halus, dan hanya dapat digunakan untuk taksiran sementara saja.

9.3 Analisis kekerapan

9.3.1 Deret kejadian Pendekatan selanjutnya adalah menggunakan cara statistika untuk meluaskan data; jadi, memprakirakan kekerapan yang mungkin, akan munculnya kejadian alam. Andaikata saja ada rekaman yang memadai, cara statistika akan dapat menunjukkan, bahwa banjir dengan kebesaran tertentu dapat, secara rerata, diharapkan terjadi setiap tahun, sekali dalam 10 tahun, sekali dalam 100 tahun, dst. Penting untuk disadari, bahwa melanjutkan cara itu hanya absah sejauh data yang digunakan itu juga absah. Memang dapat dipertanyakan, apakah *ada* cara yang cukup handal untuk mengekstrapolasi sampai 100 tahun, jika didasarkan atas (katakan saja) rekaman 30 tahun. Lebih-lebih lagi hal itu menjadi masalah, jika diterapkan pada ‘banjir 1000-tahunan’, dan taksiran serupa.

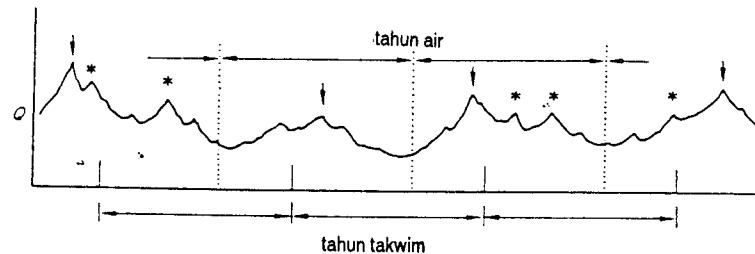
Pokok yang lain untuk diberi tekanan adalah khuluk tak berdaurnya kejadian acak (lihat juga pasal 9.6). Banjir 100-tahunan (yaitu, banjir yang akan terjadi *secara rerata*, sekali dalam 100 tahun) dapat terjadi tahun depan, atau tidak dalam 200 tahun mendatang, atau dapat terlampaui yaitu beberapa kali dalam 100 tahun mendatang. Ketelitian taksiran nilai (katakan saja) banjir 100 tahun itu bergantung pada berapa lama rekaman itu, dan untuk aliran banjir, orang sudah beruntung jika memiliki rekaman yang lebih dari 30 tahun. Meskipun ada peringatan itu, analisis kekerapan dapat besar gunanya dalam penafsiran dan pengajukan peristiwa seperti aliran banjir dan kerugian jika terjadi, dalam jangka waktu tertentu.

Sangatlah penting untuk memberi batasan kepada apa yang dimaksud dengan kejadian atau peristiwa. Sebagai misal, sebuah sungai telah disukat setiap hari selama 10 tahun, maka diperolehlah 3650 amatan. Kejadian itu bukanlah kejadian acak bebas, karena aliran pada hari yang mana pun bergantung sampai batas tertentu pada aliran pada hari sebelumnya; jadi amatan itu tidaklah terdiri dari *deret bebas*. Susunan seperti itu diistilahkan *deret penuh*.

Andaikan kejadian maksimum itu dipungut dari rekaman setiap tahun dari yang 10 tahun itu. Hal itu akan membentuk sebuah deret bebas, karena sangatlah tidak mungkin bahwa aliran maksimum suatu tahun akan terpengaruh oleh aliran maksimum tahun sebelumnya. Meskipun demikian, orang perlu berhati-hati, seperti terlihat pada gambar 9.1. Di dalamnya ditandai *tahun air*, yang diukur antara dua musim dengan aliran terkecil, dan juga *tahun takwim*. Satu tahun takwim mungkin saja mengandung dua puncak tahun-air; jadi perlu disebutkan, bahwa untuk memberi batasan kejadian, tahun-airlah yang harus digunakan. Pilihan seperti ini disebut *deret tahunan*. Deret yang demikian itu mungkin ditolak orang, karena beberapa di antara puncak itu lebih rendah

ketimbang puncak dwitia (sekonder) (yang ditandai dengan bintang pada gambar 9.1) tahun yang lain. Penolakan seperti itu dapat diatasi dengan membuat senarai *deret jujuh memanggu (parsial)*. Di dalamnya, pemisahan waktu yang tajam tidak lagi merupakan syarat, dan semua puncak di atas nilai tertentu yang disepakati (misalnya puncak tahunan yang terendah) sudah termasuk. Ada persyaratananya, yaitu sesuai dengan penilaian pihak yang merangkum data itu, puncak itu merupakan kejadian bebas yang tak terpengaruh oleh aliran puncak sebelumnya. Maka dari itu, kejadian deret jujuh memanggu memungkinkan penolakan pertimbangan subjektif dan, secara apa adanya, bebas dan acak. Laporan Penelitian Banjir (*The Flood Studies Report*) [3] muat keterangan rinci mengenai hasil penelitian tentang jujuh memanggu itu, atau deret di atas ambang (DAA). Disimpulkan, bahwa model DAA yang dianjurkan merupakan sesuatu yang berguna untuk menaksir banjir tahunan rataan (\bar{Q}), khususnya bilamana rekamannya hanya pendek, katakan saja, dari 3 hingga 10 tahun. Ringkasan mengenai cara ini diberikan di bawah pada ayat 9.3.6.

† air tahunan = puncak tahunan
* : puncak sekunder lebih tinggi dari puncak tahunan



Gambar 9.1 Kejadian tahunan dan deret jujuh memanggu

Deret yang manakah yang dipakai, bergantung pada tujuan orang membuat analisis. Untuk keterangan mengenai kejadian yang cukup kerap (misalnya, ukuran banjir yang barangkali dapat diharapkan terjadi selama pembangunan sebuah bendungan besar-katakan saja, 4 tahun), maka deret memanggu mungkin yang terbaik. Sebaliknya, untuk banjir ripta (banjir rencana) pelimpah bendungan itu yang tidak boleh terlampaui selama rentang umur bendungan itu (katakan saja 100 tahun), deret sebaran sebenarnya, atau deret tahunan, akan lebih baik. Sebenarnya, setiap banjir besar hanya ada selisih sangat kecil dalam *selang ulangan* di antara kedua kejadian itu. Kejadian deret penuh, meskipun

tidak bebas, sangat berguna dalam periptaan karena untuk itu orang lebih memerlukan banyaknya data ketimbang nilai puncak.

9.3.2 Peluang kejadian N -tahun Istilah T_r adalah waktu rerata yang berlangsung antara dua kejadian yang mempunyai paras sama atau lebih besar dari paras tertentu (misalnya x). Jadi, kejadian N -tahun merupakan kejadian yang parasnya diharapkan sama atau lebih besar secara rerata, setiap N tahun. Maka kejadian N -tahun mempunyai selang ulangan, T_r sebesar N tahun.

Seperti telah dikatakan, tidak ada sangkut-paut bahwa kejadian N -tahun berlangsung mendaur. Tetapi kejadian itu memiliki peluang untuk berlangsung dalam masa tertentu yang mana pun yang kita tinjau.

Misalkan peluang $P(X < x)$ adalah peluang, bahwa kejadian x tidak akan tersamai atau terlampaui selama jangka waktu tertentu.

Maka $P(X < x)_n$ akan menggambarkan peluang bahwa x tidak akan tersamai atau terlampaui dalam jangka waktu n yang demikian itu.

Untuk deret bebas dan dari aturan peluang darab

$$\begin{aligned} P(X < x)_n &= [P(X < x)]^n \\ &= [1 - P(X > x)]^n \end{aligned}$$

Maka dari itu

$$P(X > x)_n = 1 - [1 - P(X > x)]^n$$

Sekarang

$$T_r = \frac{1}{P(X > x)}$$

Maka dari itu

$$P(X > x)_n = 1 - \left[1 - \frac{1}{T_r}\right]^n$$

Jadi, misalnya, peluang bahwa banjir dengan masa ulang 20 tahun akan muncul dalam jangka waktu 3-tahun, dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} X > x)_n &= P(X > 20)_3 = 1 - [1 - \frac{1}{20}]^3 \\ &= 1 - [0,95]^3 \\ &= 1 - 0,857 \\ &= 0,143 \text{ atau } 14,3 \text{ persen} \end{aligned}$$

Tabel 9.1 menunjukkan banjir N -tahun yang berlangsung dalam jangka waktu tertentu.

Sebagai misal, dari tabel itu dapat dilihat bahwa ada peluang 1 persen bagi banjir 200-tahunan untuk muncul dalam dua tahun mendatang dan peluang 8 persen bahwa peristiwa itu tidak akan muncul dalam 500 tahun yad.

Jika peluang $P(X > x)_n$ ditentukan oleh putusan kebijakan, nilai n , masa riptanya (masa rencananya), dapat ditemukan dari

$$P(X > x)_n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n$$

Tabel 9.1 Persentasi peluang banjir N -tahun yang muncul dalam jangka waktu tertentu^a

Banyaknya tahun dlm masa	$N = \text{Masa ulang rerata } T_r (\text{tahun})$							
	5	10	20	50	100	200	500	1000
1	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1
2	36	19	10	4	2	1	0,4	0,2
3	49	27	14	6	3	1,5	0,6	0,3
5	67	41	23	10	5	2,5	1	0,5
10	89	65	40	18	10	5	2	1
20	99	88	64	33	18	10	4	2
30	99,9	96	78	45	26	14	6	3
60	—	99,8	95	70	43	26	11	6
100	—	—	99,4	87	63	39	18	10
200	—	—	—	98,2	87	63	33	18
500	—	—	—	—	99,3	92	63	39
1000	—	—	—	—	—	99,3	86	63

^a Yang tak disisipi angka, persentasi peluangnya > 99,9.

$$1 + P(X > x)_n = \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n = \left(\frac{T_r - 1}{T_r}\right)^n$$

$$\log(1 - P(X > x)_n) = n \log\left(\frac{T_r - 1}{T_r}\right)$$

Maka dari itu

$$n = \frac{\log(1 - P(X > x)_n)}{\log\left(\frac{T_r - 1}{T_r}\right)}$$

Contoh 9.1 Berapa lamakah bendungan pelenceng akan tetap di sungai, dengan peluang yang sama tidak akan terlimpahi, jika bendungan itu diripta tetap aman terhadap banjir 10-tahunan?

Di sini, putusan kebijakan adalah, bahwa harus ada peluang yang sama, jadi $P(X > x)_n = 0,50$ dan $T_r = 10$, maka

$$n = \frac{\log(1 - 0,5)}{\log \frac{9}{10}} = \frac{\log 0,5}{\log 0,9} = \frac{1,699}{1,954} = \frac{0,301}{0,046} = 6,5 \text{ tahun}$$

9.3.3 Menentukan kebesaran kejadian N -tahun dengan merajah Setelah sederet kejadian disenaraikan (misalnya saja, banjir maksimum), masing-masing itu kemudian diberi peringkat m , dimulai dengan $m = 1$ untuk nilai yang tertinggi, $m = 2$, untuk nilai kedua setelah yang tertinggi, dst. mengikuti peringkat yang makin rendah. Selang ulangan T_r sekarang dapat dihitung dari salah satu di antara sejumlah rumus, yang telah ditelaah oleh Cunnane [7].

Rumus yang paling sering digunakan pada masa lalu adalah rumus Weibull [8]

$$T_r = \frac{n + 1}{m} \quad (9.1)$$

Di sini m = peringkat kejadian dan n = banyaknya kejadian. Tetapi ada keberatan terhadap penggunaannya, disebabkan oleh kepencongan yang timbul daripadanya terhadap kejadian terbesar dalam deret yang pendek.

Rumus lain yang digunakan ialah rumus Kalifornia [9]

$$T_r = \frac{n}{m}$$

dan rumus Hazen [10]

$$T_r = \frac{2n}{2m - 1}$$

Mengenai kedua rumus tsb. ada segi yang perlu diwaspadai. Salah satu di antara rumus itu yang lebih memuaskan adalah usulan Gringorten [11], yaitu

$$T_r = \frac{(n + 0,12)}{(m - 0,44)} \quad (9.2)$$

Untuk satu-satunya jalan, yang juga sederhana, penyelesaian masalah ini, Cunnane menyarankan

$$T_r = \frac{n + 0,2}{m - 0,4}$$

Peluang P sebuah kejadian N -tahun dengan masa ulang T_r adalah

$$P = \frac{100}{T_r} \text{ persen} \quad (9.3)$$

sehingga sekali kita telah memberi peringkat pada kejadian suatu deret, berbagai kejadian itu dapat dirajah pada grafik yang menghubungkan peubah Q dan T_r ataupun P .

Orang sering menganggap deret yang demikian itu *tersebar normal*. Dalam hal itu, semua titik yang dirajah pada *kertas peluang normal* kiranya akan terletak pada sebuah garis lurus. Yang seperti itu jarang terjadi pada deret banjir; yang terhasil sering adalah lengkung yang dangkal, sehingga lebih sulitlah orang membuat ekstrapolasi; untuk itu diperlukan *kertas peluang log-normal*.

Tabel 9.2 adalah senarai aliran harian rataan maksimum tahunan Sungai Thames di Bendung Teddington untuk tahun 1883–1988. Ini merupakan deret tahunan yang sebenarnya dengan masa ulang dan peluang yang dihitung dari persamaan 9.2 dan 9.3. Data tabel 9.2 itu dapat dirajah dengan jalan bermacam-cara dan gambar 9.2 hingga 9.5 melukiskan yang paling umum.

Tabel 9.2 Aliran harian rataan maksimum (Q_{maks}) untuk tahun -air (yang berakhir 30 Sept) 1883–1988, untuk S. Thames di Teddington^a

Tahun air	Q_{maks} ($\text{m}^3/\text{det.}$)	Peringkat m	Masa ulang T_r (th)	Persentasi peluang P	Log Q_{maks}
1883	511	11	10,1	10,0	2,708
1884	231	82	1,3	76,8	2,364
1885	230	85	1,3	79,7	2,362
1886	244	78	1,4	73,1	2,387
1887	284	65	1,6	60,8	2,453
1888	208	93	1,2	87,2	2,318
1889	237	80	1,3	75,0	2,375
1890	205	94	1,1	88,1	2,312
1891	171	100	1,1	93,8	2,233
1892	399	42	2,6	39,2	2,530
1893	300	58	1,8	54,2	2,477
1894	173	99	1,1	92,9	2,238
1895	1065	1	189,5	0,53	3,027
1896	202	96	1,1	90,0	2,305
1897	351	38	2,9	35,4	2,545

Tahun air	Q_{maks} (m ³ /det.)	Peringk m	Masa ulang T_r (th)	Persentasi peluang P	Log Q_{maks}
1898	171	101	1,1	94,8	2,233
1899	262	70	1,5	65,5	2,418
1900	533	7	16,2	6,2	2,727
1901	200	97	1,1	91,0	2,301
1902	162	102	1,0	95,7	2,210
1903	86	24	4,5	22,2	2,587
1904	57	10	11,1	9,0	2,713
1905	22	86	1,2	80,6	2,360
1906	249	76	1,4	71,2	2,396
1907	220	92	1,2	86,3	2,342
1908	376	28	3,9	26,0	2,575
1909	204	95	1,1	89,1	2,310
1910	231	83	1,3	77,8	2,364
1911	428	18	6,0	16,5	2,631
1912	367	36	3,0	33,5	2,565
1913	255	74	1,4	69,3	2,407
1914	256	73	1,5	68,4	2,408
1915	585	4	9,8	3,4	2,767
1916	373	31	3,5	28,8	2,572
1917	327	41	2,3	42,9	2,515
1918	351	39	2,8	36,3	2,545
1919	334	43	2,5	40,1	2,524
1920	251	75	1,4	70,3	2,400
1921	240	79	1,4	74,1	2,380
1922	198	98	1,1	91,9	2,297
1923	231	84	1,3	78,7	2,364
1924	298	60	1,8	56,1	2,474
1925	522	9	12,4	8,1	2,718
1926	370	32	3,4	29,7	2,568
1927	375	29	3,7	26,9	2,574
1928	526	8	14,0	7,1	2,721
1929	235	1	1,3	5,9	2,371
1930	552	6	19,1	5,2	2,742
1931	228	87	1,2	81,6	2,358
1932	274	66	1,6	61,8	2,438
1933	479	12	9,2	10,9	2,680

Tahun air	Q_{maks} (m ³ /det.)	Peringk m	Masa ulang T_r (th)	Persentasi peluang P	Log Q_{maks}
1934	95	106	1,0	99,5	1,978
1935	227	88	1,2	82,5	2,356
1936	478	13	8,5	11,8	2,679
1937	438	17	6,4	15,6	2,641
1938	247	77	1,4	72,1	2,393
1939	369	33	3,3	30,7	2,567
1940	410	19	5,1	17,5	2,613
1941	384	26	4,2	24,1	2,584
1942	298	61	1,8	57,1	2,474
1943	457	14	7,8	12,8	2,660
1944	115	105	1,0	98,5	2,061
1945	261	71	1,5	66,5	2,417
1946	257	72	1,5	67,4	2,410
1947	714	2	68,0	1,5	2,854
1948	227	89	1,2	83,5	2,356
1949	299	59	1,8	55,2	2,476
1950	324	49	2,2	45,8	2,511
1951	385	25	4,3	23,1	2,585
1952	377	27	4,0	25,0	2,576
1953	263	69	1,6	64,6	2,420
1954	222	91	1,2	85,3	2,346
1955	453	6	6,8	14,7	2,656
1956	316	52	2,1	48,6	2,500
1957	314	53	2,0	49,5	2,497
1958	317	51	2,1	47,6	2,501
1959	375	30	3,6	27,9	2,574
1960	308	56	1,9	52,4	2,489
1961	456	15	7,3	13,7	2,659
1962	344	41	2,6	38,2	2,537
1963	286	63	1,7	59,0	2,456
1964	369	34	3,2	31,6	2,567
1965	122	104	1,0	97,6	2,086
1966	324	48	2,2	44,8	2,511
1967	313	55	1,9	51,4	2,496
1968	600	3	41,5	2,4	2,778
1969	369	35	3,1	32,6	2,567

Tahun air	Q_{maks} (m ³ /det.)	Peringkat m	Masa ulang T_r (th)	Persentas peluang P	Log Q_{maks}
1970	224	90	1,2	84,4	2,350
1971	362	37	2,9	34,5	2,559
1972	330	45	2,4	42,0	2,519
1973	266	68	1,6	63,7	2,425
1974	396	22	4,9	20,3	2,598
1975	559	5	23,3	4,3	2,747
1976	152	103	1,0	96,6	2,182
1977	334	44	2,4	41,0	2,524
1978	326	47	2,3	43,9	2,513
1979	324	50	2,1	46,7	2,511
1980	393	23	4,7	21,3	2,594
1981	289	62	1,7	58,0	2,461
1982	314	54	2,0	50,5	2,497
1983	345	40	2,7	37,3	2,538
1984	286	64	1,7	59,9	2,456
1985	270	67	1,6	62,7	2,431
1986	408	20	5,4	18,4	2,611
1987	304	57	1,9	53,3	2,483
1988	402	21	5,2	19,4	2,604

$${}^a Q_{\text{rerata}} = 329,7 \text{ m}^3/\text{s}, n = 106$$

$$\sigma = 133,8$$

T_r dihitung dari persamaan 9.2

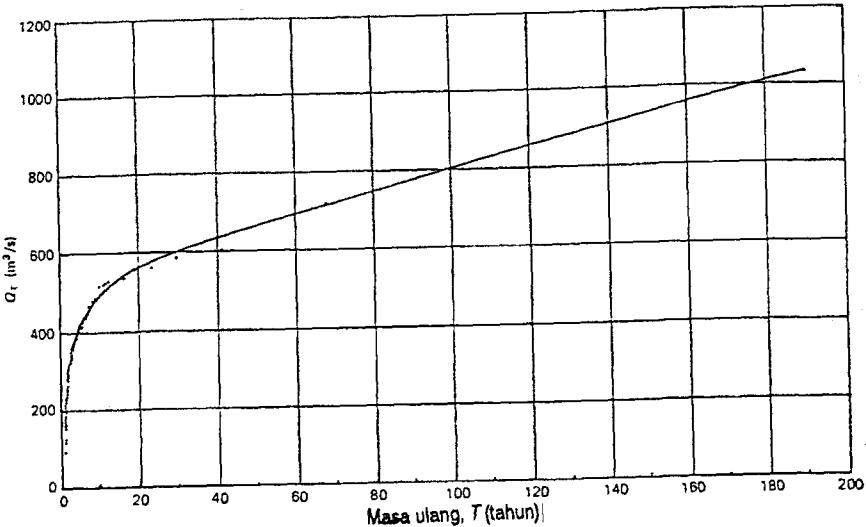
$$\Sigma x = \log Q_m {}^a_{\text{ks}} = 263,621$$

$$\Sigma x^2 = (\log Q_m {}^a_{\text{ks}})^2 = 658,478$$

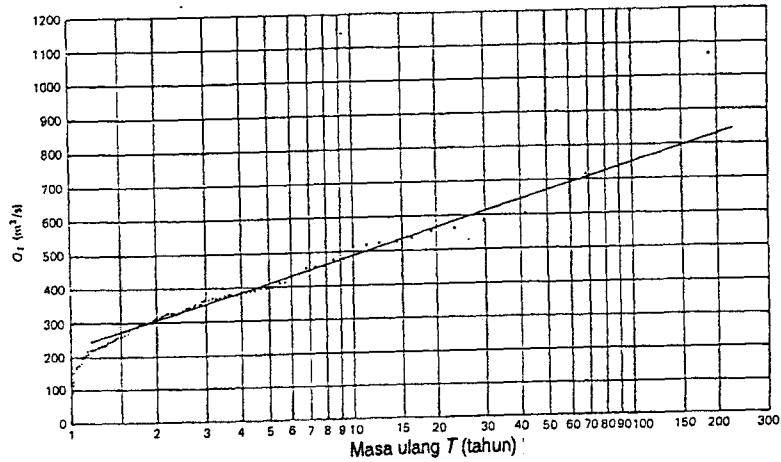
$$X_{\text{av}} = 2,487$$

$$\sigma_x = 0,165$$

- a Q lawan T_r dengan menggunakan koordinat gemarisi (gambar 9.2). Mengekstrapolasi lengkung hingga nilai T_r tinggi, gawatnya, bergantung pada beberapa titik tertinggi. Titik terlingkari merupakan kedudukan pada persamaan 9.2 untuk dua nilai tertinggi.
- b Q (gemarisi) lawan T_r (berifat log) (gambar 9.3). Ini menghasilkan garis lurus yang dipaskan pada bagi semua nilai, kecuali nilai-nilai paling rendah. Meskipun mengekstrapolasi lebih sederhana, kecuali jika T_r mengikuti hukum log, hasilnya tidak perlu lebih cermat ketimbang bagi gambar 9.2.

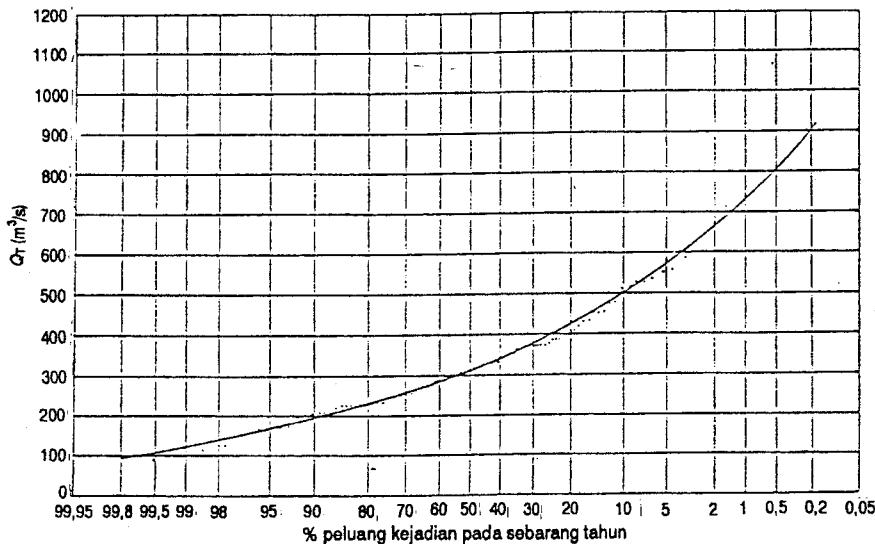


Gambar 9.2 Aliran harian rataan maksimum Sungai Thames di Teddington, 1883-1988.

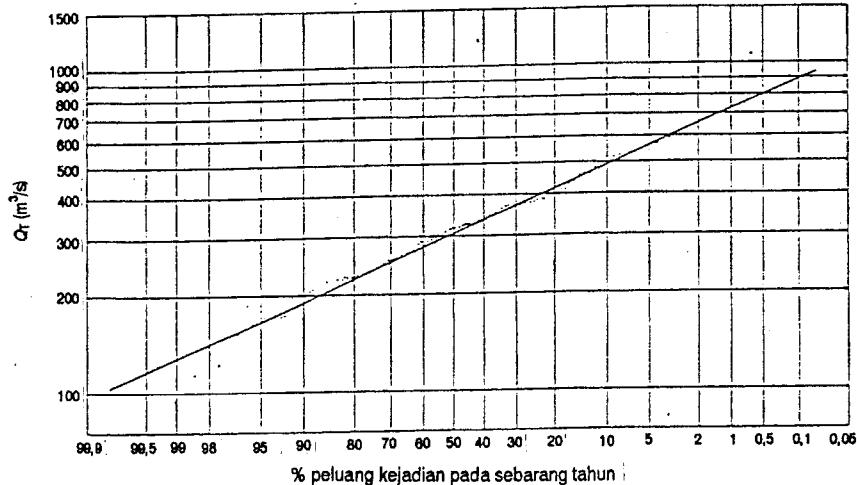


Gambar 9.3 Aliran harian rataan maksimum tahunan Sungai

- c Q (gemaris) lawan peluang (persen) (gambar 9.4). Seperti yang biasanya terjadi, titik deret banjir terletak pada lengkung datar pada kertas peluang (yang mengandaikan peluang dengan sebaran normal).



Gambar 9.4 Aliran harian rataan maksimum tahunan Sungai Thames di Teddington, 1883-1988 (peluang normal)



Gambar 9.5 Aliran harian rataan maksimum tahunan sungai Thames di Teddington, 1883-1988 (log normal)

- d Q (bersifat log) lawan peluang (persen) (gambar 9.5). Lengkung pada gambar 9.4 sekarang beralih bentuk menjadi garis lurus. Ragam pendekatan pada gambar 9.4 mengandaikan, bahwa log peragam Q tersebar normal, yang membawa digunakannya kertas *log normal* - yang digunakan pertama kali oleh Whipple [12].
- e Para peneliti lain mengusulkan cara yang mengandaikan sebaran kekerapan yang bersifat teori. Gumbel [13,14,15] mengusulkan *teori nilai sepaling (extreme-value theory, EV1)*. Dengan itu ia menunjukkan, bahwa dalam deret nilai sepaling X_1, X_2, \dots, X_n yang teroknya berukuran sama, dan X merupakan peubah yang tersebar berpangkat, maka peluang berlonggoknya P' bahwa nilai n yang mana pun akan kurang dari suatu nilai tertentu X (dengan masa ulang T), mendekati nilai

$$P = e^{-e^{-y}}$$

dengan e dasar log alam, dan

$$y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Sebagai contoh untuk itu misalnya luahan maksimum teramat dalam pembacaan sukat selama setahun.

Jadi, P' adalah peluang tak berulangnya kejadian X dalam T tahun, atau

$$T = \frac{1}{1 - P'}$$

(Perhatikan, bahwa alasan ini menunjuk ke cara Gumbel. Pembaca hendaknya tidak mengelirukan hal ini dengan penggunaan yang lazim $T_r = 1/P$ dengan P adalah peluang berlangsungnya kejadian.)

Kejadian X , dengan masa ulang T tahun, sekarang ditentukan sebagai Q_T , dan

$$Q_T = Q_{av} + \sigma(0,78y - 0,45) \quad (9.4)$$

dengan Q_{av} = rerata semua nilai Q_{maks} ‘banjir tahunan’

σ = simpan deret itu.

Jadi

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{n}{n-1} \left(\frac{\sum Q_{maks}^2}{n} - Q_{av}^2 \right) \right]} \quad (9.5)$$

dengan n = jumlah tahun perekaman = jumlah nilai Q_{maks}

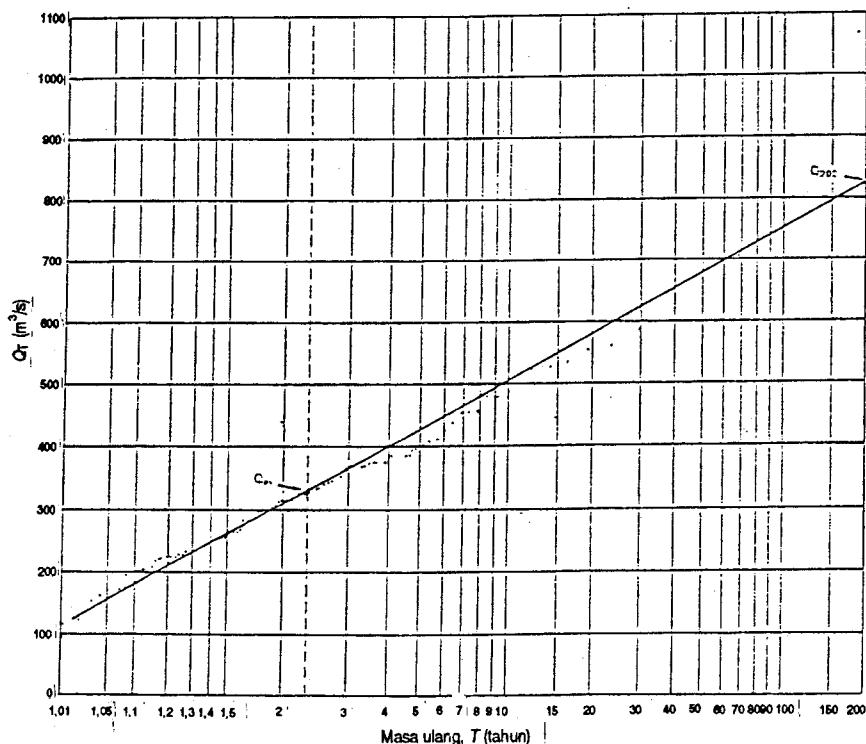
$\sum Q_{maks}^2$ = jumlah kuadrat nilai $n Q_{maks}$.

Tabel 9.3 menyajikan nilai y sebagai fungsi T .

Tabel 9.3 y sebagai fungsi T

T	y	T	y
1,01	-1,53	100	4,60
1,58	0,00	200	5,30
2,0	0,37	300	5,70
5,0	1,50	400	5,99
10,0	2,25	500	6,21
20	2,97	1.000	6,91
50	3,90	10.000	9,21

Powell [16] memberi saran, jika dibuatkan kertas untuk merajah yang garis mendatarannya diletakkan mendatar, dan garis menegaknya dengan jarak dibuat sebanding y , maka dari persamaan 9.4 rajahan Q_T dan T akan berupa garis lurus.



Gambar 9.6 Aliran harian rataan maksimum tahunan S. Thames di Teddington, 1883-1988 (sebaran Gumbel)

Ini merupakan dasar kertas peluang Gumbel-Powell, dan telah digunakan untuk merajah data S. Thames dalam gambar 9.6. Masa ulang T dihitung dari persamaan 9.2. Garis lurus dalam gambar ini dilukis di antara kedua titik Q_{av} dan Q_{200} . Q_{av} dari persamaan 9.4 terjadi bila $0,78y = 0,45$ atau $y = 0,577$, yang bersesuaian dengan $T = 2,33$ tahun. Persamaan 9.4 berlaku untuk nilai n yang besar-besar, katakan saja, $n > 50$, ketika Q_{av} pada 2,33 tahun telah dimasukkan pada garis itu melewati titik tadi. Titik yang lain Q_{200} menggambarkan ‘banjir 200-tahunan’ dan ditemukan dengan memasukkan nilai yang cocok pada persamaan 9.4.

$$Q_{200} = Q_{av} + 133,8(0,78 \times 5,30 - 0,45) = 329,7 + 492,9 = 823 \text{ m}^3/\text{det.}$$

dan serupa dengan itu

$$Q_{100} = Q_{av} + 133,8(0,78 \times 5,30 - 0,45) = 329,7 + 419,9 = 750 \text{ m}^3/\text{det.}$$

Kesesuaian antara data yang dirajah dan garis teori menurut Gumbel dengan ini dapat ditunjukkan. Kertas Gumbel tak boleh digunakan untuk deret memanggu (parsial), yang biasanya lebih baik dirajah pada kertas setengah log seperti yang digunakan pada gambar 9.3.

Dari rajahan yang disajikan dalam gambar 9.2 hingga 9.6 agaknya tak banyak yang dapat kita pilih di antara kertas, yang khusus-khusus, yang tersedia untuk merajah. Sering inilah yang terjadi, dan para peneliti hendaknya menggunakan sebaran yang mana pun yang membuat tugas khususnya, yaitu menyesuaikan garis dan mengekstrapolasi, paling mudah dan garisnya tampak paling sesuai.

Yang tercantum tadi merupakan ringkasan yang perlu perihal cara merajah kejadian banjir yang digunakan orang saat ini. Untuk teori yang mendasarinya, para pembaca hendaknya memeriksa tulisan aslinya serta pembahasan lebih menyeluruh yang tersedia [5, 7, 17, 18].

9.3.4 Menentukan kebesaran kejadian N -tahun dengan perhitungan Pada ayat sebelumnya, penggunaan sebaran peluang normal telah dipakai untuk merajah kejadian, jadi untuk mengekstrapolasi nilai langka yang mungkin dipakai dalam periptaan. Meskipun demikian, orang dapat menghitung nilai peluang khusus, karena sebuah lengkung sebaran normal hanya ditentukan oleh dua parameter, yaitu simpangan rataan dan simpangan baku.

Oleh karena itu, untuk menentukan luahan tertentu yang berhubungan dengan peluang kejadian yang khas r dalam deret tahunan yang tersebar normal, hanya perlu menghitung

$$Q_r = Q_{av} + K\sigma$$

σ = simpangan baku dari persamaan 9.5, dan K disenaraikan dalam tabel 9.4.

Tabel 9.4 Nilai sebaran normal

Peluang untuk melampaui (%)	K	Peluang untuk melampaui (%)	K
0,1	3,09	50	0,00
0,5	2,58	55	-0,13
1,0	2,33	60	-0,25
2,5	1,96	65	-0,385
5	1,645	70	-0,52
10	1,28	75	-0,67
15	1,04	80	-0,84
20	0,84	85	-1,04
25	0,67	90	-1,28
30	0,52	95	-1,645
35	0,385	97,5	-1,96
40	0,25	99,0	-2,33
45	0,13	99,5	-2,58
50	0,00	99,9	-3,09

Contoh 9.2 Tentukan dengan perhitungan luahan harian rataan S. Thames di Teddington dengan masa ulang 100-tahun, dengan mengandaikan deret tahunannya tersebar normal. Dari tabel 9.2; $Q_{av} = 329,7 \text{ m}^3/\text{det}$. dan $d = 133,8 \text{ m}^3/\text{det}$. Untuk $T_r = 100$ tahun, $P = 1,0$ persen; dan dari tabel 9.4, $K = 2,33$. Jadi $Q_{100} = 329,7 + (2,33 \times 133,8) = 641 \text{ m}^3/\text{det}$.

9.3.5 Sebaran log Pearson Jenis III Telah dikatakan, bahwa deret banjir tahunan jarang yang tersebar normal. Histogram deret seperti itu biasanya *pencong* atau *condong*; yaitu nilai rataannya tidak berhimpitan dengan *modus* (nilai peubah acak dengan kekerapan terbesar). Pearson [19] membuat suatu takaran kepencongan yang didasarkan pada (rataan - modus) σ dan mengembangkan serumpun lengkung untuk memerikan derajat kepencongan. Salah satu di antaranya, sebaran Pearson Jenis III, bila digunakan bersama dengan logaritma peubah acak Q ternyata dapat memberi kemungkinan banyak deret banjir tahunan dapat dirajah sebagai garis lurus. Sebaran log Pearson Jenis III telah diterima sebagai bakuan oleh beberapa jawatan Pemerintah Pusat di Amerika Serikat [20].

Kejadian N -tahun dapat dihitung dengan cara yang serupa dengan cara sebaran normal, dan kali ini dengan liku-liku tambahan karena menggunakan logaritma peubah acak dan koefisien pencong (G), yang dinyatakan dengan

$$G = \frac{n^2(\Sigma X^3) - 3n(\Sigma X)(\Sigma X^2) + 2(\Sigma X)^3}{n(n-1)(n-2)\sigma_x^3} \quad (9.6)$$

di sini $X = \log Q$ dan $x = \text{simpangan baku pada nilai } n \text{ dari } X$.

Oleh sebab itu, untuk menghitung masa ulang tertentu banjir Q dari deret tahunan diperlukan beberapa langkah berikut ini.

- a Alihkan bentuk semua nilai (n) dari Q dalam deret itu ke logaritmanya (dasar 10):

$$X = \log Q$$

- b Temukan rataan semua nilai X :

$$X_{av} = \frac{\sum X}{n}$$

- c Hitung simpangan baku nilai n dari X

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{n}{n-1} \frac{X^2}{n} - X_{av}^2}$$

- d Hitung pencongnya nilai X , G , dari pers. 9.6 di atas.

- e Hitung luahan Q_r dari

$$\log Q_r = X_{av} + K' \sigma_x \quad (9.7)$$

dengan K' dipilih dari tabel 9.5 untuk peluang khas r dan pencong G .

Tabel 9.5 Nilai K' dalam sebaran Pearson Jenis III [18]

Koef pencong	Peluang melampaui (persen)						
	99	90	50	10	5	2	1
3,0	-0,667	-0,660	-0,396	1,180	2,003	3,152	4,051
2,5	-0,799	-0,771	-0,360	1,250	2,012	3,048	3,845
2,0	-0,990	-0,895	-0,307	1,303	1,996	2,912	3,605
1,5	-1,256	-1,018	-0,240	1,333	1,951	2,743	3,330
1,2	-1,449	1,086	-0,195	1,340	1,910	2,626	3,149
1,0	-1,588	-1,128	-0,164	1,340	1,877	2,542	3,023
0,9	-1,660	-1,147	-0,148	1,339	1,859	2,498	2,957
0,8	-1,733	-1,166	-0,132	1,336	1,839	2,453	2,891
0,7	-1,806	-1,183	-0,116	1,333	1,819	2,407	2,824
0,6	-1,880	-1,200	-0,099	1,328	1,797	2,35	2,755
0,5	-1,955	-1,216	-0,083	1,323	1,774	2,311	2,686
0,4	-2,029	1,231	-0,067	1,317	1,750	2,261	2,615
0,3	-2,104	-1,245	-0,050	1,309	1,726	2,211	2,544

Koef pencong G	Peluang melampaui (persen)						
	99	90	50	10	5	2	1
0,2	-2,178	-1,258	-0,033	1,301	1,700	2,159	2,472
0,1	-2,253	-1,270	-0,017	1,292	1,673	2,107	2,400
0,0	-2,326	-1,282	-0,000	1,282	1,645	2,054	2,326
-0,1	-2,400	-1,292	0,017	1,270	1,616	2,000	2,253
-0,2	-2,472	-1,301	0,033	1,258	1,586	1,945	2,178
-0,3	-2,544	-1,309	0,050	1,245	1,555	1,890	2,104
-0,4	-2,615	-1,317	0,067	1,231	1,524	1,834	2,029
-0,5	-2,686	-1,323	0,083	1,216	1,491	1,777	1,955
-0,6	-2,755	-1,328	0,099	1,200	1,458	1,720	1,880
-0,7	-2,824	-1,333	0,116	1,183	1,423	1,663	1,806
-0,8	-2,891	-1,336	0,132	1,166	1,389	1,606	1,733
-0,9	-2,957	-1,339	0,148	1,147	1,353	1,549	1,660
-1,0	-3,023	-1,340	0,164	1,128	1,317	1,492	1,588
-1,2	-3,149	-1,340	0,195	1,086	1,243	1,379	1,419
-1,5	-3,330	-1,333	0,240	1,018	1,131	1,217	1,256
-2,0	-3,605	-1,303	0,307	1,895	0,949	0,980	0,990
-2,5	-3,845	-1,250	0,360	0,771	0,790	0,798	0,799
-3,0	-4,051	-1,180	0,396	0,660	0,665	0,666	0,667

Contoh 9.3 Tentukan dengan perhitungan luahan harian rataan S. Thames di Teddington dengan masa ulang 100-tahunan dengan menggunakan sebaran Pearson Jenis III.

Dari tabel 9.2

$$\begin{aligned}\Sigma X &= 263,621 \\ \Sigma X^2 &= 658,478 \\ \Sigma X^3 &= 1651,799 \\ (\Sigma X)^3 &= 18.320.613,4 \\ X_{av} &= 2,487 \\ \sigma_x &= 0,1648\end{aligned}$$

Jadi, dari persamaan 9.6

$$G = -0,066$$

dari tabel 9.5, untuk peluang 1 persen, lewat interpolasi

$$K = 2,278 \text{ jadi } K\sigma_x = 0,375$$

dan dari persamaan 9.7

$$\log Q_{100} = 2,487 + 0,375 = 2,862$$

Maka dari itu

$$Q_{100} = 728 \text{ m}^3/\text{det.}$$

9.3.6 Menaksir banjir tahunan rataan Q dari jujuh memanggu atau deret puncak di atas ambang (PAA) [19] Bilamana yang tersedia hanya sejumlah data yang terbatas (katakan saja 3 hingga 10 tahun), maka dapatlah digunakan sederet puncak di atas suatu nilai sebarang untuk menaksir nilai Q , yaitu banjir tahunan rataan.

Tatacaranya adalah sbb.:

- 1 Pilih sebuah paras ambang, q_0 , sedemikian rupa hingga reratanya antara 3 dan 5 puncak yang setiap tahun melewatinya.
- 2 Kenali semua puncak di atas ambang itu, yang dianggap bebas, dengan menggunakan aturan. Aturan itu ialah, bahwa semua puncak memiliki pisahan waktu paling tidak tiga kali T_p untuk DAS ybs, dan bahwa aliran setelah puncak yang satu harus susut hingga sepertiga nilainya atau kurang, sebelum naik ke puncak yang kedua. Senaraikan semua besaran q_i semua puncak yang dikenali M dalam rekaman N tahun.
- 3 Anggap sekarang, bahwa jumlah lampauan setiap tahunnya dapat diperlakukan sebagai peubah acak Poisson yang parameternya dinyatakan dengan

$$\lambda = M/N$$

dan yang kebesarannya dapat dianggap sebaran berpangkat yang parameter β -nya dinyatakan dengan

$$\hat{\beta} = \bar{q} - q_0 = \sum_{i=1}^M (q_i - q_0)/M$$

- 4 Q_T (luahan dengan masa ulang T tahun) sekarang dapat ditaksir dari

$$Q_T = q_0 + \hat{\beta} \ln \lambda + \hat{\beta} \ln T$$

dan

$$Q = q_0 + \hat{\beta} \ln \lambda + 0,5772 \hat{\beta}$$

Latar belakang dan pembenaran untuk itu diberikan dalam acuan [5].

9.4 Cara FSR untuk memprakirakan \bar{Q} dan Q_T untuk DAS yang tak tersukat

9.4.1 Persamaan yang umum untuk \bar{Q} Ini adalah cara untuk memperoleh taksiran luahan banjir bagi DAS tak tersukat lewat penggunaan sifat DAS. Luahan khas yang diambil adalah banjir tahunan, \bar{Q} . Setelah mempertimbangkan lebih dari 500 DAS di Inggris dan Irlandia, dan penelitian rinci mengenai pengaruh DAS dan sifat meteorologi pada \bar{Q} , persamaan umum yang disarankan untuk berbagai daerah hidrometri adalah

$$\bar{Q} = C [\text{AREA}^{0,94} \text{STMFRQ}^{0,27} \text{SOIL}^{1,23} \text{RSMD}^{1,03} \text{S1085}^{0,16} (1+\text{LAKE})^{-0,85}] \quad (9.8)$$

Tandanya adalah sbb.:

AREA: luas dalam kilometer persegi

STMFRQ: kekerapan sungai (pertemuan/km²), diukur dari peta topografi (Inggris) 1:25.000

SOIL: penunjuk tanah, berupa penunjuk majemuk, ditentukan dari peta tanah dan diturunkan dari rumus

$$\text{SOIL} = \frac{(0,15S_1 + 0,30S_2 + 0,40S_3 + 0,45S_4 + 0,5S_5)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5}$$

dengan $S_1 \dots S_5$ menunjukkan perbandingan DAS yang tertutup oleh setiap kelas tanah 1-5. Kelas tanah 1 memiliki daya resap tertinggi dan oleh karena itu kesanggupan limpasan terendah, sedangkan kelas tanah 5 mempunyai daya resap terendah dan oleh karena itu kesanggupan limpasan tertinggi. Maka dari itu SOIL memiliki jangka nilai yang mungkin antara 0,15 dan 0,5. (Pembahasan lengkap mengenai penggolongan lengkap ini dapat ditemukan dalam FSR I 4.2.3 dan peta FSR V, gambar 4.18.)

RSMD: Curahan hujan 1 harian bersih dengan masa ulang 5 tahun dikurangi ketunaan kelengasaan tanah. Ini didapatkan dengan curah hujan $5M$ 1-hari dari $5M$ 2-hari dan nisbah r (lampiran A), tabel 2.9 dan tabel 2.10, dan setelah itu tabel 2.8, dan kemudian mengurangkan ketunaan kelengasaan tanah rataan (gambar 4.8). Cara lain, taksiran dapat diperoleh langsung dari gambar 7.25, 7.26 atau 7.27.

LAKE: bagian DAS yang tersalirkan lewat danau atau waduk.

Danau atau waduk yang mungkin ada, yang luasnya kurang dari 1 persen dari seluruh luasan yang menyalirkan airnya ke danau, diabaikan.

S1085: lereng sungai (m/km) diukur di antara dua titik yang terletak pada jarak 10 persen dan 8,5 persen dari panjangnya sungai sebagaimana diukur dari pengeluar DAS mengikuti panjang sungai yang terbesar, seperti ditandai pada peta topografi Inggris 1:25.000.

C: koefisien wilayah dengan nilai yang ditunjukkan dalam gambar 9.7.

Hanya untuk daerah Essex, Lee dan Thames saja, digunakan persamaan lain

$$\bar{Q} = 0,373 \text{ AREA}^{0,70} \text{STMFRQ}^{0,52} (1 + \text{URBAN})^{2,5} \quad (9.9)$$

dengan URBAN merupakan bagian kota DAS ybs.

Dengan menggunakan persamaan 9.8 atau 9.9 dan data yang tersedia dalam peta dan gambar, adalah mungkin untuk meramal \bar{Q} bagi DAS yang mana saja di Kepulauan Inggris. Setelah diperoleh nilai \bar{Q} bagi DAS yang tak tersukat, maka kemudian diperlukan taksiran banjir Q_T , dengan T adalah masa ulang suatu kebesaran yang dipilih untuk masalah periptaan yang dikemukakan.

Gambar 9.8 menyajikan sejumlah lengkung wilayah tanmatra Q/\bar{Q} yang dirajah lawan peubah bebas tersusut y dari sebaran Gumbel EV1. Masa ulang T ukurannya juga disesuaikan. Dengan mengenali wilayah tertentu tempat terletaknya DAS dan menggunakan lengkung daerah yang cocok, didapat faktor Q/\bar{Q} bagi masa ulang tertentu yang mana pun dan oleh karena itu Q_T dapat diperoleh. Setiap wilayah itu diberi batasnya dan nilai C persamaan 9.8 dinyatakan dalam gambar 9.7.

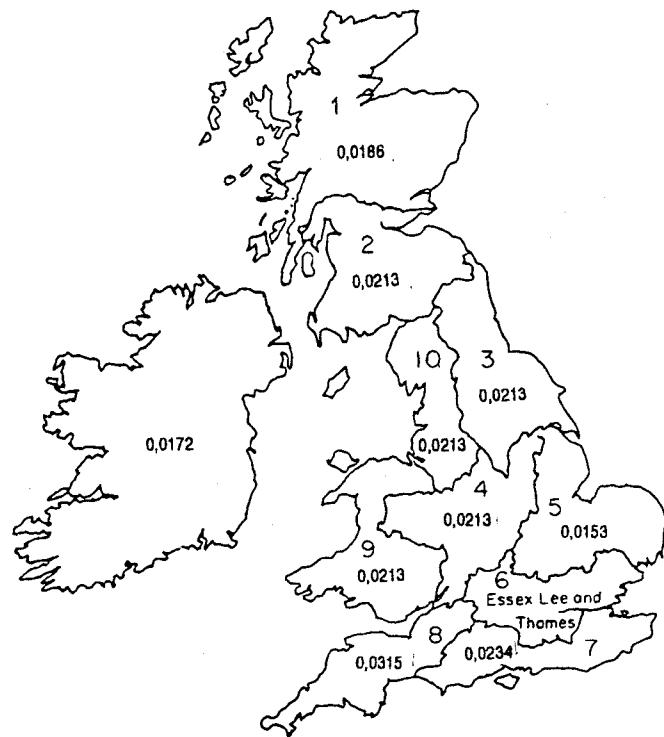
Contoh 9.4 Taksir lengkung kekerapan banjir bagi S. Wyre di Michaels. DAS ini terletak di Wilayah 10.

$$\begin{aligned} \text{AREA} &= 275 \text{ km}^2 & \text{STMFRQ} &= 1,00 & \text{S1085} &= 3,69 \\ \text{SOIL} &= 0,458 & \text{RSMD} &= 44,5 & \text{LAKE} &= 0 \end{aligned}$$

Koefisien wilayahnya 0,0213, jadi persamaan 9.8 menjadi

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= 0,0213 [(275)^{0,94}(1,00)^{0,27}(0,458)^{1,23}(44,5)^{1,03}(3,69)^{0,16}] \\ &= 98,3 \text{ m}^3/\text{det.} \end{aligned}$$

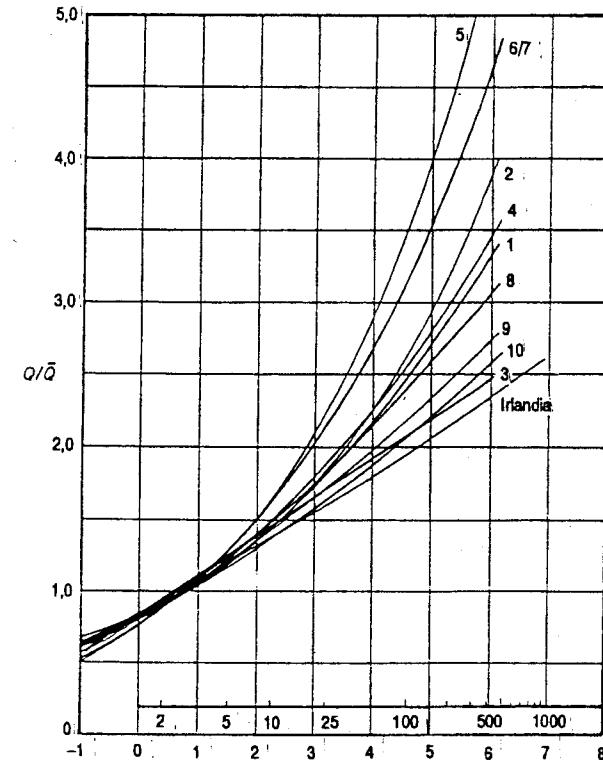
Dari gambar 9.8 disenaraikan faktor Q/\bar{Q} untuk Wilayah 10, dan kekerapan banjirnya disenaraikan:



Wilayah No Daerah Hidrometri

1	1-16, 88-97, 104-108
2	17-21, 77-87
3	22-27
4	28, 54
5	29-35
6	36-39
7	40-44, 101
8	45-53
9	55-67, 102
10	68-76

Gambar 9.7 Wilayah di Kepulauan Inggris dan nilai C yang bersesuaian pada persamaan 9.8 (yang diturunkan dari Laporan Penelitian Banjir, gambar I.4.15).



Gambar 9.8 Lengkung wilayah yang menunjukkan sebaran rerata Q/\bar{Q} untuk setiap wilayah (diturunkan dari Laporan Penelitian Banjir, gambar I.2.14)

T_r (tahun)	Q/\bar{Q}	Q_T (m³/det.)
2	0,9	88
5	1,17	115
10	1,36	134
25	1,63	160
100	2,10	206
500	2,62	258

9.4.2 Persamaan DAS kecil untuk \bar{Q} Sejak terbitnya Laporan Penelitian Banjir, berbagai penulis mempertimbangkan kemungkinan meramal Q bagi DAS kecil-kecil yang luasnya kurang dari 20 km^2 dengan suku yang lebih sedikit daripada persamaan umum yang bersuku enam (persamaan 9.8).

Banyak DAS kecil yang tak tersukat dan para insinyur yang meripta jembatan dan gorong-gorong kecil-kecil sering harus menggunakan persamaan empiris. Meskipun demikian, bila DAS-nya kecil, sering sulit untuk mengangkakan suku STMFRQ dan S1085 dari peta yang baku.

Poots dan Cochrane [23] meneliti 42 DAS kecil-kecil di seluruh Kepulauan Inggris dan menyimpulkan, bahwa persamaan

$$Q = 0,0136 \text{ AREA}^{0,866} \text{ RSMD}^{1,413} \text{ SOIL}^{1,521}$$

secara statistika memberi hasil lebih baik ketimbang persamaan 9.8. Poots kemudian menyimpulkan [24], bahwa versi yang sedikit berbeda agak lebih baik:

$$Q = 0,015 \text{ AREA}^{0,882} \text{ RSMD}^{1,462} \text{ SOIL}^{1,904}$$

Percobaan serupa juga dilakukan oleh Lembaga Hidrologi pada 47 DAS dengan ukuran serupa [25]. Persamaan yang berhasil dari menyurutkan (merekresikan) Q pada sifat DAS dilakukan masing-masing untuk tiga dan empat suku:

$$Q = 0,00066 \text{ AREA}^{0,92} \text{ SAAR}^{1,22} \text{ SOIL}^{2,0} \quad (9.10)$$

dan

$$Q = 0,0288 \text{ AREA}^{0,90} \text{ RSMD}^{1,23} \text{ SOIL}^{1,77} \text{ STMFRQ}^{0,23} \quad (9.11)$$

Dalam hal ini disimpulkan, bahwa tak banyak bedanya antara ketelitian ramalan persamaan 9.10 serta 9.11 dan persamaan enam-suku 9.8 yang baku, dan bahwa kedua persamaan sebelumnya hendaknya digunakan hanya jika waktunya sangat mendesak.

9.5 Membangkitkan data sintesis

Salah satu masalah yang dihadapi para hidrologiwan sepanjang tahun adalah kekurangan data, apakah itu berupa curahan hujan atau, yang lebih umum, amatan luahan. Jika ia hendak meramal aliran banjir yang cukup besar, dan oleh karena itu, dengan masa ulangnya panjang, ia mungkin menemukan hasil pengamatan barang satu atau dua dasawarsa yang menggambarkan luahan. Dengan menggunakan deret tahunan, rekaman yang demikian itu mungkin menghasilkan 20 atau 30 butir, dan dengan jumlah itu jelas diragukan untuk meramal kejadian langka setengah banjir yang 100-tahunan. Dengan menggunakan hanya satu atau dua alat itu dari rekaman setiap tahunnya, ada sejumlah besar informasi mengenai ciri luahan dari sebuah DAS tidak disingung-singgung. Adakah dalam tubuh hasil pengamatan itu tidak terkandung

suatu petunjuk, tidak hanya tanggapan DAS terhadap hujan, melainkan juga peristiwa berlangsungnya hujan itu sendiri? Dengan mempelajari khuluk naik-turunnya luahan, bahkan pada tingkat aliran rendah, mungkinkah kiranya orang dapat mengulanginya lagi, secara acak dan dengan cara yang agaknya tanpa ada tali-temalinya, dan dengan demikian mengulang deret yang memperlihatkan kenaik turunan sebagaimana diperlihatkan oleh data alami itu?

Munculnya komputer yang berkemampuan besar menyediakan jawaban untuk semua pertanyaan itu lewat analisis dan penyajian data ‘buatan’ dalam jumlah besar. Mutu data buatan itu sebagian besar memang bergantung pada data alami yang asli. Akan tetapi cara itu memanfaatkan semua informasi yang tersedia, dan bukan hanya menggunakan bagian sangat kecil daripadanya yang berupa nilai sepaling.

Pada dasarnya, cara membangkitkan deret waktu buatan mengandalkan pada penggunaan rekaman sejarah sebagai terok hunian (populasi) secara keseluruhan. Dari pernyataan ini didapatkan bahwa riptaan didasarkan pada taksiran apa yang kiranya telah terjadi, alih-alih apa yang benar-benar telah terjadi.

Deret waktu nilai teramat yang mana pun dapat mengandung pesusun (komponen) *arah kecenderungan*, pesusun *berkala*, dan pesusun *stokastik*. Dua pesusun yang pertama bersifat *pasti* (yaitu, mereka tidak bergantung pada waktu ketika deret itu mulai, juga tidak pada panjangnya deret). Sebaliknya, pesusun yang stokastik bersifat *pegun* (yaitu, statistika terok itu tidak berbeda dari statistika huniannya, kecuali sebagai akibat keragaman penerokan, dan bergantung pada waktu).

Jika pesusun arah kecenderungan dan yang berkala diambil dari deret itu, yang tertinggal hanyalah pesusun yang stokastik saja. Pesusun ini akan mengandung unsur acak, dan dapat mengandung unsur nasaban (korelasi), dan dapat pula tidak. Nasaban deret menyatakan, bagaimana tiap-tiapt suku pada suatu deret terpengaruh oleh apa yang terjadi sebelumnya; sebagai misal, musim panas yang basah dapat menyebabkan aliran yang lebih tinggi pada musim gugur daripada reratanya. Oleh sebab itu, unsur acak dan bangun nasabnya pada pesusun stokastik harus dipisahkan dan dinilai.

Hingga kini deret waktu itu telah diperlakukan tersendiri dan berbagai bagiannya diteliti. Tiap-tiapt bagian itu diulang kembali dengan pengimakan secara matematika dengan menggunakan bilangan yang terjadi secara acak, deret Markov, koefisien nasab deret, dst., termasuk pula pemasukan kembali keberkalaan dan pesusun arah kecenderungan. ‘Model’ yang tercipta secara demikian itu sekarang dapat digunakan untuk membangkitkan data buatan

dalam jumlah berapa pun yang diingini, dan deret yang dihasilkan itu digunakan untuk menaksir kejadian N -tahun tertentu, seakan-akan datanya teramat.

9.6 Khuluk berdaur gejala hidrologi

Dalam semua pasal sebelumnya dalam buku ini kita telah mengandaikan tanpa perlu penjelasan, bahwa semua proses yang diuraikan dan dipelajari itu didasarkan pada keadaan alam yang tak berubah. Sebagai misal, dalam analisis mengenai kekerapan diandaikan bahwa kejadian yang berlangsung dalam 50–100 tahun terakhir dapat digunakan untuk meramal peluang kejadian serupa yang terjadi pada masa mendatang. Sekali-sekali andaian ini menghadapi tantangan, tetapi jarang terbukti keliru.

Hal ini, paling tidak sebagian, disebabkan oleh gambaran yang keliru, apakah yang dimaksudkan dengan keberkalaan, jika dihubungkan dengan kejadian hidrologi. Yang dimaksud dengan keberkalaan dalam gejala hidrologi ialah, bahwa kemungkinan nilai tertentu kejadian acak ternyata lebih besar pada waktu tertentu ketimbang pada waktu yang lain. Dengan kata lain, ada perubahan berdaur dalam peluang, ketimbang dalam kejadian. Hal ini tidaklah mengesampingkan kemungkinan peluang terbesar (misalnya) yang berlangsung pada waktu-waktu ketika peluangnya adalah terkecil.

Brooks dan Carruthers [26] membahas keberkalaan curah hujan tahunan di Inggris, yang rupanya berjangka waktu 51,7 tahun. Mereka selanjutkannya menunjukkan, bahwa peluang suatu tahun basah hampir-hampir dua kalianya tahun kering di dekat puncak daur 51,7 tahun itu, sedangkan di dekat bagian lembahnya, peluang itu kurang dari setengahnya. Hal ini benar, walaupun baik tahun sangat basah dan sangat kering kedua-duanya terjadi pada waktu yang bersesuaian dengan peluang terkecil.

Rupanya-rupanya sia-sia belaka untuk menggunakan cara statistika untuk menurunkan peluang berlangsungnya kejadian tertentu tanpa mengenali, bahwa proses tertentu, yang merupakan sebagian penyebab bagi kejadian itu, mungkin saja dirinya sendiri dapat bergantung pada keberdauran, dan dengan itu mengubah peluang yang diturunkan itu sampai batas tertentu. Meskipun kesempatan untuk menggunakan informasi seperti itu mungkin jarang, kehadirannya harus diperiksa untuk analisis peluang jangka-pendek yang mana pun yang waktu-ruangnya pada tingkat yang sama dengan data yang diturunkan itu.

Cochrane, dalam analisis hidrologi Danau Nyasa dan DAS-nya [27] menunjukkan nasaban antara tingkat berubahnya bintik matahari dan ‘air bebas’-nya Danau Nyasa. (Istilah ‘air bebas’ menunjuk kepada limpasan sisa

dari DAS dan simpanan pada danau itu, setelah bagian yang hilang dikurangi dari curah hujan.) Dalam tulisan yang lain [28], ia menukil banyak acuan untuk mendukung ihwal itu akan kelakuan berdaur dalam gejala hidrologi; acuan itu menyangkut hasil kerja orang di banyak bagian dunia. Suatu telaah yang tidak berat sebelah mengenai buktinya membawa penulis buku ini pada simpulan, bahwa keberkalaan dalam hidrologi memang ada, meskipun kita dewasa ini belum benar-benar memahaminya.

Acuan

- 1 Morgan, H. D. Estimation of design floods in Scotland and Wales. *Symposium on River Flood Hydrology. Inst. Civ. Eng., London*, 1966.
- 2 Mulvaney, T. J. On the use self-registering rain and flood gauges. *Trans. Inst. Civ. Eng. Ireland*, 4 (No. 2) (1850) 1
- 3 Lloyd-Davies, D. E. The elimination of storm-water from sewerage systems. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 164 (1906) 41
- 4 Bransby-Williams, G. Flood discharge and dimensions of spillways in India. *Engineer*, 134 (1922) 32.1
- 5 Natural Environment Research Council. Flood Studies Report, Vol. I, Nerc, 1975, h. 185-213.
- 6 Farquharson, F. A. K., Lowing, M. J. dan Sutcliffe, J. V. Some aspects of design flood estimation. *BNCOLD Symposium on Inspection, Operation and Improvement of Existing Dams*, Newcastle University, 1975 Paper 4.7.
- 7 Cunnane, C. Unbiased plotting positions-a review. *J. Hydrol.*, 37 (1978) 205-22
- 8 Weibull, W. A Statistical theory of strength of materials. *Ing. Vet. Ak. Handl.*, 151, Stockholm, 1939
- 9 California Department of Public Works. Flow in California streams. *Bulletin* 5, Calif. Dept. Pub. Wks., 1923.
- 10 Hazen, A. Flood Flow, John Wiley, New York, 1930.
- 11 Gringorten, I. I. A plotting for extreme probability paper. *J. Geophys. Res.*, 68 (1963) 813-14.
- 12 Whipple, G. C. The element of chance in sanitation. *J. Franklin Inst.*, 182 (1916) 37
- 13 Gumbel, E. J. On the plotting of flood discharges. *Trans. Am. Geophys. Union*, 24, Parwa 2 (1943) 699

- 14 Gumbel, E. J. Statistical theory of extreme values and some practical applications. *National Bureau of Standards (U.S.) Appl. Math. Ser.*, 33 (Februari 1954)
- 15 Ref. 16, discussion by E. J. Gumbel, h. 438.
- 16 Powell, R. W. A simple method of estimating flood frequency. *Civ. Eng.*, 13 (1943) 105
- 17 Ven Te Chow dan Yevjevich, V. M. *Statistical and Probability Applied Hydrology* (ed. Ven Te Chow), McGraw-Hill, New York, 1964
- 18 Dalrymple, T. Flood Frequency Analysis. *U.S. Geological Survey Water Supply, Paper 1543-A*, Washington D. C., 1960
- 19 Pearson, K. *Tables for Statisticians and Biometricalians*, 3rd edition, Cambridge University Press, 1930
- 20 Guidelines for determining flood flow frequency. *Bulletin 17, Hydrology Communication Water Resources Council*, Washington D.C., Juni 1977
- 21 Harter, H. L. A new table of percentage points of the Pearson Type III Distribution. *Technometrics* 11, No. 1 (1969) 177-187.
- 22 Sutcliffe, J.V. Methods of flood estimation: a guide to the Flood Studies Report. *Report No. 49, Institute of Hydrology*, Wallingford, United Kingdom, 1978
- 23 Poots, A. D. dan Cochrane, S. R. Design flood estimation for bridges culverts and channel improvement works on small rural catchments. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 66, TN 229 (1979) 663-6
- 24 Poots, A. D. A flood prediction study for small rural catchments. Unpublished M.Sc. thesis, Queen's University, Belfast, 1979
- 25 Flood prediction for small catchments. *FSR Suppl. Report No. 6, Instotute of Hydrology*, Wallingford, United Kingdom, 1978
- 26 Brooks, C. E. P. dan Carruthers, N. *Handbook of Statistical methods in Meteorology*, H.M.S.O., London, 1953, h. 330
- 27 Cochrane, N. J. Lake Nyasa and the River Shire, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 8 (1957) 363
- 28 Cochrane, N.J. Possible non-random aspects of the availability of water for crops. *Conf. Civ. Eng. Problems Overseas, Inst. Civ. Eng.*, London, Juni 1964, Paper No. 3

Bacaan lebih lanjut

- Alexander, G. N. Some aspects of time series in hydrology. *J. Inst. Eng. Australia*, 26 (1954) 188-98
- Anderson, R.L. Distribution of the serial correlation coefficient. *Ann. Math. Stat.*, 13 (1941) 1-13
- Beard, L. R. Simulation of daily streamflow. *Proc. Int. Hydrol. Symposium*, Fort Collins, Colorado, 6-8 September 1967, Vol. 1, h. 624-32
- Fiering, M. B. *Streamflow Synthesis*, Macmillan, London, 1967.
- Hall, M. J. dan O'Connell, P.E. Time series analysis of mean daily river flows. *Water and water Engineering*, 76 (1972) 125-33.
- Hannan, E.J. *Time Series Analysis*, Methuen, London, 1960
- Kisiel, C.C. Time series analysis of hydrologic data. *Advances in Hydroscience* Vol. 5 (ed. Ven Te Chow), Academic Press, New York, 1969, h. 1-119
- Langbein, W.B. Annual floods and the partial duration flood series. *Trans. Am. Geophys. Union*, 30 (Desember 1949) 879
- Matalas, N. C. Time series analysis. *Water Resources Res.*, 3 (1967) 817-29
- Matalas, N. C. Time series analysis. *Water Resources Res.*, 3 (1967) 937-45
- Moran, P. A. P. *An Introduction to Probability Theory*, Clarendon Press, Oxford, 1968
- National Research Council. *Estimating probabilities of extreme floods; Methods and recommended research*. Water Science and Technology Board, Commission on Eng. and Tech. Systems. National Academy Press, Washington D.C., 1989
- Newton, D.W. Realistic assessment of maximum flood potentials. *J. Hyd. Eng. ASCE*, 109, No. 3 (1983) 905
- O'Donnell, T. Computer evaluation of catchment behaviour and parameters significant in flood hydrology. *Symposium on River Flood Hydrology*, Inst. Civ. Eng., 1965
- Qumpo, R. G. Stochastic analysis of daily river flows. *J. Hydraulics Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 94 HY1 (1968) 43-57
- Symposium on Hydrology of Spillway Design by the Task Force on Spillway Design Floods on the committee on Hydrology. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 90, HY3 (Mei 1964)

Wiesner, C. J. Hydrometeorology and river flood estimation. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 27 (1964) 153

Yevjevich, V. M. dan Jeng, R. I. Properties of non-homogeneous hydrologic series. *Hydrology Paper No. 32, Colorado State University*, 1969

Wang, B.H. dan Revell, R. W. Conservatism of probable maximum flood estimates. *J. Hyd. Eng. ASCE*, 109, No. 3 (1983) 400

Soal

9.1 Seorang kontraktor merencanakan membangun sebuah bendung pelenceng dalam sungai yang terkena banjir tahunan. Rekaman hidrologi yang meliputi lebih dari 30 tahun, menunjukkan aliran banjir terbesar $7800 \text{ m}^3/\text{det}$. dan yang terkecil $2000 \text{ m}^3/\text{det}$. Angka maksimum tahunan yang teramati itu rajahannya berupa garis lurus pada kertas setengah-log yang masa ulangnya dirajah secara logaritma.

Bendung pelenceng itu akan ada di sungai selama empat musim banjir berturut-turut dan diputuskan untuk membangunnya cukup tinggi untuk melindungi terhadap banjir 20-tahunan.

Nilailah (tanpa merajah) banjir 20-tahunan itu, dan tentukan peluang dapat terjadinya selama umur bendung pelenceng itu.

9.2 Data curahan tahunan untuk Edinburgh tertera di bawah untuk 1948–1963, termasuk tahun itu.

Tahun	Curahan (inci)	Tahun	Curahan (inci)
1948	36,37	1956	28,17
1949	28,01	1957	25,68
1950	28,88	1958	29,51
1951	30,98	1959	18,04
1952	24,41	1960	24,38
1953	23,64	1961	25,29
1954	35,15	1962	25,84
1955	18,08	1963	30,24

- i taksir curah hujan maksimum yang dapat diharapkan dalam jangka waktu 20 tahun dan 50 tahun;
- ii beri batasan kemungkinan maksimum yang 20 tahunan yang disamai atau dilampaui dalam 9 tahun setelah tahun 1963.

9.3 Bicarakan cara yang terpakai umum untuk merajah kekerapan luahan dalam sungai. Senaraikan langkah yang terpisah-pisah yang harus diambil untuk meramal, bagi sungai tertentu, luahan banjir dengan peluang kejadiannya sebesar $0,005$ dalam sebarang tahun. Andaikan pengamatan papan duga selama 50 tahun dan sejumlah hasil pengukuran yang terekam baik dengan amatan lereng yang berbarengan.

9.4 Tabel berikut ini menyenaraikan dalam tingkat kebesaran luahan harian rataan yang terekam sebuah sungai dengan luas DAS-nya 12.560 km^2 .

Tahun	Tanggal	Luahan (m^3/det)	Tahun	Tanggal	Luahan (m^3/det)
1948	29 Mai	2804	1922	24 Mai	1716
1948	22 Mai	2450	1925	19 Mai	1694
1933	10 Juni	2305	1924	20 Mai	1668
1928	26 Mai	2042	1917	13 Mai	1609
1932	14 Mai	2042	1916	9 Juni	1586
1933	4 Juni	2016	1912	19 Juni	1563
1917	17 Juni	1997	1918	21 Mai	1495
1947	8 Mai	1980	1918	5 Mai	1495
1917	30 Mai	1974	1929	10 Juni	1492
1921	20 Mai	1974	1943	29 Mai	1478
1927	8 Juni	1943	1922	26 Mai	1476
1928	9 Mai	1961	1919	23 Mai	1473
1927	17 Mai	1818	1936	10 April	1433
1917	15 Mai	1801	1936	5 Mai	1410
1938	19 April	1796	1923	26 Mai	1405
1936	15 Mai	1790	1927	28 April	1314
1922	6 Juni	1767	1939	4 Mai	1314
1932	21 Mai	1762	1934	25 April	1300
1912	20 Mai	1753	1945	6 Mai	1257
1938	28 Mai	1722	1935	24 Mai	1246
1920	18 Mai	1235	1926	19 April	1017
1914	18 Mai	1195	1937	19 Mai	971
1931	7 Mai	1155	1944	16 Mai	969
1913	13 Juni	1119	1930	25 April	878
1940	12 Mai	1051	1941	13 Mai	818
1942	26 Mai	1051	1915	19 Mai	799
1946	6 Mai	1037			

Banjir tahunan rataannya adalah $1502 \text{ m}^3/\text{det}$. dan simpangan baku deret tahunan itu adalah $467 \text{ m}^3/\text{det}$.

Hitung masa ulang dan peluang baik deret memanggu maupun deret tahunannya. Rajah data deret memanggu itu pada kertas setengah-log dan

deret tahunan itu dirajah pada kertas log-normal dan kertas peluang Gumbel. Taksir dari setiap luahan itu banjir dengan peluang sekali dalam 200 tahun.

- 9.5 Curah hujan tahunan, dalam inci, untuk Waduk Woodhead selama jangka waktu perekaman 1921–1960 disenaraikan di bawah ini:

Tahun	Curah hujan	Tahun	Curah hujan
1921	44,48	1941	46,79
1922	56,25	1942	43,38
1923	65,57	1943	45,87
1924	45,72	1944	59,00
1925	44,78	1945	42,74
1926	48,02	1946	55,39
1927	54,48	1947	41,04
1928	51,53	1948	45,03
1929	48,11	1949	44,11
1930	59,03	1950	52,15
1931	60,59	1951	55,43
1932	47,20	1952	48,87
1933	38,16	1953	43,26
1934	45,38	1954	63,13
1935	54,62	1955	36,46
1936	53,03	1956	56,57
1937	40,98	1957	51,79
1938	50,88	1958	51,22
1939	49,95	1959	39,58
1940	46,27	1960	60,66

Rataan dan simpangan baku untuk jangka waktu itu masing-masing adalah 49,69 inci dan 7,08 inci.

Susun data itu sesuai dengan peringkatnya. Hitung masa ulang dan peluang. Rajah data itu pada kertas peluang.

- a Berapakah curah hujan tahunan 50-tahunan dan 100-tahunannya? Bagaimanakah perbandingan kedua angka itu, dengan ramalan yang dibuat dengan menggunakan teori Gumbel? Pembatas apakah yang harus dibuat jika yang digunakan hasil dari yang kedua?
- b Bagaimanakah peluangnya, bahwa curah hujan yang 20-tahunan terlampaui dalam jangka waktu 10-tahun, 20-tahun, dan 40-tahun?
- c Bangunan air tertentu akan diripta untuk umur berguna selama 50 tahun. Bangunan itu dapat menenggang sese kali curahan tahunan

sebesar 70 inci. Apakah peluangnya, bahwa curah hujan sebesar itu dapat terjadi selama umur projek itu?

- 9.6 Sebuah sungai terkena banjir tahunan, dan dari rekaman banjir terbesar tahunan yang teramat selama 30 tahun, datanya dapat dirajah sebagai garis lurus pada kertas setengah-log, dengan masa ulang dirajah pada skala log. Banjir terbesar yang terekam adalah 900 m³/s dan terkecil adalah 150 m³/s. Jika 1000 m³/s dipilih sebagai luahan ripta, berapakah peluangnya bahwa nilai itu akan terlampaui dalam 20 tahun mendatang.
- 9.7 Di bawah ini adalah aliran masuk harian rataan tahunan (dalam m³/s) ke sebuah waduk selama 20 tahun berturut-turut
 7,31 6,90 6,64 5,08 5,37 5,75 7,30 7,22 6,48 5,20
 6,38 5,51 5,65 5,82 5,81 6,30 6,53 6,12 6,06 6,07
 Rataan dan simpangan baku data itu masing-masing adalah 6,175 dan 0,68 ($\times 10^3$ m³).
 a Rajah data itu pada kertas peluang Gumbel. Cocokkan sebuah garis lurus pada data itu dan taksir aliran masuk tahunan yang 100-tahunan. Bandingkan rajahan dengan nilai dari analisa jika $y = 4,60$ untuk $T = 100$ tahun.
 b Berapakah peluang nilai 100-tahunan ini yang terjadi dalam jangka waktu 10 tahun berturut-turut?
- 9.8 Tentukan kebesaran banjir yang 200-tahunan dari DAS dalam Wilayah 2 Inggris Raya, jika diberikan informasi di bawah ini:
 luas DAS 107 km²
 kekerapan sungai 1,32 pertemuan/km²
 S1085 24,2 m/km
 30 persen dari daerah itu masuk kelas tanah 1, 35 persen masuk kelas tanah 2, 20 persen adalah kelas tanah 4, dan 15 persen adalah kelas tanah 5; 5 persen DAS itu tersalirkkan melewati danau; curah hujan 2 hari 5M adalah sebesar 100 mm pada titik pengeluar DAS;
 $r = (60 \text{ menit } 5M/2 \text{ hari } 5M) \times 100 = 20 \text{ persen}$
 ketunaan kelengsangan tanah = 4 mm
 Kapasitas pelimpah berapa besarkah kiranya akan anda ripta, dengan bendungan tanah di tempat itu dan mengapa?
- 9.9 Luahan banjir tahunan dalam sebuah sungai selama 24 tahun disenaraikan di bawah ini:

32,6	17,0	59,5
22,7	5,7	56,6
11,3	36,8	20,0
34,0	51,0	11,8
93,4	8,5	85,2
31,1	73,6	31,1
19,8	12,8	25,0
25,5	25,4	23,7

Buatlah peringkat kejadian itu mengikuti kebesarannya dan hitung masa ulang dan peluangnya. Taksir luahan banjir yang 100-tahunan.

Berapakah peluang banjir yang demikian itu dalam dua tahun berikutnya?

- 9.10 Laporan Penelitian Banjir menyajikan persamaan yang berikut ini untuk banjir tahunan rataan di wilayah bagian tengah Inggris:

$$Q = 0,0213 \text{ AREA}^{0,94} \text{ STMFRQ}^{0,27} \text{ SOIL}^{1,23} \text{ RSMD}^{1,03} (1+\text{LAKE})^{-0,85} \\ \text{S1085}^{0,16}$$

- a Bicarakan bina (keberartian) setiap suku dalam persamaan itu.
 - b Uraikan, bagaimanakah anda kiranya akan menggunakan persamaan itu untuk menentukan banjir dengan masa ulang T -tahun (Q_T).
 - c Bagaimanakah anda akan mengubah Q_T untuk meripta sebuah pelimpah bendungan? Tunjukkan berapakah nilai yang dimiliki T dalam hal ini, dan apakah Q_T dapat digunakan dengan langsung.
 - d Tunjukkan keuntungan nisbi cara penentuan banjir ini dan pendekatan hidrograf satuan-curah hujan. Beri beberapa contoh keadaan yang memungkinkan digunakannya masing-masing cara.
- 9.11 Dengan menggunakan data yang disenaraikan pada soal 9.4, tentukan dengan memakai sebaran log Pearson Jenis III, luahan harian rataan tahunan maksimum, dengan masa ulang 50-tahun.

- 9.12 a Dengan menggunakan persamaan DAS kecil

$$Q = 0,015 \text{ AREA}^{0,882} \text{ RSMD}^{1,462} \text{ SOIL}^{1,904}$$

taksir kebesaran banjir 10 tahunan, 100 tahunan, dan 500 tahunan dari sebuah DAS dalam Wilayah 6 seluas

$$\begin{aligned} \text{AREA} &= 20 \text{ km}^2 \\ \text{RSMD} &= 50 \text{ mm} \\ \text{SOIL} &= 0,3 \end{aligned}$$

dengan menggunakan gambar 9.8.

- b Hitung hidrograf satuan sintesis FSR bagi DAS itu, jika

$$\begin{aligned} \text{MSL} &= 4,5 \text{ km} \\ \text{S1085} &= 6,0 \text{ m/km} \\ \text{tak ada perkembangan kota} \end{aligned}$$

Jika tercurah dua hujan bersih pada DAS itu berturut-turut dengan jangka waktu 1 jam dan berkelebatan 3 mm/jam, yang terpisahkan oleh waktu kering yang lamanya 1 jam, limpasan permukaan puncak sebesar apakah dapat anda harapkan? Abaikan aliran dasar.

- 9.13 Jika $T_p = 46,6 (\text{MSL})^{0,14} (\text{S1085})^{-0,38} (1+\text{URBAN})^{-1,99} (\text{RSMD})^{-0,4}$, gunakan hidrograf satuan sintesis FSR untuk menaksir aliran puncak sebuah DAS seluas 50 km^2 , dengan

$$\begin{aligned} \text{MSL} &= 8 \text{ km} \\ \text{S1085} &= 5,0 \text{ m/km} \\ \text{RSMD} &= 75 \text{ mm} \\ \text{tak ada perkembangan kota} \end{aligned}$$

bila DAS itu terkena curahan hujan bersih hingga 7 jam dengan kelebatan berikut:

$$\begin{array}{ll} \text{Jam} & \text{1 dan 7} \quad 0,2 \text{ cm/jam} \\ & \text{2 dan 6} \quad 0,4 \text{ cm/jam} \\ & \text{3 dan 5} \quad 0,8 \text{ cm/jam} \\ & \text{4} \quad 1,5 \text{ cm/jam} \end{array}$$

dan aliran dasar naik dari $2 \text{ m}^3/\text{det}$. pada awal hujan hingga $5,5 \text{ m}^3/\text{det}$. pada akhir hujan itu, dan setelah itu menyurut dengan kecepatan sama. Andaikan limpasan tanggapan mulai secara berbarengan dengan tercurahnya hujan.

- 9.14 Luahan tahunan maksimum sungai selama pengamatan tiga puluh tahun disenaraikan di bawah ini. Luahan rataan dan simpangan baku untuk jangka waktu itu masing-masing adalah $131,5 \text{ m}^3/\text{det}$. dan $83,0 \text{ m}^3/\text{det}$. Buatlah peringkat data itu, hitung peluang dan rajah datanya pada kertas peluang log-normal dan setengah log.

Tahun	Q_{puncak} (m ³ /det.)	Tahun	Q_{puncak} (m ³ /det.)
1928	104	1944	57
1929	48	1945	229
1930	95	1946	129
1931	46	1947	153
1932	101	1948	137
1933	311	1949	54
1934	72	1950	102
1935	127	1951	137
1936	203	1952	196
1937	50	1953	114
1938	89	1954	161
1939	181	1955	294
1940	88	1956	360
1941	81	1957	20
1942	160	1958	32
1943	143	1959	226
		1960	40

- a Rajah garis yang paling cocok bagi data yang ada dan ramal luahan yang 100-tahunan dan yang 400-tahunan.
- b Jika diberikan persamaan Gumbel $Q_T = Q_{\text{av}} + \sigma(0,78y - 0,45)$ dan bahwa $y = 4,60$ untuk $T = 100$ tahun dan $y = 5,99$ untuk $T = 400$ tahun, bandingkan hasil dari teori Gumbel dan rajahan anda.
- c Adakah peluang mengenai aliran yang menyamai atau melampaui $300 \text{ m}^3/\text{det}$. dalam lima tahun yang akan datang?
- 9.15 Tabel di bawah ini menyenaraikan banjir puncak tahunan bagi sebuah tempat penyukatan sungai. Buatlah peringkat kejadian itu, hitung peluang dan rajah hasilnya pada kertas peluang log-normal.

Gunakan $T_r = \frac{n + 0,2}{m - 0,4}$.

Tahun	Aliran banjir (m ³ /det.)	Tahun	Aliran banjir (m ³ /det.)
1945	1150	1957	445
1946	780	1958	2600
1947	530	1959	300
1948	1200	1960	870
1949	3300	1961	2100
1950	1100	1962	2000
1951	720	1963	700
1952	900	1964	580
1953	600	1965	3010
1954	420	1966	1100
1955	1300	1967	850
1956	1800	1968	800

Berapakah peluang terjadinya banjir yang sama atau yang melebihi $2900 \text{ m}^3/\text{det}$. yang terjadi pada sebarang tahun, dan pada jangka waktu sebarang yang terdiri dari empat tahun berturut-turut?

- 9.16 Mencakup bahan dari bab 1–9, dan dimasukkan di sini sebagai sebuah contoh soal pilihan ganda.
- 9.16 Di bawah ini disajikan sebuah daftar jawaban yang mungkin diberikan, masing-masing dikenali dengan angka, dan masing-masing dengan pertanyaannya. Angka yang menunjuk kepada jawaban yang betul harus dipilih dan ditulis dalam kotak yang disediakan di samping setiap pertanyaan itu. Jumlah kotak di samping setiap pertanyaan itu menunjukkan dengan jelas jumlah jawaban yang diperlukan.

- | | | | |
|----|---------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | kecepatan angin | 13 | menyukat dg pengenceran |
| 2 | isohiet | 14 | lengkung surutan l |
| 3 | rekaman ketinggian harian | 15 | kelembapan nisbi |
| 4 | luahan puncak | 16 | permukaan freati |
| 5 | lengkung jujuh aliran | 17 | cara kecepatan-luasan |
| 6 | sukat hujan otomatis | 18 | 5M |
| 7 | suhu sekitar | 19 | geologi bawah permukaan |
| 8 | kiat melacak | 20 | sinaran surya |
| 9 | psikrometer | 21 | tetumbuhan |
| 10 | pengukur arus | 22 | sebaran log Pearson jenis 3 |
| 11 | awān penutup | 23 | sebaran Gumbel |
| 12 | sukat hujan baku | 24 | sebaran normal |

25	bangunan pengukuran aliran	34	pemakaian habis
26	kelulusan akuifer	35	lengkung-S
27	panjang alas hidrograf	36	kapasitas waduk
28	surutan	37	aliran imbangan
29	masa ulang	38	hidrograf satuan
30	waktu sampai aliran puncak	39	banjir tahunan rataan
31	lengkung massa	40	poligon Thiessen
32	2M	41	faktor susutan daerah
33	laju penyadapan	42	1M

Manakah di antara butir yang ada di atas itu

- memungkinkan orang menaksir kelebatan hujan?
- digunakan orang untuk menaksir hujan sedaerah
- digunakan untuk menentukan lengkung pelacakan bagi sebuah sungai?
- digunakan dalam perhitungan penguapan harian?
- merupakan kekerapan acuan bagi curah hujan dalam cara FRS?
- mempengaruhi besarnya aliran dasar?
- merupakan parameter untuk menggambarkan hidrograf satuan?
- merupakan pernyataan bagaimanakah aliran dasar berubah dengan waktu?
- digunakan dalam perhitungan kapasitas waduk?
- kiranya digunakan dalam meripta pelimpah waduk?
- merupakan cara digunakannya ‘aliran keseimbangan’ untuk memeriksa kehandalan hidrograf satuan?
- digunakan untuk meripta kapasitas daya PLTA?
- digunakan dengan uji pompa untuk memastikan serahan yang dapat dipercaya?
- digunakan untuk merajah kejadian banjir bebas dan oleh karenanya untuk mengekstrapolasi kekerapan yang langka?
- mungkin lebih diutamakan untuk menyukat sungai kecil-kecil?
- penting dalam meripta projek pengairan?
- mengurangi penguapan?
- digunakan untuk mengubah ordinat hidrograf bila lamanya hujan penyebabnya berubah?

10 Hidrologi perkotaan

10.1 Pendahuluan

Pada waktu menaksir limpasan dari penangkap alami, penentuan T_p , waktu hingga puncak, dan *SPR*, persentasi limpasan baku (*standard percentage runoff*), mengandung suku URBAN. Serupa dengan itu, dalam bab 9, persamaan untuk \bar{Q} , banjir puncak tahunan rataan untuk Wilayah 6, bertolak dari persamaan umum itu dan mengandung suku URBAN. Untuk diingat kembali, URBAN, adalah bagian dari DAS yang menjadi daerah perkotaan. Alasan untuk memasukkan suku yang bersifat khusus ini adalah kebutuhan untuk memperhitungkan daerah kedap berupa atap bangunan, jalan, lantai keras, tempat parkir, dsb. dalam lingkungan terbangun. Dalam lingkungan seperti itu peresapan dapat diabaikan dan pelimpasan dipercepat oleh sistem penyaliran berupa galur, pipa, dan riol. Jelas, waktu sampai puncak hidrograf menyusut, sedangkan persentasi limpasannya bertambah, dibandingkan dengan penangkap alami berupa tanah yang lulus dan tetumbuhan.

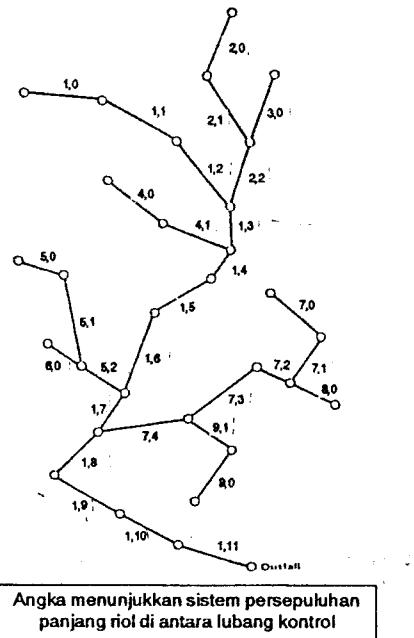
10.2 Penggunaan cara kesebandingan

Cara Kesebandingan (Cara Rasional) untuk menaksir banjir, ternyata sangat bermanfaat dalam hidrologi yang khusus berhubungan dengan penyaliran di daerah perkotaan. Telah ditunjukkan dalam pembahasan mengenai cara ini dalam bab 9, bahwa kesulitan untuk menilai koefisien C menyebabkan cara itu tidak banyak gunanya. Tetapi jika $C = 1,0$, yaitu keadaan yang benar-benar kedap, maka logikanya, daerah yang memberi air dikalikan hujan yang tercurah itulah yang memberi limpasan. Atas dasar itu pihak peripta (perencana) dapat menaksir dengan wajar ukuran pipa. Periptaan riol didasarkan atas sistem yang dapat mengatasi hujan berkelebat tinggi dengan kekerapan dan jangka waktu yang dipilih sebelumnya. Untuk tujuan penyaliran daerah seperti lingkungan

perumahan dan perkampungan digunakan Cara Kesebandingan menurut Lloyd-Davies [1], yang kemudian diubahsuaiakan; inilah yang merupakan dasar dari TRRL Road Note [2].

Cara yang dianjurkan itu meliputi tatacara yang berikut:

- Dibuat denah jaringan riol yang diusulkan; contohnya disajikan dalam gambar 10.1. Pipa pesusunnya diberi nomor sesuai dengan sistem persepuhan. Riol yang terpanjang (diukur dari mulut panyalir itu) diberi nomor 1 dan setiap panjang pipa berturut-turut diberi nomor 1.0, 1.1, 1.2, dst., dimulai dari ujung hulunya. Riol cabang pertama yang bersambung pada 1 diberi nomor 2, dan riol cabang yang memberi air kepada cabang itu, bagian pesusunnya dinomori 2.0, 2.1, 2.2, dst. Proses itu diulang hingga setiap pipa dalam sistem itu bernomor.



Gambar 10.1 Denah kunci sistem penyaliran (dikutip dari TRRL Road Note 35 (1976))

- Sekarang dibuat tabel, dan tabel 10.1 adalah contohnya. Kemudian dimasukkan data dari lajur 1, 2, 3, 4, 9, 10, dan 11. Semua keterangan itu harus tersedia dari pemeriksaan di tempat dan usulan bangunan serta

rencana. Perhatikan, bahwa hanya daerah yang secara langsung memberi saham airlah yang digunakan. Daerah lulus berupa kebun, hutan, dst tidak dimasukkan.

- Lajur 12 kemudian diselesaikan dengan menambahkan kapadanya data air dari cabang pada percabangan, setelah tabel itu selesai. Lajur 12 menyatakan luasan permukaan seluruhnya yang memberi saham air kepada panjang riol tertentu.
- Sekarang perlu untuk menemukan waktu kumpulnya, yaitu waktu yang diperlukan hujan yang tercurah pada suatu daerah kecil dengan permukaan kedap yang memberi saham kepada pipa 1.0 untuk mencapai lubang got tertutup pada ujung hilirnya. Untuk itu perlu untuk mengandaikan garis tengah dan bahan pipa tertentu bagi 1.0. Kita perlu memilih waktu masuk, dan disarankan 2 menit untuk daerah perkotaan yang biasa, naik sampai 4 menit untuk daerah luas yang diperkeras. Jika kita mengetahui garis tengah pipa serta kelandaianya, kecepatan lubang-pipa penuh dapat ditemukan dari tabel yang terbit [3] dengan menggunakan rumus Colebrook-White dan nilai k yang cocok dalam rumus itu, bagi bahan pipanya. Nilai ini dimasukkan dalam lajur 5, dan dengan panjang pipa lajur 3, waktu pengaliran dapat dihitung dan dimasukkan dalam lajur 6.
- Banyaknya hujan yang tercurah yang bersesuaian dengan waktu kumpul dalam lajur 7 (waktu masuk dan waktu alir dalam hal pipa yang pertama) kemudian ditentukan dengan memakai tabel Kantor Meteorologi. Tabel itu didasarkan pada Laporan Penelitian Banjir oleh Bagian Meteorologi. Dokumen itu dapat diperoleh bagi titik acuan Kekisi Nasional Inggris (kira-kira di tengah-tengah daerah penyaliran ybs.) dari Kantor Meteorologi Inggris, London Road, Bracknell, Berkshire. Perhatikan, bahwa perlu untuk memilih kekerapan hujan ripta. Kekerapan yang cocok dapat dipilih antara setahun untuk tata-air permukaan yang terpisah, dan 100 tahun untuk sistem gabungan yang lama dengan bangunan yang berlantai bawah. Tabel 10.2 menyajikan contoh khas yang diringkaskan.

Tabel 10.1 Lembar ripta rumus kesebandingan^{a,b}

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
angka selisih Panjang paraspipa (m)	kelarangan jang (m)	kecepatan patahan (1 inci) (m/s)	waktu air (menit)	waktu kumpul (menit)	tingkat curahan hujan (mm/jam)	derah kedap (ha)	tingkat curahan hujan (mm/jam)	bangunan, jalan halaman, dst.	jumlah halaman, (9 + 10)	berlonggok	garis tengah pipa (l/s)	tingkat aliran (l/s)	catatan	garis tengah pipa (mm)
1,0	1,10	63,1	.57	1,33	.79	2,79	69,9	0,089	0,053	0,142	0,142	26,8	150	
1,1	1,12	66,1	.59	1,70	.65	3,44	62,5	0,077	0,109	0,186	0,328	56,9	225	
1,2	0,73	84,7	1,16	1,46	0,97	4,41	57,4	0,081	0	0,081	0,409	65,2	300	
2,0	1,40	44,8	.32	2,32	.32	2,32	72,5	0,113	0,081	0,194	0,603	39,1	225	
2,1	0,61	49,1	.80	1,77	.46	2,78	67,9	0,045	0,105	0,150	0,753	64,9	300	
3,0	0,98	48,5	.49	1,43	.56	2,56	70,5	0	0,129	0,129	0,862	25,2	150	
2,2	1,65	54,3	.33	2,74	.33	3,11	65,5	0,101	0,073	0,174	1,056	117,7	300	
1,3	1,22	27,7	.23	3,29	.14	4,55	56,9	0,121	0,235	0,356	1,412	223,2	300	
4,0	0,88	54,9	.62	1,66	.55	2,55	70,5	0,093	0,093	0,186	0,498	36,4	225	
4,1	0,58	45,7	.79	1,48	.52	3,07	66,3	0,069	0,040	0,109	1,707	54,2	225	
1,4	0,52	22,9	.43	2,77	.14	4,69	55,8	0,069	0	0,069	1,776	275,3	375	

^a Disediakan di TRRL Road Note 35 (1976).^b Kekasapan badai setai dalam 1 tahun. Koefisien kekasapan 0,6 mm. Waktu masuk 2 menit.**Tabel 10.2 Tingkat curahan hujan dalam mm/jam untuk jangka waktu dan masa ulang bagi tempat tertentu di Inggris bagian selatan^a**

Jangka (menit)	Masa ulang (tahun)			
	1	2	10	100
2,0	75,6	93,6	138,3	213
3,0	66,3	82,3	123,4	192
5,0	54,3	67,1	102,5	163
8,0	43,4	53,4	82,9	135
12,0	35,0	42,8	66,9	111
20,0	25,9	31,4	40,3	83

^aDiturunkan dari tabel 7 TRRL Road 35 (1976).

f Dengan menggunakan Rumus Kesebandingan (Rumus Rasional)

$$Q \text{ (m}^3/\text{det.}) = 0,278 C_i \text{ (mm/jam)} \times A \text{ (km}^2\text{)} \text{ atau}$$

$$Q \text{ (l/det.)} = 2,78 C_i \text{ (mm/jam)} \times A \text{ (hektar)}$$

dan dengan mengambil C sebesar 1,0, lauhan yang perlu dipindahkan ke dalam pipa ditentukan dan dibandingkan dengan kemampuan yang tersedia dari pipa andaian itu dalam lajur 6. Jika yang terakhir itu tidak tersedia, diandaikan pipa berikutnya dengan garis tengah yang lebih besar, dan proses pada langkah d dan e diulangi lagi.

g Misalkan pipa 1,0 telah dipilih, dan ternyata dapat diterima. Sekarang luahannya ditambahkan kepada angka aliran masuk ke pipa yang berikutnya. Ini dilakukan secara otomatis lewat lajur 12, luasan-sebaran terlonggok. Kita dapat menangani jeiring pipa itu sebaik-baiknya dengan memeriksa tabel 10.1.

Ada banyak saran dan aturan yang lain untuk meripta secara optimum sistem air permukaan yang benar-benar terpisah-pisah dan cara seperti itu yang melibatkan pula penyaliran daerah lulus tambahan. Untuk itu pembaca hendaknya memeriksa acuan [2].

Meskipun tatacara Kesebandingan TRRL telah dibahas untuk memberi gambaran mengenai dasar yang digunakan, Cara Kesebandingan yang Telah Diubah mengikuti Tatacara Wallingford [4] telah memperhalus dan memperbaiki cara itu. Pengubahan itu, di antaranya, meliputi nilai koefisien C yang diturunkan dari

$$C = C_v \times C_r$$

dan di sini C_v adalah koefisien limpasan yang menunjukkan volum dan C_r adalah koefisien pelacakan. C_v beragam, antara 0,6 dan 0,9, bergantung pada sifat tanah yang mengalasi (lulus/kedap) dan C_r memiliki nilai yang disarankan sebesar 1,3; jadi pengaruhnya secara keseluruhan tidaklah besar. Juga yang sedikit berubah adalah waktu-masuk air, yang ada hubungannya dengan panjang dan kemiringan pada anak-daerah tangkapan, dan beragam antara 3 dan 10 menit, bergantung pada kekerapan ripta yang dipilih, alih-alih yang 2 menit pada TRRL.

10.3 Cara hidrograf

Cara Kesebandingan yang telah dibahas di atas, memberikan kita taksiran mengenai aliran puncak dalam sebuah sistem, tetapi tidak menyediakan hidrograf luahan. Selain itu, cara itu juga tidak memberi tempat untuk keragaman kelebatan curahan hujan sejalan dengan waktu, yang terjadi secara alami.

Usaha pertama yang berhasil dengan pemodelan tata-riol dengan hidrograf yang didasarkan pada penampang hujan, dan tidak pada kelebatan rerata yang seragam sebagaimana diandaikan pada Cara Kesebandingan, adalah Cara Hidrograf TRRL. Cara ini masih banyak digunakan orang. Tetapi Cara Hidrograf pada Tatacara Wallingford jauh lebih rumit. Dari sejak awalnya, cara itu dibuat untuk digunakan sebagai sederet program komputer, dan menggambarkan tingkat perkembangan cara itu. Dasarnya adalah sbb.:

- Sejumlah penampang curah hujan ripta dihitung untuk nilai yang ditentukan perihal jangka waktu, masa ulang, hujan 5M-60 menit, dan nilai r untuk tempat tertentu. Penampang musim panas, harus digunakan untuk jangka waktu 15, 30, 60, dan 120 menit, diperiksa untuk setiap masa ulang.
- Data jejarung pipa dan daerah yang memberikan air hujan, bersama nilai C_v dan C_r , dimasukkan.
- Persenai limpasan dari seluruh daerah tangkapan dihitung dan dihitung setiap faktor limpasan yang terpisah-pisah dari ketiga jenis permukaan (permukaan diperkeras, atap miring, dan daerah lulus).
- Hietografi curah hujan yang terpilih dari a dialihkan ke sepuluh hidrograf limpasan baku dengan menggunakan model limpasan permukaan untuk tiga lereng yang khas dan tiga jenis permukaan ditambah sebuah lagi untuk atap yang miring. Simpanan dalam lekuk, jika ada, diturunkan lebih dulu dari hietografi.

- Hidrograf limpasan permukaan yang memberikan saham air secara langsung kepada pipa dihitung dari hidrograf baku, daerah yang memberi saham air, dan persenai faktor limpasan.
- Hidrograf yang diperoleh secara demikian itu ditambahkan kepada hidrograf aliran masuk, pada lubang got tertutup di bagian hulu.
- Program itu kemudian menentukan ukuran pipa baku yang terkecil, dari bentuk yang ditentukan, untuk meneruskan luahan puncak pada lubang got-tertutup di hulu.
- Hidrograf gabungan itu dilacak lewat pipa itu dengan menggunakan model rutin Muskingum-Cunge untuk aliran permukaan-bebas.
- Langkah e-h diulang untuk setiap panjang pipa.
- Langkah e-i diulang untuk sederet kejadian hujan yang memiliki masa ulang sama tetapi jangka waktunya berbeda-beda.

Tatacara Willingford selanjutnya meliputi pula program untuk mengoptimalkan sistem yang diusulkan dan mengimak sistem yang ada. Bangunan riol peringkat lebih rendah, kolam penando, dan sistem gabungan pembuangan air hujan dan air kotor semuanya dapat ditangani.

Acuan

- Lloyd-Davies, D. E. The elimination of storm-water from sewerage systems. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 164 (1906) 41
- TRRL Road Note 35. A guide for engineers to the design of storm sewer systems*, ed. 2, HMSO, London, 1976
- Hydraulics Research Station. *Charts for the hydraulic design of channels and pipes*, ed. 4, HMSO, London, 19784
- Dept of Environment. *The Wallingford Procedure Design and analysis of urban storm drainage* (jilid 5), HMSO, London 1981

Bacaan lebih lanjut

- Colyer, P. J. Performance of storm drainage simulation models. *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 63, Parwa 2 (Juni 1977) 293
- Construction Inudstry Research and Information Association A, Rainfall, Runoff and surface water drainage of urban catchments. *Proceedings of the research colloquium at Bristol, April 1973*, publikasi Nov. 1974.

- Ford, W. The adaption of the RRL Hydrograph Method for tropical conditions. *Proceedings of Symposium of Flood Hydrology, Nairobi, 1975. Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Report 259, 1977*
- Kidd, C. H. R. dan Packman, J. C. Selection of design storm and antecedent condition for urban drainage design. *Report No. 61, Institute of Hydrology, 1979*
- Mays, L. W. dan Yen, B. C. Optimal cost design of branched sewer systems. *Water Resources Research, 11, No. 1 (1975) 37*
- Packman, J. C. dan Kidd, C. H. R. A logical approach to the design storm concept. *Water Resources Research, 16, No. 6 (1980) 994*
- van den Berg, J. A. Data analysis and system modelling in urban catchment areas (in the New Town of Lelystad, The Netherlands). *Hydrol. Sciences Bulletin XXI, 1, No. 3 (1976)*
- Yen, B. C. dkk., Advanced methodologies for design a storm sewer system. *Water Resources Centre Report No. 112, University of Illinois, 1976*

11

Lengkung pertumbuhan kekerapan banjir internasional

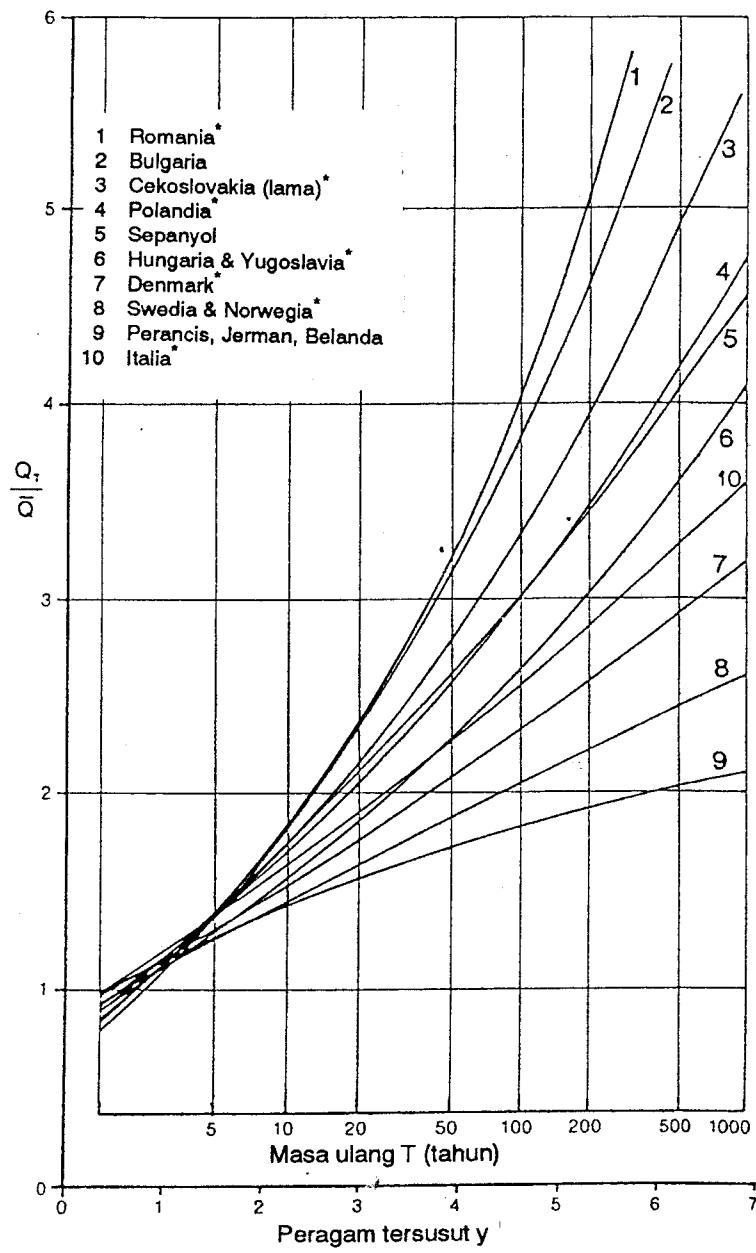
11.1 Penelitian banjir sedunia

Sejak terbitnya Laporan Penelitian Banjir, banyak di antara kiat yang dibuat untuk itu kemudian dikembangkan, dan penerapannya diperluas. Salah satu usaha yang timbul dari perkembangan itu adalah Hasil Penelitian Banjir Sedunia [1]. Menurut para penulisnya, ‘telah dipikirkan dengan tujuan menyelidiki dan menggolongkan ciri banjir di sebanyak mungkin negeri dan dengan kisaran iklim yang sebesar mungkin’. Setelah itu, banyak hasil usaha tersebut telah dipaparkan dalam laporan [2].

Data dikumpulkan dari perorangan dan sejumlah organisasi di seluruh dunia, dan mencakup 70 negeri. Data itu dinilai dan dianalisis secara seragam untuk memungkinkan orang memperbandingkan hasil dari tempat pengamatan yang satu dengan yang lain serta negeri yang satu dengan yang lain. Yang dikumpulkan meliputi baik deret banjir terbesar tahunan maupun sifat DAS.

Hasilnya digunakan untuk membuat lengkung perkembangan (lihat gambar 9.8), yang menunjukkan nilai Q/Q yang naik dengan menurunnya kekerapan. Dengan membuat lengkung itu tanmatra dengan jalan ini, hasilnya dapatlah diperbandingkan menurut wilayah, iklim, DAS, dan curah hujan tahunan, demi keserbasamaan.

Dengan sendirinya, perlu untuk menentukan Q , banjir tahunan rataan (diistilahkan MAF pada [1, 2]) dari seperangkat data yang tersedia di setiap wilayah atau negeri. Akan tetapi lengkung perkembangan yang diturunkan itu dapat digunakan untuk menaksir banjir di tempat yang tidak ada penyukatan, selalu, asal saja Q dapat ditaksir dari sifat DAS.



Gambar 11.1 Lengkung kekerapan banjir benua Eropa

Lengkung perkembangan yang terpilih disajikan dalam gambar 11.1 hingga 11.4. Ditekankan di sini, bahwa semua itu merupakan rataan daerah yang luas-luas. Untuk keperluan projek tertentu dan ripta (rencana) yang rinci, selalu akan lebih baik jika tersedia lebih banyak data. Lengkung yang disajikan dalam empat gambar itu hanyalah beberapa saja yang tersedia. Sebagai misal, Thailand dalam gambar 11.4 memiliki lima lengkung yang mewakili ketinggian dan DAS yang berbeda-beda. Lengkung yang tertera sebagai no. 5 merupakan rerata untuk negeri itu, tidak termasuk Semenanjung Melaya. Semua negara yang ditandai dengan bintang juga mempunyai lengkung DAS lain yang ditentukan lebih ketat seperti yang disajikan dalam [1]. Amerika Utara dan Amerika Selatan juga memiliki hal yang penting-penting dalam laporan tersebut, tetapi contohnya tidak ditampilkan di sini.

Para pembaca yang berminat disarankan untuk memeriksa laporan aslinya mengenai rincian data yang digunakan, kiat statistika yang digunakan, dan pembatas serta persyaratan mengenai cara memakai lengkung itu.

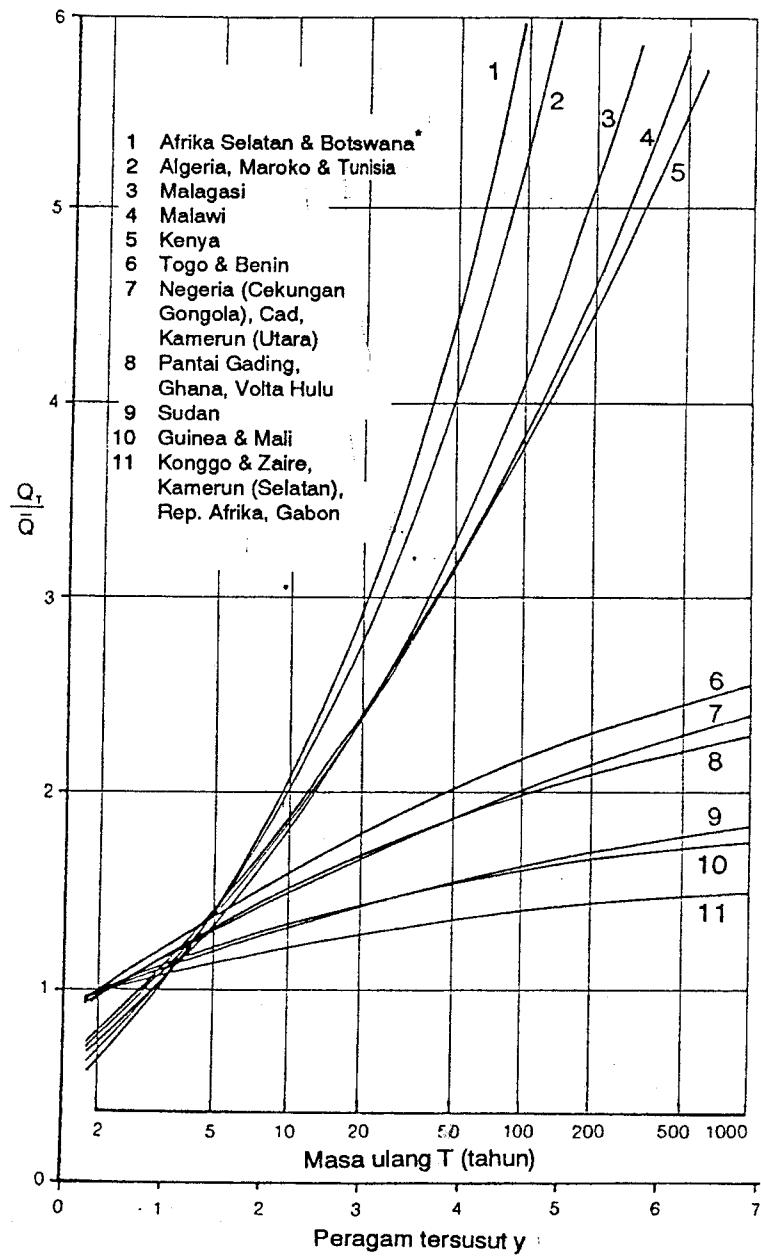
11.2 Simpulan umum

Ada arah kecenderungan tertentu dari bahan yang disajikan di sini. Sebagai misal, iklim setengah kersang lengkung pertumbuhannya yang paling curam karena hujan lebat yang langka itu menurut perbandingan menghasilkan banjir yang lebih besar ketimbang banjir tahunan rataannya. Contohnya dalam gambar 11.2 adalah lengkung untuk Afrika Selatan, Aljazair, Maroko, dan Tunisia, dan dalam gambar 11.3, Arab Saudi dan Jordania. Serupa dengan itu, iklim khatulistiwa dengan curah hujan tahunannya yang tinggi, lengkungnya cenderung lebih datar, misalnya Nigeria, Ghana, kelompok Konggo, dalam gambar 11.2 dan Indonesia serta Papua Nugini dalam gambar 11.4.

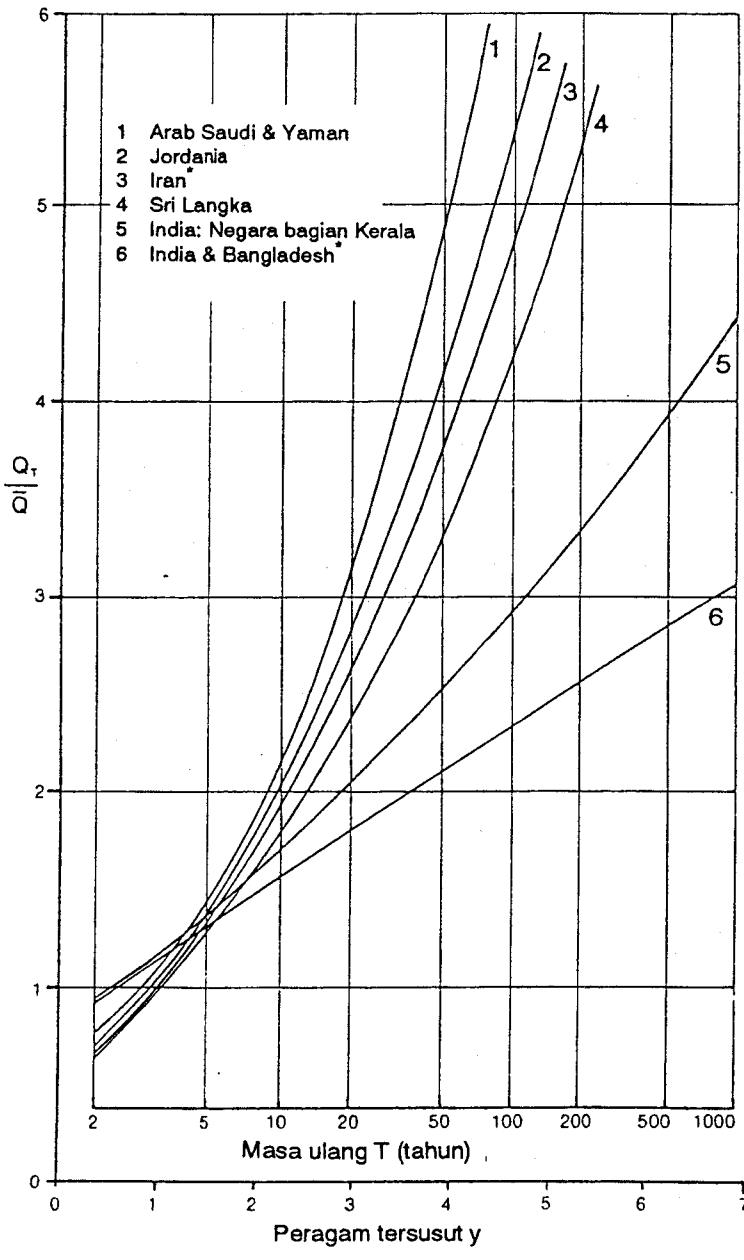
Jelaslah, keserupaan iklim dan rupabumi bukanlah faktor satu-satunya yang berpengaruh pada lengkung pertumbuhan. Ini dapat dilihat pada Sri Langka dan Negara Bagian Kerala di India, yang kedua-duanya terpengaruh Muson Baratdaya, tetapi nyatanya berbeda lengkungnya.

Faktor lainnya yang penting-penting adalah daerah, tanah, dan jenis tetumbuhan. Makin besar DAS, umumnya makin datarlah lengkungnya. Meskipun demikian para penulis laporan [1] menyebut adanya sebuah kekecualian, yaitu Semenanjung Melayu.

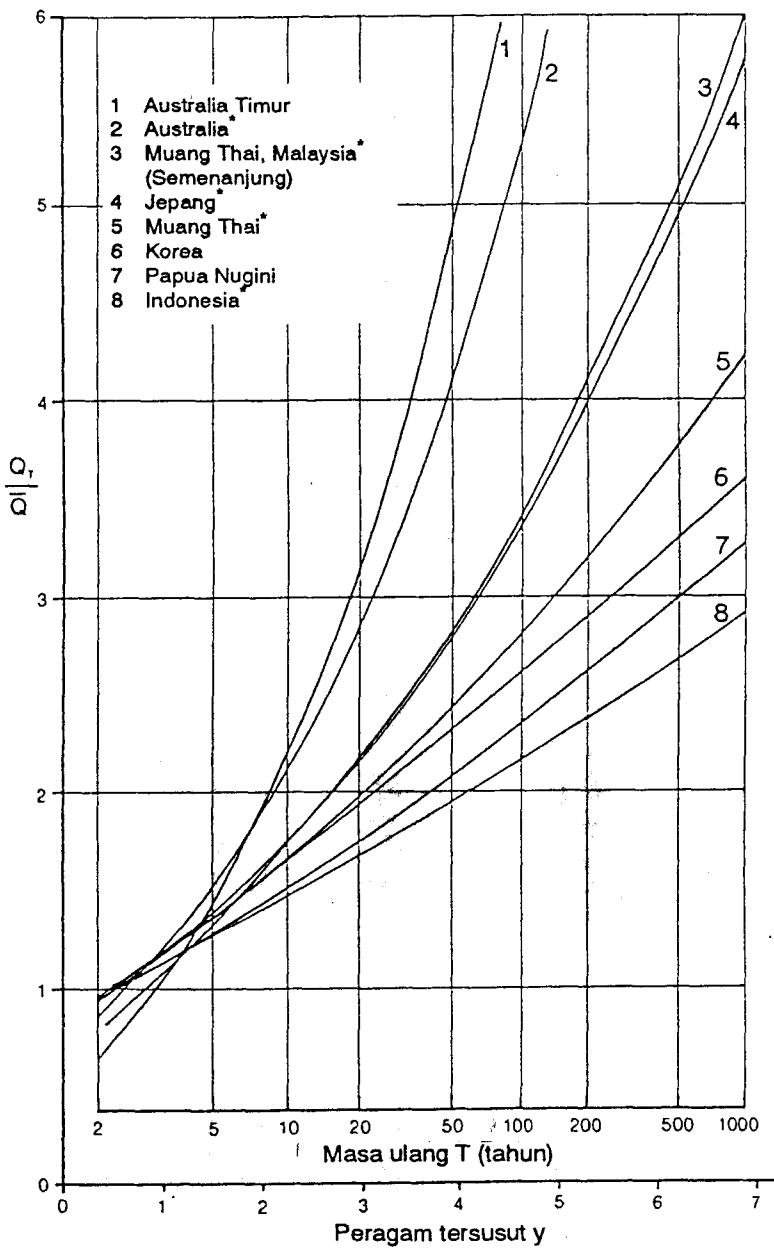
Lembaga Hidrologi di Inggris Raya kini melanjutkan dengan memperluas pangkalan data deret banjir dan sifat DAS, dan mempersilakan para insinyur dan



Gambar 11.2 Lengkung kekerapan banjir benua Afrika



Gambar 11.3 Lengkung kekerapan banjir Timur Tengah dan India



Gambar 11.4 Lengkung kekerapan banjir Aia dan Australasia

hidrologiwan di seluruh dunia untuk menyampaikan keterangan apa pun kepadanya.

Acuan

- 1 Meigh, J. dan Farquharson, F. A. K. *World Flood Study, Phase II*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, Nov. 1985
- 2 Farquharson, F. A. K. dkk. Comparison of flood frequency curves for many different regions of the World, from *Regional Flood Frequency Analysis* (V. P. Singh, editor), Reidel, Dordrecht, 1987

Bacaan lebih lanjut

- Rodier, J. A. dan Roche, M. World catalogue of maximum observed floods. *Int. Assoc. Hydrological Science*, No. 143 (1984)
- UNESCO. *World catalogue of very large floods*, UNESCO Press, Paris, 1976
- Wiltshire, S. E. Grouping basins for regional flood frequency analysis. *Hydr. Sci. Journal*, 30 (1985) 151

12 Patokan meripta

12.1 Analisis risiko

Semua periptaan teknik air membawa serta arti umur bangunan yang diharapkan dapat dipenuhi oleh bangunan itu sesuai dengan pertelaan pada waktu meriptanya. Beberapa bangunan seperti bendung pelencong dan terowongan pelencong mempunyai umur ripta yang dinyatakan. Tetapi sering umur itu tidak dikatakan secara jelas. Berapa panjangkah, misalnya saja, umur ripta sebuah saluran, bendungan, atau tumpuan gelombang?

Pihak peripta teknik harus mendekati masalah periptaan bangunan air dari pertimbangan kerusakan yang kiranya akan ditimbulkan jika bangunan itu ambruk dan/atau kemungkinan jika pertelaan ripta itu dapat terlampaui tanpa terjadi keruntuhan. Tidaklah cukup jika yang dipertimbangkan hanya masa ulang saja; apa yang diperlukan ialah pengertian akan risiko orang berhadapan dengan persyaratan tertentu selama jangka waktu tertentu. Selain itu, juga akibatnya jika aliran ripta terlampaui, termasuk bahaya terhadap kehidupan dan pengaruh bangunan tersebut terhadap ekonomi, lingkungan dan masyarakat. Hanya setelah itu orang dapat membuat penilaian yang wajar, apakah benar orang sudah berbuat cukup untuk menerima risiko itu tanpa adanya gaung yang tidak dapat diterima.

Mungkin saja sulit untuk membuat penaksiran semua faktor itu dan hasilnya dinyatakan dengan angka. Tetapi jika dipertimbangkan sederet langkah, setidaknya mungkin kita memiliki alat yang masuk akal untuk memperbandingkan berbagai pilihan yang tersedia bagi peripta:

- Mengenali peristiwa atau sederet peristiwa yang dapat menyebabkan keambrukan, dan menentukan peluang terjadinya.
- Mengenali ciri khas bagunan ybs yang mungkin saja memicu keambrukan, meskipun hanya sebagian (sebagai contoh ambruknya pintu air untuk

pelaksanaan kerja atau pintu yang harus digunakan, hilangnya tenaga, dsb.) dan menaksir peluangnya.

- Kemungkinan penggabungan kejadian a dan b.
- Semua akibatnya, termasuk biaya ekonomi, masyarakat dan lingkungan yang diramalkan setiap gabungan pada c.

Kecermatan yang dibuat mengenai penelitian semua itu bergantung pada khuluk bangunannya. Bendungan mengandung risiko yang paling mudah dilihat, tetapi saluran, pasangan batu sepanjang tepian sungai, dan bangunan pelindung laut semuanya itu merupakan bangunan air yang memerlukan analisis risiko yang demikian itu.

Pada akhirnya, haruslah ada timbang rasa keteknikan mengenai tingkat risiko yang dapat diterima. Timbang rasa seperti itu dapat dicoba kegunaannya sebaik-baiknya dengan memakai cara perhitungan yang mana pun. Hal itu harus selalu dijelaskan kepada pihak pemilik bangunan atau pemberi tugas, yaitu mengenai dasar tingkat saran pembangunannya. Pembahasan yang lebih luas mengenai pokok ini terbit dalam acuan [1] dan [2].

Pembicaraan mengenai kerusakan, dan bagaimana semua dapat diuraikan dan ditaksir dalam hubungan ini, berada di luar cakupan buku ini. Tetapi hal itu telah diteliti oleh Borgman [3], Korps Zeni Angkatan Darat Amerika Serikat [4], dan Penning-Rowell dan Chatterton [5].

12.2 Memilih masa ulang ripta dengan mempertimbangkan umur ripta dan peluang untuk menjumpai aliran ripta selama umur itu

Dalam tabel 9.1 disajikan peluang banjir *N-tahun* yang terjadi dalam jangka waktu sejumlah tahun tertentu. Tabel 12.1 adalah tabel 9.1 yang diluaskan. Untuk membuat gagasan itu lebih jelas, digunakan tatanama yang berbeda. Masa ulang kejadian (T_r) dihubungkan dengan umur ripta (L) yang dipilih secara sebarang untuk memberi peluang menjumpai peristiwa itu, atau sesuatu yang lebih besar, dalam umur ripta (P). Tabel itu didasarkan pada ungkapan

$$P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L$$

Tabel 12.1 Persentasi risiko menjumpai kejadian dalam umur ripta tertentu L untuk masa ulang yang berbeda-beda^a

Umur ripta L (tahun)	Masa ulang T_r (tahun)								
	5	20	20	30	50	100	200	500	1000
1	20	10	5	3	2	1	—	—	—
2	36	19	10	7	4	2	1	—	—
3	49	27	14	10	6	3	1	—	—
5	67	41	23	16	10	5	2	1	—
7	79	52	30	21	13	7	3	1	1
10	89	65	40	29	18	10	5	2	1
15	96	79	54	40	26	14	7	3	1
20	99	88	64	49	33	18	10	4	2
30	—	96	78	64	45	26	14	6	3
50	—	99	92	82	64	39	22	9	5
75	—	—	98	92	78	53	31	14	7
100	—	—	99	97	87	63	39	18	10
150	—	—	—	99	95	78	53	26	14
200	—	—	—	—	98	87	63	33	18
300	—	—	—	—	—	95	78	45	26
500	—	—	—	—	—	99	92	63	39
1000	—	—	—	—	—	—	99	86	63

^a Di tempat yang tidak ada angkanya, risikonya adalah kurang dari 0,5 persen atau lebih dari 99,5 persen.

12.3 Memilih nilai ripta kejadian langka

Banyak kiat yang diuraikan dalam buku ini diperkembangkan untuk memberi peripta nilai berangka mengenai luahan, curah hujan, dsb. yang mempunyai makna yang sebenarnya (yaitu, yang dihasilkan adalah kecepatan, kedalaman, isi, dst.).

Meskipun demikian, berbagai angka yang terhasil dari perhitungan tidak semuanya memiliki arti yang sama. Hal itu disebabkan karena angka tadi diturunkan lewat jalan yang berbeda-beda, dan orang harus berhati-hati sebelum menggunakan angka tersebut sebagai rincian. Perhatikan tiga contoh di bawah ini.

- a *Curahan terbesar yang berpeluang untuk muncul.* Meskipun dalam pasal 2.9 telah dibahas beberapa jalan untuk sampai kepada angka itu, tetapi di Kepulauan Inggris dapat dipertanyakan, apakah ada gunanya untuk melihat lebih lanjut di luar persamaan dalam gambar 2.4, karena datanya begitu luas

dan rekamannya begitu lama. Di daerah yang catatannya kurang dan hasil pengamatannya juga kurang, pendekatan yang lebih mendasar mungkin lebih memadai.

- b *Nilai Q_T yang diturunkan dari persamaan FSR (dan turunannya).*

Persamaan untuk \bar{Q} diturunkan lewat regresi darab parameter tangkapan dan merupakan persamaan kecocokan terbaik. Ini berarti akan ada ramalan yang mengecilkan dan ada yang membesar dengan jumlah yang sama. Peripta yang ingin meyakinkan diri bahwa tangkapannya itu bukanlah tangkapan yang tidak diprakirakan, harus menggunakan faktor keamanan (F_n) [6]. Nilai $F_n = 2,26$ akan memberi kepercayaan sebesar 95 persen dan $F_n = 1,26$ memberi kepercayaan sebesar 68 persen bahwa \bar{Q} , jadi juga Q_T , adalah tak terprakirakan; kepercayaan sebesar 98 persen akan memerlukan $F_n = 2,7$ [7]. Jelas, hal itu merupakan timbang rasa keteknikan (kerekayaan) mengenai berapakah nilai F_n yang harus digunakan, karena sebenarnya telah ada pemberian faktor keamanan dalam pemilihan T dan Q_T .

- c *Nilai Q_T yang diturunkan dari rekaman jangka panjang.* Aliran tertinggi S. Thame di Teddington (tabel 9.2) cenderung memberi nilai, meskipun dianalisis, (katakan saja) mengenai Q_{200} yang ketangguhannya tidak dapat diberikan oleh DAS yang tak disukat. Dalam contoh seperti itu faktor keamanan yang diberikan kepada nilai Q boleh jadi tidak mencukupi, dan sebuah nilai yang berhati-hati yang diturunkan dari berbagai cara merajah akan jauh lebih memadai.

Acuan

- 1 Evaluation procedures for hydrologic safety of dams. *Report by Task Committee on Spillway Design Flood Selection*, Hydraulics Division, ASCE, 1988
- 2 Guidelines to Decision Analysis, *ACER Techn. Memorandum No. 7*, Denver, USA
- 3 Borgman, L.E. Risk criteria, *J. Waterways and Harbours Division, ASCE*, 89 (1963)
- 4 *Expected Annual Flood Damage Computation*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Eng. Centre, 1977
- 5 Penning-Rowsell, E.C. dan Chatterton, J.B. *The benefits of flood alleviation: A manual of assessment techniques*, Saxon House, 1977

- 6 Poots, A.D. dan Cochrane, S.R. Design flood estimation for bridges, culverts and channel improvement works on small rural catchments. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, **66** TN 229 (1979) 663
- 7 Acuan 6, bahasan oleh M.A. Beran, *Proc. Inst. Civ. Eng.* **68** (1980) 319

Bacaan lebih lanjut

Mosonyi, E. dan Buck, W. Some aspects of risk analysis for improved water resources planning, *Proc. 2nd World Congress Int. Wat. Res. Assoc. New Delhi* 1975, v. 2, h. 221.

Lampiran A

Nilai kekasapan Manning n dalam $Q = (1/n) (A/R^{2/3} S^{1/2})$ dan koefisien Chezy C^* dalam $V = C \sqrt{RS}$ yang khas

Jenis saluran	n	C (satuan SI)
Kayu licin	0,011	
Pipa semen-asbes, baja tempa	0,012	70-90
Turap beton (bungkus mutu-tinggi)	0,013	60-75
Pasangan bata terpasang baik, bersuar	0,014	
Pipa beton dan besi cor	0,015	
Tanah giling: pasangan bata, keadaan buruk	0,018	40-55
Pasangan batu, tanpa belokan yang tajam	0,021	30-45
Alur sungai alami, aliran lancar karena keadaannya licin	0,030	19-30
Sungai alam baku dalam keadaan mantap	0,035	14-25
Sungai dengan bagian yang dangkal dan dan meander dan tumbuhan air yang cukup mencolok	0,045	
Sungai dengan bongkahan dan batu dangkal dan bertumbuhan	0,060	
Sungai mengalir perlahan-lahan, berkelok-kelok dengan kubangan, sedikit jeram, penuh tumbuhan dan rimbun	0,100	

* Untuk pembahasan mengenai koefisien Chezy C , lihat *An Introduction to Engineering Fluid Mechanics*, oleh J.A. Fox, diterbitkan oleh The Macmillan Press, London, terbitan ke-2, 1977.

Jawaban soal

Bab 2

- 2.1 (a) 28,32 mm Hg; (b) 8,5 mm Hg; (c) 19,82 mm Hg, (d) 22,0°C; (e) 23,7°C
- 2.3 (a) 29,99 in; (b) Cubley 29,76 in; Sekolah Biggin 41,97 in
- 2.4 39,1 mm
- 2.5 (i) 29,8 in; (ii) 31,2 in; (iii) 27,0 in
- 2.7 (b) Sekitar 1951; (c) jika diandaikan jangka waktu sebelumnya benar, maka penyesuaian meningkatkan angka curah hujan rerata di X dari 279 menjadi 328 mm/tahun.
- 2.8 Ada bukti keberdauran, tetapi diperlukan rekaman lebih lama untuk menunjukkannya lebih tuntas.
- 2.9 (a) 0,136; (b) 7,34 m/det.
- 2.10 (a) Reratanya sekali dalam 4 tahun; (b) $23,8 \times 10^3 \text{ m}^3$
- 2.11 Pada X, 75 mm; pada Y, 92 mm.
- 2.12 (a) Oxford, 20 mm; (b) Kumasi, 64 mm (jika pers. 2.4 yang diturunkan untuk Inggris Raya berlaku bagi Ghana).
- 2.13 481 mm; tidak.

Bab 3

- 3.1 Amsterdam 4,0 mm/hari; Seattle 0,05 mm/hari; Khartum 6,2 mm/hari
- 3.2 2,5 mm/hari
- 3.3 (a) April 5,24 cm; November 1,01 cm; (b) Juni 11,67 cm; October 3,70 cm.
- 3.5 6,7 mm/hari.
- 3.9 E_0 (tahunan) = 966 mm, koefisien kancah = 0,85, kehilangan bersih tahunan = $1,367 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{hari}$, pengupasan berkurang 136 mm pada Juli pada 40°S.
- 3.10 $14,067 \times 10^6 \text{ m}^3$

Bab 4

- 4.3 4,1 mm.
- 4.5 (a) 53 mm; (b) 9 mm
- 4.8 PKD = 129; bandingkan dengan gambar 4.9 nilai 125.

Bab 5

- 5.1 Saluran A $2,4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{hari}$; saluran B = $3,1 \text{ m}^3/\text{m}/\text{hari}$.
- 5.2 $kH = 2,32 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{det}$; $R_0 = 1968 \text{ m}$; $Q_0 = 0,044 \text{ m}^3/\text{det}$.

Bab 6

- 6.1 $4085 \text{ m}^3/\text{det}$; $n = 0,032$
- 6.3 $2560 \text{ m}^3/\text{det}$ pada 50,46 m
- 6.4 (b) $0,075 \times 10^6$, $1,85 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{hari}$; (c) $18,14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{hari}$; (d) $5,14 \times 10^6 \text{ m}^3$
- 6.5 Simpanan tambahan $3,90 \times 10^6 \text{ m}^3$; limpahan (kelak); $12,01 \times 10^6 \text{ m}^3$; (sekarang) $21,37 \times 10^6 \text{ m}^3$
- 6.6 $46,8 \times 10^6 \text{ m}^3$
- 6.8 $2124 \text{ m}^3/\text{det}$; $n = 0,016$.
- 6.9 (a) 74,2 l/det; (b) waduk surut pada $306 \times 10^3 \text{ m}^3$; (c) $765 \times 10^3 \text{ m}^3$.
- 6.10 Kapasitas $65,73 \times 10^6 \text{ m}^3$; serahan $6,98 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 6.11 (a) Dengan mengandaikan aliran rataan pada lampauan P 30% = 9,8 MW; $E = 66 \text{ GWh}$; (b) $227 \text{ m}^3/\text{det}$ (dengan menggunakan kiat dari bab 9)
- 6.12 (a) $3,5 \text{ m}^3/\text{det}$; (b) $75,0 \times 10^6 \text{ m}^3$; (c) $51 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- 6.13 $P = 1,2 \text{ MW}$ (pada lampauan P 30%), $E = 7390 \text{ MWh}$

Bab 7

- 7.1 $Q_t = 126 e^{-0,0231t}$; $Q_{120} = 7,9 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 7.2 $Q_t = 120 e^{-0,0392t}$; $Q_{60} = 11,4 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 7.3 Titik N sekitar 33 h.
- 7.5 $76 \text{ m}^3/\text{det}$ dengan mengandaikan penunjuk Φ yang sama dan aliran dasar sebesar $4 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 7.7 $Q_p = 705 \text{ kaki}^3/\text{det}$; $t_p = 4,1 \text{ jam}$.
- 7.8 $Q_p = 7,9 \text{ m}^3/\text{det}$; $t_p = 4,0 \text{ jam}$.

- 7.9 $36,3 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-7.
- 7.10 Titik N ada pada jam ke-54; volum limpasan $= 557,3 \times 10^6 \text{ kaki}^3$; hujan bersih 2,0 inci/jam; sangat lebat bagi Inggris Raya. $T_r > 100$ tahun.
- 7.11 $923 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-6.
- 7.12 $1332 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-6.
- 7.13 $614 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-7
- 7.14 $687 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-9.
- 7.15 $84,2 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 7.16 $115,5 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-11.
- 7.17 (a) $125,4 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-12.
- 9.8 $Q = 51 \text{ m}^3/\text{det}$; $Q_{200} = 163 \text{ m}^3/\text{det}$; dengan ripta faktor keamanan (katakan 2,3) $Q = 375 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 9.9 $Q_{100} = 140 \text{ m}^3/\text{det}$; $P \approx 2\%$.
- 9.11 $Q_{50} = 2799 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 9.12 (a) $Q_{10} = 10,7$, $Q_{100} = 20,8$, $Q_{500} = 31,5 \text{ m}^3/\text{det}$; (b) $3,8 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 9.13 $71,9 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-9.
- 9.14 (a) Dari rajah $Q_{100} = 405 \text{ m}^3/\text{det}$; (b) Gumbel $Q_{100} = 392 \text{ m}^3/\text{det}$, $Q_{400} = 482 \text{ m}^3/\text{det}$; (c) $22,6\%$.
- 9.15 5% pada sebarang tahun; 19% pada sebarang 4 tahun.
- 9.16 6|2, 40, 41|3, 10, 17, 25|1, 7, 11, 15, 20|18|19, 26|4, 27, 30|14|31, 33, 36, 37|4, 8|38|5, 33, 37|26, 28|22, 23, 24|13|7, 34|11|35.

Bab 8

- 8.1 Pada selang setiap jam; 0, 2,3, 6,9, 22,2, 42,1, 70,8, 95,6 115,6, 126,6
128,9, 125,9, 116,8, 106,3, 93,8 dst.
- 8.2 $137 \text{ m}^3/\text{det}$ pada jam ke-32.
- 8.3 $353 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 8.4 Pada selang setiap jam; 0, 3,5, 9,8, 19,8, 37,4, 56,6, 72,7, 88,4, 98,0,
100,2, 94,0, 84,1 dst.
- 8.5 Pada selang 3 jam; 0, 5,5, 23, 46, 64, 75, 83, 87, 88, 87,5, 85, 82, 78, 72,5
dst.
- 8.6 $250,4 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 8.7 $Q_p = 428 \text{ m}^3/\text{det}$ pada tp = 8h: hujan bersih $\approx 1,4 \text{ cm}/\text{jam}$.
- 8.8 Pada selang 3 jam: 6, 6,1, 3,9, 4,4, 16,4, 38,6, 63,2, 80,4, 91,1, 98,2, 88,7,
74,2, 60,3 dst.

Bab 9

- 9.1 $Q_{20} = 6360 \text{ m}^3/\text{det}$; $P = 18,6\%$.
- 9.2 (i) 37,0, 40,0 inci; (ii) 37%.
- 9.4 $Q_{200} = 3220 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 9.5 (a) 68,04, 71,9 inci; (b) 0,401, 0,642, 0,871; (c) 0,395.
- 9.6 20%.
- 9.7 (a) $8,31 \times 10^6 \text{ m}^3$; (b) 9,6%.

Senarai kata dan istilah

Disesuaikan dengan *Kamus hidrologi*, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, 1987

hs = hasil; pdnn = padanan; pr = proses

airtanah - *groundwater*

akuifer - *aquifer*

akuifer tertekan - *confined aquifer*

aliran - *flow*

aliran dasar - *baseflow*

anggitan - *concept*

anemometer cawan - *cup anemometer*

anggaran energi - *energy budget*

badai - *storm*

bahang - *heat*

bahang terlata - *adverted heat*

balut kerikil - *gravel pack*

berlonggok - *cumulative*

borongan (dalam penyuntikan) - *gulp injection*

daerah tadaah (berpdnn sebagian dg DAS) - *catchment area*

DAS (daerah aliran sungai) - *(river) basin*

caduk (akibat pembekuan) - *(frost) heave*

curahan - *precipitation (hs)*

curahan alur - *channel precipitation*

curahan ardi - *orographic precipitation*

curahan perenggan - *frontal precipitation*

curahan pusar - *cyclonic precipitation*

embun - *dew*

embunan - *condensation*

gelung simpanan - *storage loop*

gemaris - *linear*

golakgalik - *convection*

hidrologi perkotaan - *urban hydrology*

imbuh - *recharge*

jangkau angin - *wind run*

jujuh - *duration*

kancah penguap - *evaporation pan*

kanjang - *persistent*

kebasahan - *wetness*

kehantaran - pdnn keterterusan

kehebatan (hujan) - *intensity*

kekerapan (hujan, dst.) - *frequency*

kekurangan kejenuhan - *saturation deficit*

kelandaian suhu menegak - *vertical temperature gradient*

kelebatan (hujan) - pdnn kehebatan

kelembapan - *humidity*

kelulusan - *permeability*

kepekatan (larutan) - *concentration*

kerikil - *gravel*

kesarangan - *porosity*

keterterusan - *transmissibility*

lanau - *silt*

khuluk (sifat dasar) - *nature*

larian - pdnn limpasan

laju rambat - *celerity*

legih - *divide*

lempung - *clay*

lengkung - *curve*

lengkung tarafan - *rating curve*

limpasan - *runoff (hs)*

limpasan permukaan - *surface runoff*

linarut - pdnn zat terlarut

lowong - *void*

luah - *discharge (umum)*

luahan - *discharge (hs)*

luasan - *areal extent; area*

lulus - *permeable*

mangkus - *efficient*

masa ulang - *return period*

mataair - *spring*

melacak banjir - *flood routing*

mengari - *laminar*

menyadap airtanah - *abstraction of groundwater*

meripta - *to design*

muka air - *water surface; water level*

muka airtanah - *water table*

muka air tenggek - *perched water table*

nasaban - *correlation (hs)*

nilai farik - *discrete value*

nilai sepaling - *extreme value*

pancal waduk - *reservoir lag*

panggu, memanggu - *partial*

paras - *level*

pegun - *stationary*

pehantar pdnn akuifer

pelacakan waduk - *reservoir routing*

pelemahan - *attenuation*

pelimpasan - *runoff (pr)*

peluahan - *discharge (pr)*

peluang - *probability*

peluang, lampauan - = *probability exceedance*

peluang (terlampau) - *probability (exceeding)*

pemeluhan - *transpiration (pr)*

pemerian - *description (pr)*

pemrakiraan - *forecasting*

penapis - *(well) screen*

penasaban - *correlation (pr)*

pencurahan - *precipitation (pr)*

penekupan - *superposition*

penelusan - *percolation (pr)*

penerokan - *sampling*

penguapan - *evaporation (pr)*

penguappeluhan - *evapotranspiration (pr)*

penyaliran - *drainage (pr)*

penyebaran - *distribution (pr)*

penyediaan air - *water supply*

penyukatan - *gauging*

penyukatan dengan pengenceran - *dilution gauging*

persediaan air - *water-supply system*

penyinaran - *radiation (pr)*

penyuntikan (dlm penyukatan dg pengenceran) - *injection*

penyuntikan laju-tetap - *constant-rate injection*

penunjuk - *index*

peresapan - *infiltration (pr)*

perian - *description* (hs)
peripta - *designer*
peukur; pdnn meter - *meter*
pipa - *pipe*
pipa bertebuk - *slotted pipe*
pipalindung - (*well*) *casing*
pompa - *pump*
pompa empar - *centrifugal pump*
pompa bebalasan - *reciprocating pump*
pompa desakan angin - *airlift pump*
pompa pancut - *jet pump*
pompa selam - *submersible pump*
prakiraan - *forecast*
rataan - *mean*
rekaman - *record*
rekam-tanggap - *interrogation*
rekayasa - *engineering*
rekayasawan - *engineer*
rerata - *average*
rerata terbobot - *weighted average*
resapan - *infiltration* (hs)
ripta - *design*
saliran - *drainage* (hs)
salju - *snow*
sangkil - *effective*
sarang - *porous*
sebaran - *distribution* (hs)
senggat - *graduation; bersenggat* - *graduated*
serahan sumur - *yield of well*
sidik - *probe*
simpanan - *storage*
simpanan tebing - *bank storage*

sinaran - *radiation* (hs)
sudur - *canopy*
suhu bola-basah - *wet-bulb temperature*
sukat - 1 gauge; 2 rain gauge
sukat swarekam - *recording gauge; autographic rain recorder*
sumur - *well*
sumur artois - *artesian well*
sungai bentaran - *ephemeral stream*
sungai berjeda - *intermittent stream*
sungai malar - *perennial stream*
sungai melaba - *effluent stream*
sungai merugi - *influent stream*
surutan - *drawdown*
tahana - *state*
tangkapan (berpdnn sebagian dg daerah tada) - *catchment*
telusan - *percolation* (pr)
terok - *sample*
terokan - *sample* (hs)
terpajan - *exposed*
terpendam (bahang -) - *latent (heat)*
terubahsuai - *modified*
tingkat rosotan - *lapse rate*
tunak - *steady*
tungkai menurun - *recession limb*
uapan - *evaporation* (hs)
uappeluhan - *evapotranspiration* (hs)
uji pompa - *pumping test*
waduk - *reservoir*
zatalir - *fluid*
zatcair - *liquid*
zat terlarut - *solute*

Penjurus

airtanah 91
menyadap 103
akuifer, lihat pemanfaatan 91
tak tertekan 112, 117
tertekan 98, 110
albedo 43
aliran dasar 169
angka (AAD) 128
memisahkan 172, 174
menilai 176
alur sungai, melacak 230
analisis
curahan-limpasan 77
kekerapan 260
risiko 312
andaian 99
angin 44
angka aliran dasar (AAD) 128
banjir
kekerapan 305
melacak 223
rumus 256
tahunan rataan 277
Blaney-Criddle, cara 62
cara
Blaney-Criddle 62
kesebandingan 257
Penman 61
rasional, lihat cara kesebandingan 257
Chezy C, koefisien 317
curah hujan 20, 22, 24, 25, 26, 30, 31, 130
kedalaman-luasan 27
kehebatan 14
rata-rata 127
titik terbesar 37
curahan 18
perenggan 14
pusar 14
penunjuk 80
daerah tada 122
danau, luasan 128
Darcy, hukum 96

DAS
arab 125
bentuk 126
ciri 122
lereng 123
penunjuk kebasahan (PKD) 84
rumus parameter 259
data sintetis, membangkitkan 282
deret
bebas 260
jujuk memanggu 261
kejadian 260
penuh 260
tahunan 260
Dupuit 99
embun 18
embunan 18
energi, penyediaan 48
garis samalaju, lihat isolasi 136
gaya Coriolis 6
gelombang banjir 144, 145, 146
gelung simpanan 231, 232
hidrograf 150, 167, 168, 169, 173, 229, 302
aliran 235
satuan 177, 179, 184, 185, 186, 195, 229
sintesis 197, 201, 241
sintesis, penggunaan hujan 212
hidrologi
daur 2
gejala, khuluk berdaur 284
ilmu 1
penerapan dalam rekayasa 4
perkotaan 297
prakiraan 255
hubungan kehebatan-jujuk-kekerapan 21
hujan
bersih 167
grafik 167
kekerapan-kelebatan 23
sangkil 167
hukum Darcy 96
hutan 66

iklim 128
Indonesia 310
infiltrometer 76
isohiet 29
isovel, lihat garis samalaju 136
jenuh-adiabat 11
kabut 18
kancah penguap 58
kapasitas lapang 75
kebesaran kejadian N -tahun 264, 273
merajah 264
perhitungan 273
kekentalan 93
kinematik 94
mulak 93
kekerapan sungai 128
kelembapan 7
nisbi 44
kelengasan tanah 79, 85
kekurangan 82
sidik 86
kelengasan tanah, ketunaan 128
kelulusan 95
bahan 91
kerapatan 93
koefisien Chezy C 317
lapisan permukaan 75
lengkung
masa-ganda 32
surutan induk 174
tarafan aliran 132
limpasan 121, lihat curah hujan 130, 172
jujuh 150
luahan 229
pengukuran 135
sungai 169
Manning, nilai kekasapan 317
masa ulang 263, 313
mata air 91
artois 92
meteorologi 6, 43
muka air tenggek 92
nilai kekasapan Manning 317
patokan merpta 312
pehantar, lihat akuifer 91
pelacakan grafik, cara 238

peluang
curahan terbesar 33
kejadian N -tahun 262
pemakaian habis 59
pemeluhan 44
pencurahan 12
penelusan, lihat peresapan 72
pengenceran 137
penguapan 45
penguappeluhan 44
Penman
cara 61
teori 48
penyukatan 137
ultrasonik 142
peresapan, lihat penelusan 72
permukaan
frreatik 91
piezometri 92
persamaan penyimpanan 224
peukur
arus 132, 133
arus ulir 133
psikrometer 10
rerata bergerak 32
Rijkeort, persamaan Penman 53
rumus Thornthwaite 56
salju dan es 18
sebaran log Pearson Jenis III 274
serahan sumur 106
simpanan tebing 170
suhu 10, 44
| harian rataan 10 |
kelandaian menegak 11
keragaman 10
sukat hujan 14, 17
sumur artois 92
sungai
bentaran 169
berjeda 170
induk, panjang 123
malar 170
melaba 169
merugi 169
tahanan tunak 237
tahun air 130, 260
talang ukur 137

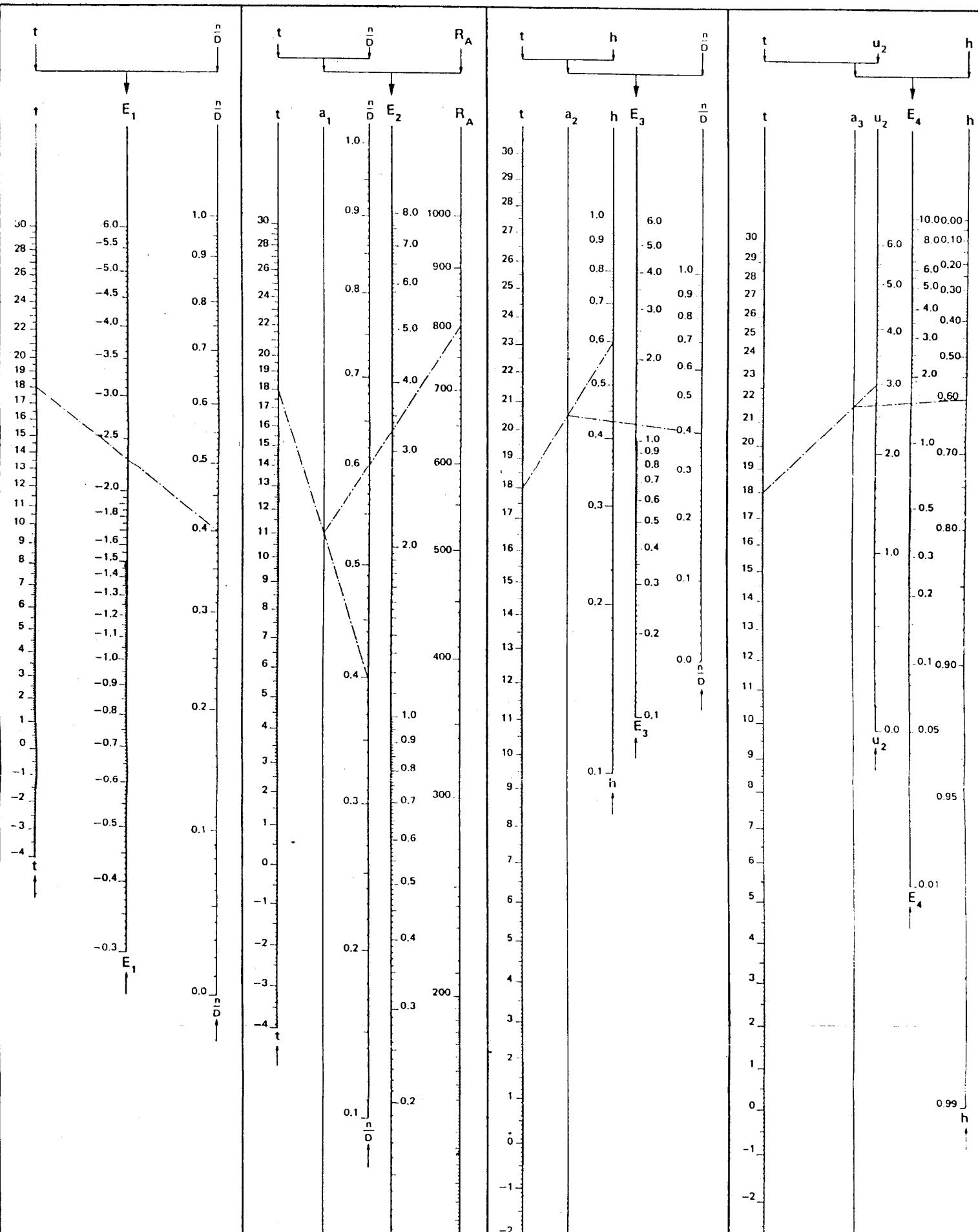
tanaman
koefisien k_c yang khas 63
pertanian 60
teori Penman 48
Thiessen, segibanyak 29
Thornthwaite, rumus 56
tungkai menurun 167

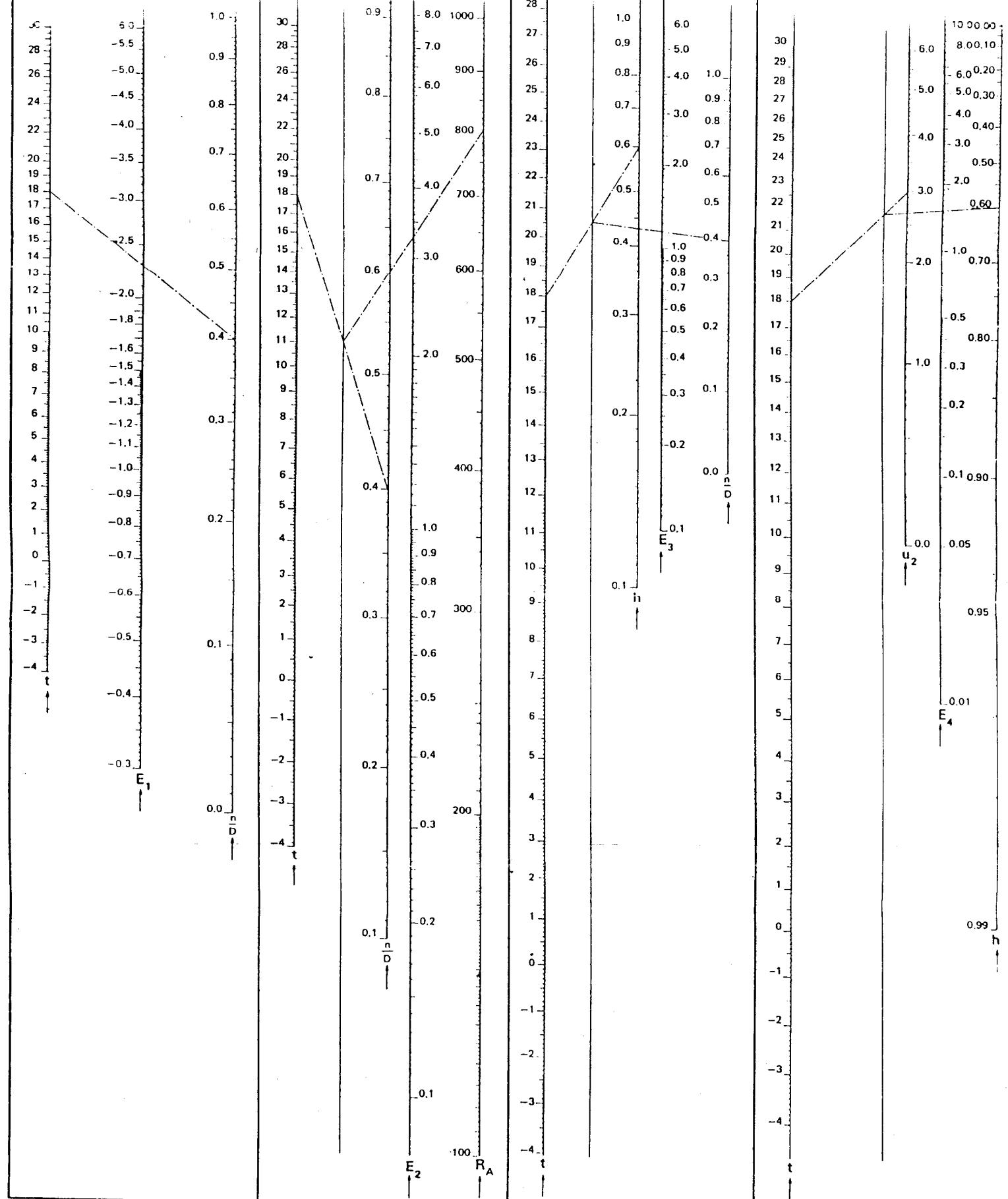
uap, penyingkiran 51
uji pompa 114
wadi 169
waduk
luasan 128
pelacakan 225
waktu pengumpulan 123

Lampiran B

Monogram untuk menentukan penguapan E_0 dari permukaan air bebas mengikuti persamaan Penman

$$E_0 = \frac{\Delta H + \gamma E_d}{\Delta + \gamma} = E_1(t, \frac{n}{D}) + E_2(t, R_A, \frac{n}{D}) + E_3(t, \frac{n}{D}, h) + E_4(t, u_2, h)$$





Contoh

Jika $t = 18^\circ C$, $n/D = 0.4$, $R_A = 800 \text{ g kal/cm}^2/\text{hari}$, $h = 0.6$ dan $u_2 = 3.0 \text{ m/det}$, jadi menurut monogram itu, nilai berikut ini ditemukan untuk E_1 , E_2 , E_3 dan E_4 :

$$E_1 = -2,28 \text{ mm/hari}$$

$$E_2 = +3,30 \text{ mm/hari}$$

$$E_3 = +1,12 \text{ mm/hari}$$

$$E_4 = +1,52 \text{ mm/hari}$$

Maka

$$E_0 = +3,66 \text{ mm/hari}$$