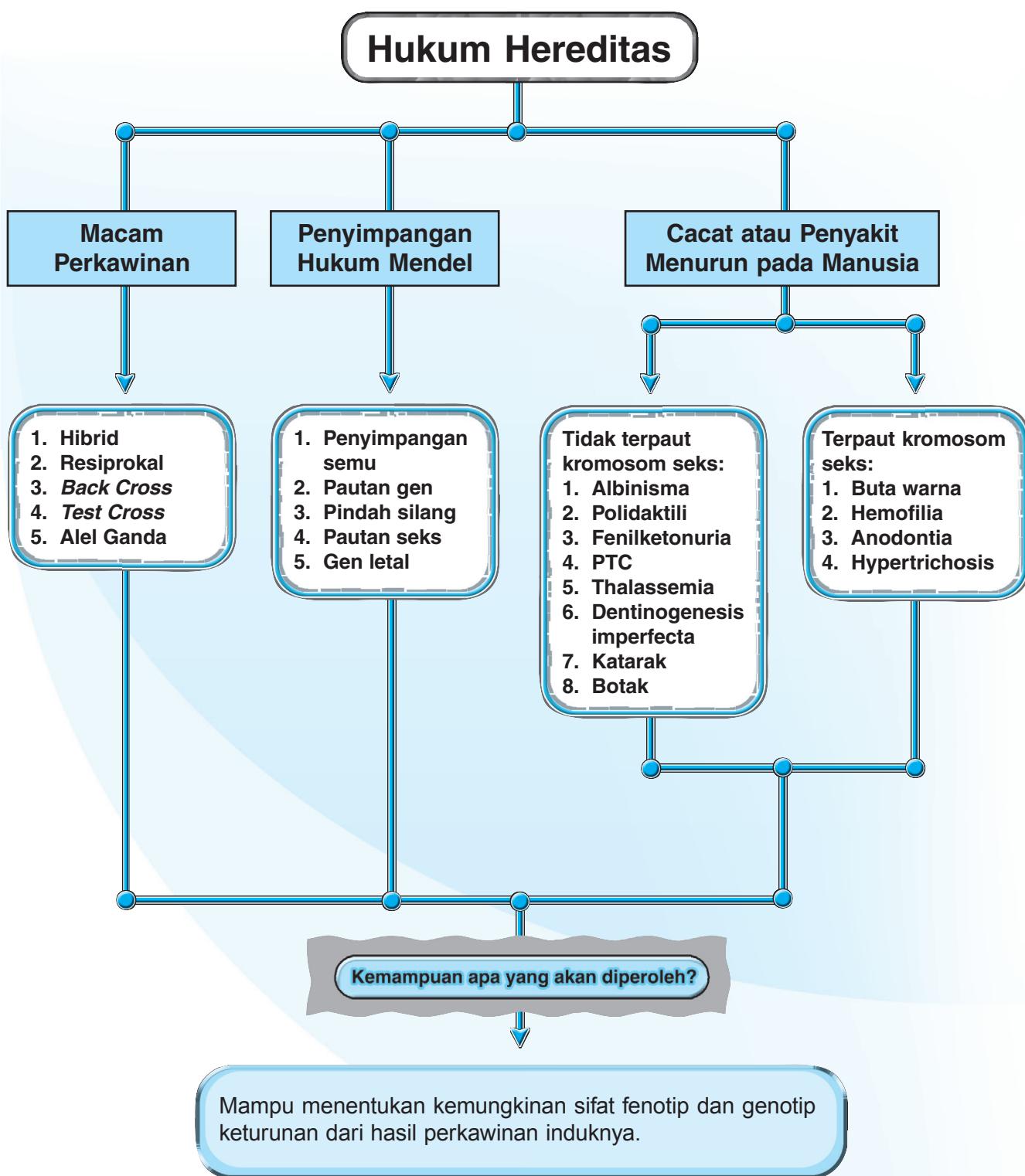


# Bab V

# Hukum Hereditas





## Selasar



Sumber: Dokumentasi Penerbit

Anda dapat menjumpai perbedaan fisik maupun sifat pada manusia. Ada yang berkulit sawo matang, hitam, atau putih. Ada yang berambut keriting, ikal, maupun lurus. Di negara kita juga terdapat keanekaragaman. Perhatikan ciri-ciri fisik penduduk asli Papua dan Jawa, pasti berbeda. Namun, bila Anda melihat mereka bersama keluarganya masing-masing, Anda akan menemukan kemiripan di antara mereka.

Pada bab ini Anda akan mempelajari mengenai hukum Mendel dan penyimpangannya. Selain itu, Anda dapat mempelajari hereditas pada manusia dan manfaatnya bagi kehidupan manusia. Setelah mempelajari bab ini Anda diharapkan dapat memahami hukum hereditas serta memanfaatkannya bagi kehidupan manusia.

Kata Kunci	?
hukum Mendel	?
persilangan	?
fenotip	?
genotip	?
dominan	?
resesif	?
homozigot	?
heterozigot	?
penyimpangan hukum Mendel	?
hereditas	?

Perkawinan akan menghasilkan keturunan yang mempunyai bentuk fisik dan sifat yang mirip dengan orang tua mereka. Hal ini terjadi karena sifat yang terdapat pada gen dalam nukleus sel sperma akan bergabung dengan gen dalam nukleus sel telur. Dari perkawinan itu akan menghasilkan suatu individu yang di dalamnya terdapat gabungan dari sifat-sifat gen tersebut. Bab ini akan menjelaskan pola pengendalian sifat keturunan pada makhluk hidup.

## A. Hukum Mendel

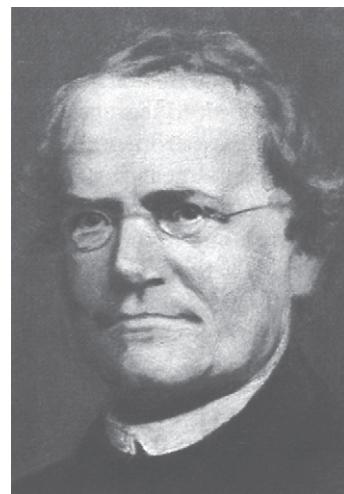
Anda telah mengetahui bahwa gen yang terdapat pada kromosom di dalam nukleus merupakan pengendali faktor keturunan pada makhluk hidup. Gen berfungsi menyampaikan informasi genetik kepada generasi berikutnya. Oleh karena itu, setiap keturunan akan mempunyai fenotip maupun genotip yang hampir sama atau hasil campuran sifat-sifat induknya. Sifat yang dapat diamati disebut fenotip, misal warna, bentuk, ukuran, dan sebagainya. Sifat yang tidak dapat diamati disebut genotip berupa susunan genetik suatu individu.

**Gregor Johann Mendel** (1822–1884) merupakan seorang biarawan berkebangsaan Austria, yang berjasa besar dalam memperkenalkan ilmu pengetahuan tentang pewarisan sifat atau disebut genetika. Hukum genetika yang diperkenalkan Mendel dikenal dengan hukum I Mendel dan hukum II Mendel. Dari penemuannya ini, Mendel dikukuhkan sebagai **Bapak Genetika**. Lihat Gambar 5.1.

Selama delapan tahun (1856–1864) Mendel melakukan penelitian persilangan pada tanaman ercis atau *Pisum sativum* (kacang kapri). Mendel memilih tanaman ercis untuk percobaannya sebab tanaman ercis masa hidupnya tidak lama hanya berkisar setahun, mudah tumbuh, memiliki bunga sempurna sehingga terjadi penyebukan sendiri yang akan menghasilkan galur murni (keturunan yang selalu memiliki sifat yang sama dengan induknya), dan mampu menghasilkan banyak keturunan. Perhatikan Gambar 5.2. Tanaman ercis memiliki tujuh sifat dengan perbedaan yang mencolok seperti berikut.

1. Batang tinggi atau kerdil (pendek).
2. Buah polongan berwarna kuning atau hijau.
3. Bunga berwarna ungu atau putih.
4. Letak bunga aksial (sepanjang batang) atau terminal (pada ujung batang).
5. Biji masak berwarna hijau atau kuning.
6. Permukaan biji bulat atau berkerut.
7. Warna kulit biji abu-abu atau putih.

Faktor determinan (gen) disimbolkan oleh sebuah huruf. Huruf yang umum digunakan adalah huruf pertama dari suatu sifat. Contoh **R** merupakan gen yang menentukan warna merah (**R** dari kata *rubra* artinya merah) dan **r** adalah gen yang menentukan warna putih (*alba*). **R** ditulis dengan huruf besar karena warna merah yang dibawa oleh gen **R** bersifat dominan terhadap warna putih yang dibawa gen **r**. Sifat dominan mengalahkan sifat resesif.



Sumber: Biology, Raven & Johnson

Gambar 5.1

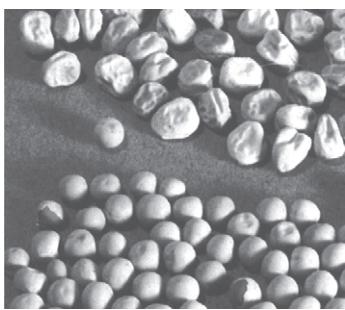
Gregor Johann Mendel



Sumber: Biology, Raven & Johnson

Gambar 5.2

*Pisum sativum*



Sumber: Biology, Raven & Johnson

**Gambar 5.3**

Permukaan biji *Pisum sativum* berbentuk bulat dan berkerut

Perhatikan diagram persilangan (diagram punnet) di samping.



Genotip suatu individu biasanya bersifat diploid ( $2n$ ) sehingga diberi simbol dengan dua huruf yang sama. Sifat suatu individu yang genotipnya terdiri atas gen-gen yang sama dari tiap jenis gen misalnya RR, rr, AABB, aabb disebut **homozigot**. Sifat suatu individu yang genotipnya terdiri atas gen-gen yang berlainan dari tiap jenis gen disebut **heterozigot**, misalnya Rr, AaBb, dan sebagainya.

## 1. Hibrid

Hibrid merupakan perkawinan dua individu yang mempunyai sifat beda. Berdasarkan banyaknya sifat beda individu yang melakukan perkawinan, hibrid dibedakan sebagai berikut.

- Monohibrid**, yaitu suatu hibrid dengan satu sifat beda (Aa).
- Dihibrid**, yaitu suatu hibrid dengan dua sifat beda (AaBb).
- Trihibrid**, yaitu suatu hibrid dengan tiga sifat beda (AaBbCc).

### a. Hukum I Mendel

Hukum I Mendel diperoleh dari hasil perkawinan monohibrid, yaitu persilangan dengan satu sifat beda. Mendel melakukan persilangan antara tanaman ercis biji bulat dengan tanaman ercis biji berkerut (perhatikan Gambar 5.3). Hasilnya semua keturunan  $F_1$  berupa tanaman ercis biji bulat. Selanjutnya dilakukan persilangan antarketurunan  $F_1$  untuk mendapatkan keturunan  $F_2$ . Pada keturunan  $F_2$  didapatkan perbandingan fenotip kira-kira 3 biji bulat : 1 biji berkerut.

P : (Parental: induk)	♀ BB (Biji bulat)	><	♂ bb (Biji berkerut)									
Gamet:	B		b									
		↓										
$F_1$ : (Fillial: Keturunan)		Bb										
			(Biji bulat)									
$F_1 >< F_1$ :	♀ Bb (Bulat)	><	♂ Bb (Bulat)									
Gamet :	B		B									
	b		b									
$F_2$ :	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">♀ ♂</th> <th style="text-align: center;">B</th> <th style="text-align: center;">b</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">BB (Bulat)</td> <td style="text-align: center;">Bb (Bulat)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">b</td> <td style="text-align: center;">Bb (Bulat)</td> <td style="text-align: center;">bb (Berkerut)</td> </tr> </tbody> </table>			♀ ♂	B	b	B	BB (Bulat)	Bb (Bulat)	b	Bb (Bulat)	bb (Berkerut)
♀ ♂	B	b										
B	BB (Bulat)	Bb (Bulat)										
b	Bb (Bulat)	bb (Berkerut)										

Perbandingan fenotip bulat : berkerut = 3 : 1

Perbandingan genotip BB : Bb : bb = 1 : 2 : 1

Berdasarkan hasil perkawinan yang diperoleh dalam percobaannya, Mendel menyimpulkan bahwa pada waktu pembentukan gamet-gamet, gen akan mengalami segregasi (memisah) sehingga setiap gamet hanya akan menerima sebuah gen saja. Kesimpulan itu dirumuskan sebagai **hukum I Mendel** yang dikenal juga dengan hukum **Pemisahan Gen yang Sealel**.

Macam dan jumlah gamet dapat ditentukan dengan menggunakan rumus. Rumus untuk jumlah gamet =  $2^n$  dan n = jumlah gen heterozigot. Perhatikan beberapa contoh berikut.

1) Monohibrid      Aa       $\Rightarrow$  gamet  $\begin{array}{c} A \\ \diagdown \\ a \end{array}$  Jumlah  $2^1 = 2$   
Gen dominan = 1 (A)

2) Dihibrid      AaBb       $\Rightarrow$  gamet  $\begin{array}{c} AB \\ Ab \\ aB \\ ab \end{array}$  Jumlah  $2^2 = 4$

Jumlah gen heterozigot = 2, yaitu A dan B.

Lakukan latihan untuk menentukan macam dan jumlah gamet melalui Tugas mandiri berikut.

### Tugas Mandiri

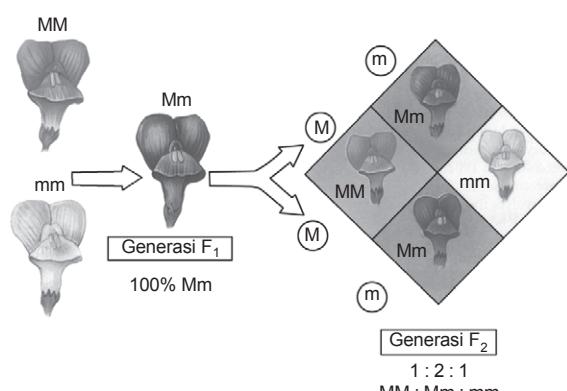
Buatlah macam dan jumlah gamet untuk trihibrid AabbCC dan AaBbCC. Kumpulkan jawaban Anda.

Beberapa kesimpulan penting dari perkawinan monohibrid di atas sebagai berikut.

- 1) Semua individu F<sub>1</sub> memiliki sifat yang seragam.
- 2) Jika dominan nampak sepenuhnya, individu F<sub>1</sub> memiliki fenotip seperti induknya yang dominan.
- 3) Pada waktu individu F<sub>1</sub> yang heterozigot itu membentuk gamet-gamet terjadilah pemisahan alel sehingga gamet hanya memiliki salah satu alel saja.
- 4) Jika dominasi nampak sepenuhnya, perkawinan monohibrid (Bb >< Bb) menghasilkan keturunan yang memperlihatkan perbandingan fenotip 3 : 1 (yaitu biji bulat : biji berkerut) dan memperlihatkan perbandingan genotip 1 : 2 : 1 (yaitu BB : Bb : bb).

Kadang-kadang individu hasil perkawinan tidak didominasi oleh salah satu induknya. Dengan kata lain, sifat dominan tidak muncul secara penuh. Peristiwa itu menunjukkan adanya **sifat intermediat**.

Perhatikan Gambar 5.4. Sifat intermediat dapat dilihat pada penyerbukan silang tanaman bunga pukul empat (*Mirabilis jalapa*). Jika serbuk sari berasal dari tanaman homozigot berbunga merah (MM) disilangkan ke putik tanaman homozigot berbunga putih (mm), semua keturunan F<sub>1</sub> berbunga merah muda (Mm). Perhatikan diagram berikut.



Sumber: Biology, Raven & Johnson

**Gambar 5.4**

Perkawinan monohibrid menghasilkan sifat intermediat

P : Gamet :	$\sigma$ MM (Merah) M	><  ↓	♀mm (Putih) m												
$F_1$ :	Mm (Merah muda)														
$F_1 >< F_1$ :	$\sigma$ Mm (Merah muda)	><	♀Mm (Merah muda)												
Gamet :	M m	M m													
$F_2$ :	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\sigma</math></th> <th><math>\sigma</math></th> <th></th> </tr> <tr> <th>♀</th> <th>♂</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M</td> <td>M</td> <td>Mm (Merah muda)</td> </tr> <tr> <td>m</td> <td>Mm (Merah muda)</td> <td>mm (Putih)</td> </tr> </tbody> </table>	$\sigma$	$\sigma$		♀	♂		M	M	Mm (Merah muda)	m	Mm (Merah muda)	mm (Putih)	M Mm (Merah) m Mm (Merah muda)	m mm (Putih)
$\sigma$	$\sigma$														
♀	♂														
M	M	Mm (Merah muda)													
m	Mm (Merah muda)	mm (Putih)													

Perbandingan fenotip merah : merah muda : putih = 1 : 2 : 1  
 Perbandingan genotip MM : Mm : mm = 1 : 2 : 1

Berdasarkan diagram persilangan di atas diperoleh semua tanaman  $F_1$  heterozigot berbunga merah muda (Mm). Warna ini merupakan sifat intermediat (antara merah dan putih). Jika  $F_1$  mengadakan penyerbukan sendiri, maka  $F_2$  akan memperlihatkan perbandingan 1 merah : 2 merah muda : 1 putih.

Lakukan kegiatan berikut untuk mengetahui perbandingan genotip dan fenotip  $F_2$  pada persilangan monohibrid.



## Eksperimen 1

### Menyilangkan Sifat Monohibrid

#### 1. Sifat Dominasi Penuh

Siapkan 2 buah kantung yang berisi 12 kancing yang terdiri dari 6 kancing berwarna merah dan 6 kancing berwarna putih. Kantung diumpamakan alat kelamin dan kancing diumpamakan gamet. Kancing merah diumpamakan gen dominan (R) dan kancing putih diumpamakan alel yang bersifat resesif (r). Lakukan langkah-langkah berikut.

- Ambillah satu kancing dari kantung kiri menggunakan tangan kiri. Pada waktu bersamaan ambillah satu kancing dari kantung kanan menggunakan tangan kanan.

- Catatlah pengambilan kancing tersebut, anggap pertemuan kancing di kedua belah tangan Anda itu merupakan zigot. Ada tiga kemungkinan yang Anda peroleh, yaitu:
  - 2 kancing merah, berarti zigot bergenotip RR = merah,
  - 1 kancing merah dan 1 kancing putih, berarti zigot bergenotip Rr = merah, dan
  - 2 kancing putih, berarti zigot bergenotip rr = putih.
 Setelah Anda selesai mencatat hasilnya, kembalikan kancing-kancing itu.
- Ulangi percobaan itu sampai 10 kali dengan mengaduk kancing itu terlebih dahulu dan catat hasilnya.
- Buatlah tabel berikut.

Pengambilan Ke-	RR (Merah)	Rr (Merah)	rr (Putih)
1			
2			
3			
.			
10			
Jumlah			

- e. Hitunglah frekuensi genotip dan fenotipnya, bandingkan pula dengan perbandingan menurut Mendel.  
f. Buatlah diagram persilangannya.
2. Sifat Dominasi Tidak Penuh (Intermediat)  
Lakukanlah eksperimen seperti di atas, tetapi dalam eksperimen ini memiliki kemungkinan sifat intermediat. Bila diperoleh 1 kancing merah dan 1 kancing putih, zigotnya memiliki genotip Rr dan fenotipnya merah

muda (intermediat). Catatlah perolehan hasilnya dalam tabel berikut.

Pengambilan Ke-	RR (Merah)	Rr (Merah Muda)	rr (Putih)
1			
2			
3			
.			
10			
Jumlah			

#### Pertanyaan:

- Berapa perbandingan genotip dan fenotip pada  $F_2$ ?
- Samakah perbandingan tersebut dengan perbandingan yang dikemukakan oleh Mendel?

Buatlah laporan tertulis hasil eksperimen ini dan kumpulkan kepada bapak atau ibu guru Anda.

### b. Hukum II Mendel

Pada percobaan berikutnya, Mendel menggunakan persilangan dengan dua sifat beda atau disebut **persilangan dihibrid**. Mendel menggunakan dua sifat beda dari tanaman ercis, yaitu bentuk dan warna biji. Oleh Mendel, tanaman ercis biji bulat-kuning disilangkan dengan tanaman ercis biji berkerut-hijau. Hasilnya, semua keturunan  $F_1$  berupa tanaman ercis biji bulat-kuning. Pada persilangan antarindividu  $F_1$  didapatkan 16 kombinasi gen dengan empat fenotip, yaitu tanaman ercis biji bulat-kuning, biji bulat-hijau, biji berkerut-kuning, dan biji berkerut-hijau.

Misalnya diketahui gen-gen yang menentukan sifat biji tanaman ercis sebagai berikut.

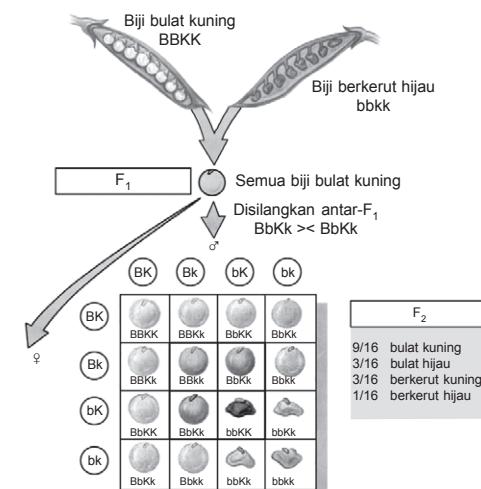
- B = gen yang menentukan biji bulat.
- b = gen yang menentukan biji berkerut.
- K = gen yang menentukan biji berwarna kuning.
- k = gen yang menentukan biji berwarna hijau.

Selanjutnya, perhatikan diagram persilangan pada Gambar 5.5 di samping.

Perbandingan genotip dan fenotip  $F_2$  dapat Anda amati dalam Tabel 5.1 berikut.

**Tabel 5.1 Perbandingan Genotip dan Fenotip  $F_2$  pada Persilangan Dihibrid**

Perbandingan Fenotip	Perbandingan Genotip	Genotip	Fenotip
9	1	BBKK	bulat kuning
	2	BBKk	
	2	BbKK	
	4	BbKk	



Sumber: Biology, Raven & Johnson

**Gambar 5.5**  
Persilangan dihibrid

Perbandingan Fenotip	Perbandingan Genotip	Genotip	Fenotip
3 2	1	BBkk Bbkk	bulat hijau
	2	bbKK bbKk	berkerut kuning
1	1	bbkk	berkerut hijau

Berdasarkan hasil percobaan di atas, Mendel menarik kesimpulan bahwa gen-gen dari sepasang alel memisah secara bebas (tidak saling mempengaruhi) ketika terjadi meiosis selama pembentukan gamet. Prinsip ini dikenal sebagai **hukum II Mendel** atau dikenal dengan *The Law of Independent Assortment of Genes* atau **hukum Pengelompokan Gen secara Bebas**. Oleh karena itu, pada contoh dihibrid tersebut terjadi 4 macam pengelompokan dari dua pasang gen sebagai berikut.

- 1) Gen B mengelompok dengan gen K, terdapat dalam gamet BK.
- 2) Gen B mengelompok dengan gen k, terdapat dalam gamet Bk.
- 3) Gen b mengelompok dengan gen K, terdapat dalam gamet bK.
- 4) Gen b mengelompok dengan gen k, terdapat dalam gamet bk.

Contoh persilangan dihibrid yang lain misalnya pada tanaman bunga pukul empat. Tanaman bunga pukul empat ada yang berdaun lebar (LL) dan ada yang berdaun sempit (ll), dan yang berdaun sedang bersifat heterozigot (Ll). Bunganya ada yang berwarna merah (MM), ada yang putih (mm), dan ada yang merah muda (Mm). Jika tanaman berdaun sempit-bunga putih disilangkan dengan tanaman berdaun lebar-bunga merah, tanaman F<sub>1</sub> bersifat intermediat berdaun sedang dan berbunga merah muda. Tanaman F<sub>2</sub> akan memperlihatkan 16 kombinasi genotip maupun fenotip dengan perbandingan 1 : 2 : 1 : 2 : 4 : 2 : 1 : 2 : 1.

P :	♀ LLMM (Lebar, merah)	><	♂ llmm (Sempit, putih)
Gamet :	LM		lm
F <sub>1</sub> :	↓		
	LIMm (Sedang, merah muda) (intermediat)		

F <sub>2</sub>	♀ ♂	LM	Lm	IM	Im
		LM	LLMM	LLMm	LIMM
	Lm	LLMm	LLmm	LIMm	Llmm
	IM	LIMM	LIMm	IIMM	IIMm
	Im	LIMm	Llmm	IIMm	Ilmm

Monohibrid dapat menghasilkan sifat intermediat seperti contoh perkawinan *Mirabilis jalapa* di depan. Sifat intermediat ini juga dapat ditemui pada dihibrid.



Perbandingan genotip dan fenotip dapat Anda amati dalam Tabel 5.2 berikut.

**Tabel 5.2 Perbandingan Genotip dan Fenotip  $F_2$  pada Dihibrid**

Perbandingan Fenotip	Perbandingan Genotip	Genotip	Fenotip (Lebar Daun-Warna Bunga)
1	1	LLMM	lebar-merah
2	2	LLMm	lebar-merah muda
1	1	LLmm	lebar-putih
2	2	LIMM	sedang-merah
4	4	LIMm	sedang-merah muda
2	2	Llmm	sedang-putih
1	1	IIMM	sempit-merah
2	2	IIMm	sempit-merah muda
1	1	Ilmm	sempit-putih

Lakukan kegiatan berikut untuk mengetahui perbandingan genotip dan fenotip  $F_2$  pada persilangan dihibrid.



## Eksperimen 2

### Menyilangkan Sifat Dihibrid

#### 1. Sifat Dominasi Penuh

Siapkan 2 buah kantung yang masing-masing berisi 16 kancing yang terdiri atas:

- 4 merah-biru (RB) diibaratkan bunga merah dan buah bulat,
- 4 merah-abu-abu (Rb) diibaratkan bunga merah dan buah oval,
- 4 putih-biru (rB) diibaratkan bunga putih dan buah bulat,
- 4 putih-abu-abu (rb) diibaratkan bunga putih dan buah oval.

Kantung ini diumpamakan alat kelamin individu dihibrid ( $RrBb$ ), sedangkan kombinasi kancing tersebut merupakan gamet-gamet yang dibentuk oleh dihibrid itu. Lakukan seperti Eksperimen 1. Catat hasilnya dalam tabel dan ulangi sampai 16 kali.

Pengambilan Ke-	R-B- (Merah-Bulat)	R-bb (Merah-Oval)	rrB- (Putih-Bulat)	rrbb (Putih-Oval)
1				
2				
3				
.				
Jumlah				

Hitunglah frekuensi genotip dan fenotip  $F_2$ . Bandingkan dengan perbandingan menurut Mendel. Buat pula diagram persilangannya.

#### 2. Dominasi Tidak Penuh

Lakukan kegiatan seperti di atas tetapi dalam kegiatan ini memiliki kemungkinan sifat intermediat. Catatlah perolehan hasilnya dalam tabel seperti di atas. Namun, simaklah dahulu arti dari kombinasi kancing yang menunjukkan adanya sifat intermediat.

Genotip	Fenotip
RRBB	bunga merah, buah bulat
RRBb	bunga merah, buah agak bulat
RRbb	bunga merah, buah oval
RrBB	bunga merah jambu, buah bulat
RrBb	bunga merah jambu, buah agak bulat
Rrb	bunga merah jambu, buah oval
rrBB	bunga putih, buah bulat
rrBb	bunga putih, buah agak bulat
rrbb	bunga putih, buah oval

### Pertanyaan:

- Berapa perbandingan genotip dan fenotip pada  $F_2$ ?
- Samakah perbandingan tersebut dengan perbandingan yang dikemukakan oleh Mendel?

Buatlah laporan tertulis hasil eksperimen ini dan kumpulkan kepada bapak atau ibu guru.

Berdasarkan beberapa contoh persilangan di halaman depan, ternyata terdapat hubungan antara banyaknya sifat beda, jumlah gamet, serta kombinasi fenotip dan genotip  $F_2$ , seperti dijelaskan dalam Tabel 5.3 berikut.

**Tabel 5.3** Hubungan Antara Sifat Beda, Jumlah Gamet, serta Kombinasi Fenotip dan Genotip

Banyaknya Sifat Beda	Macam Gamet dari $F_1$	Banyaknya Kombinasi dalam $F_2$	Banyaknya Fenotip dalam $F_2$	Banyaknya Kombinasi Persis $F_1$	Banyaknya Kombinasi Homozigot	Banyaknya Kombinasi Heterozigot	Banyaknya Macam Genotip dalam $F_2$
1	2	4	2	2	2	0	3
2	4	16	4	4	4	2	9
3	8	64	8	8	8	6	27
4	16	256	16	16	16	14	81
n	$2^n$	$(2^n)^2$	$2^n$	$2^n$	$2^n$	$2^n - 2$	$3^n$

Sementara itu, untuk meramalkan atau mengetahui perbandingan fenotip  $F_2$  dari suatu hibrid dapat dicari dengan rumus segitiga Pascal. Perhatikan Tabel 5.4 berikut.

**Tabel 5.4** Meramalkan Perbandingan Fenotip  $F_2$  dengan Rumus Segitiga Pascal

Jumlah Sifat Beda	Jumlah Macam Fenotip	Kemungkinan Macam Fenotip	Perbandingan Fenotip $F_2$
1	2	1 1	3 : 1
2	4	1 2 1	9 : 3 : 3 : 1
3	8	1 3 3 1	27 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 3 : 1
4	16	1 4 6 4 1	81 : 27 : 27 : 27 : 27 : 9 : 9 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 3 : 1
5	32	1 5 10 10 5 1	243 : 81 : 81 . . . : 27 : 27 . . . : 9 : 9 . . . : 3 : 3 . . . : 1
6	$2^n$	1 6 15 20 15 6 1	14243 14243 123 123 5× 10× 10× 5× $3^n$ : . . . dan seterusnya

## 2. Perkawinan Resiprokal

Perkawinan resiprokal merupakan perkawinan kebalikan dari yang semula dilakukan dan menghasilkan keturunan dengan perbandingan genotip yang sama. Perhatikan contoh berikut.

Mula-mula dikawinkan tanaman ercis berbuah polong hijau dengan tanaman ercis polong kuning. Semua tanaman  $F_1$  berbuah polong hijau. Keturunannya  $F_2$  memisah dengan perbandingan fenotip 3 hijau : 1 kuning. Pada perkawinan resiprokal digunakan serbuk sari yang berasal dari tanaman berbuah polong kuning dan diberikan kepada bunga dari tanaman berbuah polong hijau.

P : $\text{♀hh}$ (Kuning)	$><$	$\text{♂HH}$ (Hijau)	Resiprokalnya:
	$\downarrow$		P : $\text{♀HH}$ (Hijau) $><$ $\text{♂hh}$ (Kuning)
$F_1$ : $Hh$ (Hijau)			$F_1$ : $Hh$ (Hijau)
Gimet $\text{♂} = H$ dan $h$			Gimet $\text{♂} = H$ dan $h$
Gimet $\text{♀} = H$ dan $h$			Gimet $\text{♀} = H$ dan $h$
$F_2$ : $HH$ : polong hijau			$F_2$ : $HH$ : polong hijau
$Hh$ : polong hijau			$Hh$ : polong hijau
$Hh$ : polong hijau			$Hh$ : polong hijau
$hh$ : polong kuning			$hh$ : polong kuning

### 3. Perkawinan Balik (*Back Cross*)

Perkawinan balik (*back cross*) adalah perkawinan antara individu  $F_1$  dengan salah satu induknya, induk betina atau jantan. *Back cross* berguna untuk mencari genotip induk.

Contoh: Marmot mempunyai gen B yang menunjukkan pembawa sifat warna bulu hitam dan gen b yang menunjukkan pembawa sifat warna bulu putih. Induk jantan mempunyai bulu berwarna hitam homozigot disilangkan dengan induk betina mempunyai bulu berwarna putih homozigot kemudian dilanjutkan dengan perkawinan balik. Genotip  $F_2$  hasil perkawinan balik dapat ditentukan melalui langkah-langkah berikut.

P :	♀ BB (Hitam)	><	♂ bb (Putih)									
		↓										
$F_1$ :	Bb (Hitam)											
<i>Back cross</i>	♀ BB (Induk) >< (Hitam)	↓	♂ Bb (Hitam)									
$F_2$ :	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"><tr><td>♀ ♂</td><td>B</td><td></td></tr><tr><td>B</td><td>BB (Hitam)</td><td></td></tr><tr><td>b</td><td>Bb (Hitam)</td><td></td></tr></table>	♀ ♂	B		B	BB (Hitam)		b	Bb (Hitam)			
♀ ♂	B											
B	BB (Hitam)											
b	Bb (Hitam)											

Jadi, induk memiliki genotip homozigot dominan BB.

atau	♀ Bb (Hitam)	><	♂ bb (Induk) (Putih)						
		↓							
	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"><tr><td>♀ ♂</td><td>B</td><td>b</td></tr><tr><td>b</td><td>Bb (Hitam)</td><td>bb (Putih)</td></tr></table>	♀ ♂	B	b	b	Bb (Hitam)	bb (Putih)		
♀ ♂	B	b							
b	Bb (Hitam)	bb (Putih)							

Jadi, induk memiliki genotip homozigot resesif bb.

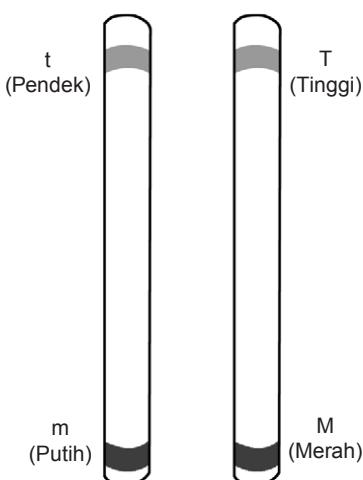
### 4. Uji Silang (*Test Cross*)

Uji silang adalah perkawinan antara individu  $F_1$  (hibrid) dengan individu yang dobel resesif atau homozigot resesif. *Test cross* berguna untuk mengetahui apakah suatu individu bergenotip homozigot (galur murni) atau heterozigot.

P :	♂ BB (Hitam)	><	♀ bb (Putih)
		↓	
$F_1$ :	Bb (Hitam)		

<i>Test cross:</i>	♂ Bb (Hitam)	><	♀ bb (Putih)
		↓	

♀ ♂	B	b
b	Bb (Hitam)	bb (Putih)



Sumber: Dokumentasi Penerbit

**Gambar 5.6**

Alel ganda



### Eksperimen Plus

#### Diagram Perkawinan

Buatlah diagram perkawinan antara kedua orang tua Anda sehingga mendapatkan golongan darah seperti yang Anda miliki.



Kelinci normal



Kelinci himalaya



Kelinci chinchilla



Kelinci albino

Sumber: Biology, Mader S.S

**Gambar 5.7**

Warna rambut kelinci ditentukan oleh alel ganda

Perkawinan *test cross* menghasilkan keturunan dengan perbandingan 1 : 1. Jika hasil keturunan  $F_1$  menghasilkan perbandingan fenotip 1 : 1, berarti individu yang diuji bergenotip heterozigot. Sebaliknya, jika *test cross* 100% berfenotip sama, berarti individu yang diuji bersifat homozigot (galur murni).

## 5. Alel Ganda

Alel adalah gen-gen yang terletak pada lokus yang sama (bersesuaian) dalam kromosom homolog. Alel merupakan anggota dari sepasang gen yang memiliki pengaruh berlawanan. Jadi, alel adalah gen-gen yang terletak pada lokus yang sama dan menentukan sifat yang sama atau hampir sama. Misalnya T menentukan sifat tinggi pada batang, sedangkan t menentukan batang pendek maka T dan t merupakan alel. Namun, seandainya m merupakan gen yang menentukan warna putih pada bunga maka T dan m bukan alel. Alel dalam kromosom sering digambarkan seperti Gambar 5.6. Apabila sebuah lokus dalam sebuah kromosom ditempati oleh beberapa alel atau suatu seri alel maka dinamakan **alel ganda**. Contoh alel ganda yaitu pewarisan golongan darah pada manusia dan pada rambut kelinci.

### a. Pewarisan Golongan Darah pada Manusia

Berdasarkan penggolongan darah sistem ABO, darah manusia digolongkan menjadi empat, yaitu golongan darah A, B, AB, dan O. Penggolongan darah ini didasarkan atas macam antigen dalam eritrosit. Antigen-antigen itu diwariskan oleh seri alel ganda dengan simbol I. Huruf I ini berasal dari kata isoaglutinin, yaitu antigen yang mengakibatkan empat golongan darah tersebut.

Perhatikan Tabel 5.5 berikut.

**Tabel 5.5 Penggolongan Darah Manusia**

Golongan Darah (Fenotip)	Antigen dalam Eritrosit	Antibodi dalam Serum	Alel dalam Kromosom	Genotip
A	A	Anti-B	I <sup>A</sup>	I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> atau I <sup>A</sup> I <sup>O</sup>
B	B	Anti-A	I <sup>B</sup>	I <sup>B</sup> I <sup>B</sup> atau I <sup>B</sup> I <sup>O</sup>
AB	A dan B	-	I <sup>A</sup> , I <sup>B</sup>	I <sup>A</sup> I <sup>B</sup>
O	-	Anti-A dan anti-B	I <sup>O</sup>	I <sup>O</sup> I <sup>O</sup>

Gen I<sup>A</sup> dominan terhadap I<sup>O</sup>.

Gen I<sup>B</sup> dominan terhadap I<sup>O</sup>.

I<sup>A</sup> dan I<sup>B</sup> sama-sama dominan terhadap I<sup>O</sup> sehingga genotip I<sup>A</sup>I<sup>B</sup> menunjukkan golongan darah AB. Jadi, gen I<sup>O</sup> mempunyai alel I<sup>A</sup> dan alel I<sup>B</sup>.

### b. Alel Ganda Penentu Rambut Kelinci

Perhatikan berbagai warna rambut bulu kelinci pada Gambar 5.7 di samping. Alel ganda pada kelinci terdapat pada gen penentu warna rambut.

Gen K : kelinci normal berwarna kelabu.

Gen K<sup>ch</sup>: kelinci chinchilla berwarna kelabu muda.

Gen  $K^h$  : kelinci himalaya berwarna putih, ujung hidung, ujung telinga, ekor, dan kaki berwarna kelabu gelap.

Gen  $k$  : kelinci albino (tak berpigmen) berwarna putih.

Pada keempat gen tersebut berlaku ketentuan sebagai berikut.

- 1) Kelabu dominan terhadap ketiga warna yang lain.
- 2) Kelabu muda dominan terhadap himalaya dan albino.
- 3) Himalaya dominan terhadap albino.
- 4) Albino merupakan gen resesif.

Kemungkinan Genotip	Fenotip
$KK$ , $KK^{ch}$ , $KK^h$ , $Kk$ $K^{ch}K^{ch}$ , $K^{ch}K^h$ , $K^{ch}k$	Kelabu (normal) Kelabu muda (chinchilla)
$K^hK^h$ , $K^hk$ $kk$	Himalaya Albino

#### Contoh:

Kelinci chinchilla disilangkan dengan kelinci himalaya.

$$\begin{array}{lll} P & : & \text{♀ } K^{ch}k \\ & & >< \\ \text{Gamet} & : & \begin{array}{ccc} K^{ch} & & K^h \\ k & \downarrow & k \end{array} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} F_1 & : & \begin{array}{l} K^{ch}K^h : \text{kelinci chinchilla.} \\ K^{ch}k : \text{kelinci chinchilla.} \\ K^hk : \text{kelinci himalaya.} \\ kk : \text{kelinci albino.} \end{array} \end{array}$$

### Uji Kompetensi A

Jawablah soal-soal berikut.

1. Mengapa Mendel lebih memilih kacang ercis sebagai objek penelitiannya?
2. Diketahui gen B (hitam) lebih dominan terhadap gen b (putih) dan P (panjang) dominan terhadap p (pendek). Apabila induk jantan bergenotip hitam dan panjang homozigot disilangkan dengan induk betina bergenotip putih heterozigot, bagaimanakah perbandingan genotip dan fenotip  $F_2$ ?
3. Coba terangkan perbedaan hukum I dan II Mendel.

4. Uji silang dapat digunakan untuk mengetahui apakah suatu individu bergenotip homozigot atau heterozigot maka kita dapat melakukan uji silang. Apa maksudnya? Berikan contohnya.
5. Pada suatu malam di sebuah rumah sakit telah lahir empat bayi. Keempat bayi tersebut bergolongan darah O, A, B, dan AB. Empat pasang orang tua mereka bergolongan darah:
  - (a) O dan O, (c) A dan B, dan
  - (b) AB dan O, (d) B dan B.
 Carilah pasangan orang tua yang sesuai untuk tiap-tiap bayi itu.

Para ilmuwan dalam melakukan beberapa percobaan mengalami penyimpangan terhadap hukum Mendel. Indikasi penyimpangan itu ditunjukkan dengan berubahnya perbandingan fenotip keturunan yang tidak sesuai hukum Mendel. Mengapa hal itu dapat terjadi?

### B. Penyimpangan Hukum Mendel

Para ilmuwan melihat adanya penyimpangan terhadap hukum Mendel. Ternyata penyimpangan ini hanya merupakan penyimpangan semu karena pola dasarnya sama dengan hukum Mendel tersebut. Perubahan atau penyimpangan yang terjadi meliputi penyimpangan semu, pautan gen, pautan seks, pindah silang, determinasi seks, gen letal, dan gagal berpisah (*nondisjunction*).

## 1. Penyimpangan Semu

Beberapa peristiwa yang menunjukkan penyimpangan semu di antaranya epistasis dan hipostasis, kriptomeri, interaksi beberapa pasangan alel, polimeri, serta gen komplementer.

### a. Epistasis dan Hipostasis

Epistasis dan hipostasis merupakan salah satu bentuk interaksi gen dalam hal ini gen dominan mengalahkan gen dominan lainnya yang bukan sealel. Gen dominan yang menutup ekspresi gen dominan lainnya disebut **epistasis**, sedangkan gen dominan yang tertutup itu disebut **hipostasis**. Peristiwa epistasis dan hipostasis terjadi pada warna umbi lapis pada bawang (*Allium sp.*), warna kulit gandum, warna bulu ayam, warna rambut mencit, dan warna mata pada manusia. Peristiwa epistasis dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu epistasis dominan, epistasis resesif, serta epistasis dominan dan resesif.

### 1) Epistasis Dominan

Pada epistasis dominan terdapat satu gen dominan yang bersifat epistasis. Misalnya warna umbi lapis pada bawang (*Allium* sp.). A merupakan gen untuk umbi merah dan B merupakan gen untuk umbi kuning. Gen merah dan kuning dominan terhadap putih.

Perkawinan antara tanaman bawang berumbi lapis kuning homozigot dengan yang merah homozigot menghasilkan tanaman  $F_1$  yang berumbi lapis merah. Keturunan  $F_2$  terdiri atas 16 kombinasi dengan

perbandingan  $\frac{12}{16}$  merah :  $\frac{3}{16}$  kuning :  $\frac{1}{16}$  putih atau  $12 : 3$

: 1. Perbandingan itu terlihat menyimpang dari hukum Mendel, tetapi ternyata tidak. Perbandingan  $9 : 3 : 3 : 1$  untuk keturunan perkawinan dihibrid hanya mengalami modifikasi saja, yaitu  $9 : 3 : 3 : 1$  menjadi  $12 : 3 : 1$ . Perhatikan diagram persilangan berikut.

P	:	$\text{♀ AAbb}$ (Merah)	$><$	$\text{♂ aaBB}$ (Kuning)
F <sub>1</sub>	:		↓	
F <sub>2</sub>	:	AaBb (Merah)		



## 2) Epistasis Resesif

Pada peristiwa epistasis resesif terdapat suatu gen resesif yang bersifat epistasis terhadap gen dominan yang bukan alelnya (pasangannya). Gen resesif tersebut harus dalam keadaan homozigot, contohnya pada pewarisan warna rambut tikus. Gen A menentukan warna hitam, gen a menentukan warna abu-abu, gen C menentukan enzim yang menyebabkan timbulnya warna dan gen c yang menentukan enzim penghambat munculnya warna. Gen C bersifat epistasis. Jadi, tikus yang berwarna hitam memiliki gen C dan A. Perhatikan diagram persilangan berikut.

P :	CCAA (Hitam)	><	ccaa (Putih)
Gamet :	CA	↓	ca
F <sub>1</sub> :	CcAa (Hitam)		
F <sub>2</sub> : Diperoleh perbandingan genotip sebagai berikut.			
9 C_A_ : hitam 3 C_aa : abu-abu 3 ccA_ : putih 1 ccaa : putih			

Jadi, perbandingan fenotip F<sub>2</sub> = hitam : abu-abu : putih = 9 : 3 : 4.

Pada epistasis resesif,  
CC epistasis terhadap  
A dan a.



I epistasis terhadap C dan c.  
cc epistasis terhadap I dan i.



## 3) Epistasis Dominan dan Resesif

Epistasis dominan dan resesif (*inhibiting gene*) merupakan penyimpangan semu yang terjadi karena terdapat dua gen dominan yang jika dalam keadaan bersama akan menghambat pengaruh salah satu gen dominan tersebut. Peristiwa ini mengakibatkan perbandingan fenotip F<sub>2</sub> = 13 : 3. Contohnya ayam leghorn putih mempunyai fenotip IIICC dikawinkan dengan ayam *white silkie* berwarna putih yang mempunyai genotip iicc. Perhatikan diagram berikut.

P :	♂IICC (Putih)	><	♀iicc (Putih)
Gamet :	IC	↓	ic
F <sub>1</sub> :			IiCc

F <sub>2</sub> :	♂		♀			
	♀	♂	IC	Ic	iC	ic
IC		IC	IICC putih	IICc putih	iiCC berwarna	iiCc berwarna
Ic		Ic	IICc putih	IIcc putih	iiCc berwarna	iicc berwarna
iC		iC	iiCC berwarna	iiCc berwarna	iiic berwarna	iiic berwarna
ic		ic	iiCc berwarna	iicc berwarna	iiic berwarna	iiic berwarna

**Catatan:**

- C = gen yang menghasilkan warna.  
c = gen yang tidak menghasilkan warna (ayam menjadi putih).  
I = gen yang menghalangi keluarnya warna (gen ini disebut juga gen penghalang atau inhibitor).  
i = gen yang tidak menghalangi keluarnya warna.

Coba perhatikan diagram hasil persilangan  $F_1$  di atas. Meskipun gen C mempengaruhi munculnya warna bulu, tetapi karena bertemu dengan gen I (gen yang menghalangi munculnya warna), maka menghasilkan keturunan dengan fenotip ayam berbulu putih. Jadi, perbandingan fenotip:

$$F_2 = \text{ayam putih} : \text{ayam berwarna}$$

$$= \frac{13}{16} : \frac{3}{16} = 13 : 3$$

**b. Kriptomeri**

Kriptomeri adalah peristiwa gen dominan yang seolah-olah tersembunyi bila berada bersama dengan gen dominan lainnya, dan akan terlihat bila berdiri sendiri.

**Correns** pernah menyilangkan tumbuhan *Linaria maroccana* berbunga merah galur murni dengan yang berbunga putih juga galur murni. Dalam persilangan tersebut diperoleh  $F_1$  semua berbunga ungu, sedangkan  $F_2$  terdiri atas tanaman dengan perbandingan berbunga ungu : merah : putih = 9 : 3 : 4.

Warna bunga *Linaria* (ungu, merah, dan putih) ditentukan oleh pigmen hemosianin yang terdapat dalam plasma sel dan sifat keasaman plasma sel. Pigmen hemosianin akan menampilkan warna merah dalam plasma atau air sel yang bersifat asam dan akan menampilkan warna ungu dalam plasma sel yang bersifat basa.

Warna bunga *Linaria maroccana* ditentukan oleh ekspresi gen-gen berikut.

- 1) Gen A, menentukan ada bahan dasar pigmen antosianin.
- 2) Gen a, menentukan tidak ada bahan dasar pigmen antosianin.
- 3) Gen B, menentukan suasana basa pada plasma sel.
- 4) Gen b, menentukan suasana asam pada plasma sel.

Persilangan antara *Linaria maroccana* bunga merah dengan bunga putih menghasilkan keturunan seperti dijelaskan pada diagram berikut.

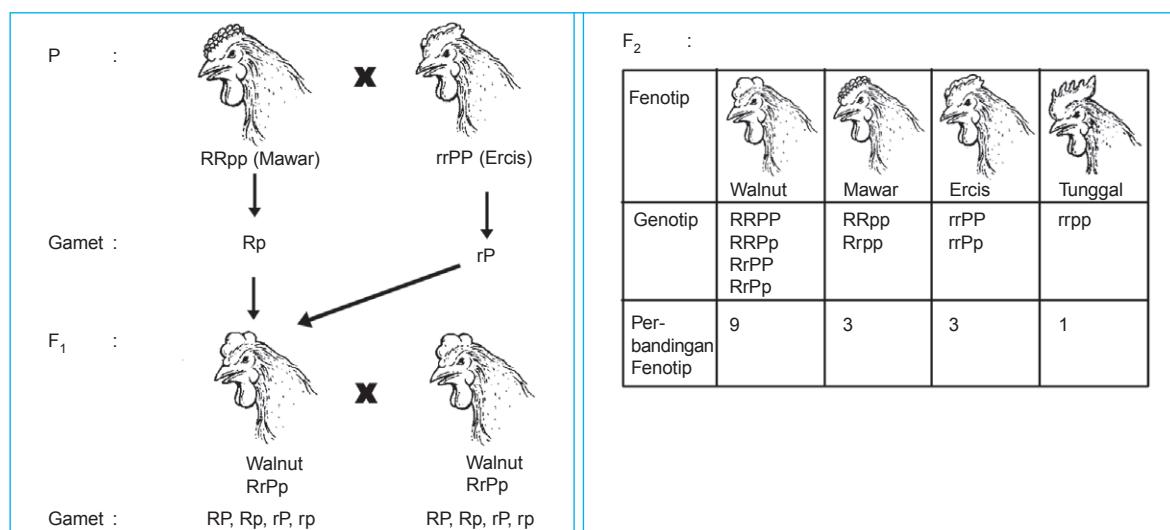
P	:	AAbb	><	aaBB
		(Merah)		(Putih)
Gamet :		Ab		aB
$F_1$	:		AaBb	
			(Ungu)	

$F_2$ :	$\text{♀} \swarrow \text{♂}$	AB	Ab	aB	ab
AB	AABB ungu	AABb ungu	AaBB ungu	AaBb ungu	Aabb merah
Ab	AABb ungu	AAbb merah	AaBb ungu	Aabb merah	
aB	AaBB ungu	AaBb ungu	aaBB putih	aaBb putih	
ab	AaBb ungu	Aabb merah	aaBb putih	aabb putih	

Persilangan tersebut dihasilkan rasio fenotip  $F_2$  = ungu : merah : putih = 9 : 3 : 4.

### c. Interaksi Beberapa Pasangan Alel (Atavisme)

Pada permulaan abad ke-20, **W. Baterson** dan **R.C. Punnet** menyilangkan beberapa varietas ayam negeri, yaitu ayam berpijal gerigi (mawar), berpijal biji (ercis), dan berpijal bilah (tunggal). Pada persilangan antara ayam berpijal mawar dengan ayam berpijal ercis, menghasilkan semua ayam berpijal sumpel (walnut) pada keturunan  $F_1$ . Varietas ini sebelumnya belum dikenal. Pada keturunan  $F_2$  diperoleh empat macam fenotip, yaitu ayam berpijal walnut, berpijal mawar, berpijal ercis, dan berpijal tunggal dengan perbandingan 9 : 3 : 3 : 1. Perbandingan ini sama dengan perbandingan  $F_2$  pada pembastaran dihibrid. Perhatikan diagram persilangan di bawah.



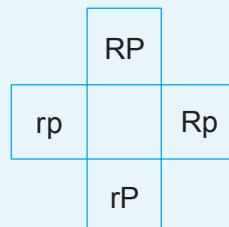
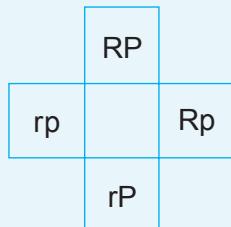
Berdasarkan diagram persilangan tersebut terdapat penyimpangan dibandingkan dengan persilangan dihibrid. Penyimpangan yang dimaksud bukan mengenai perbandingan fenotip, tetapi munculnya sifat baru pada  $F_1$  dan  $F_2$ . Keturunan  $F_1$  berfenotip ayam berpijal walnut atau sumpel,

tidak menyerupai salah satu induknya. Sifat pial sumpel atau walnut ( $F_1$ ) merupakan interaksi dua faktor dominan yang berdiri sendiri-sendiri dan sifat pial tunggal ( $F_2$ ) sebagai hasil interaksi dua faktor resesif. Lakukan kegiatan berikut agar Anda lebih memahami interaksi gen.



### Eksperimen 3

#### Membuat Persilangan Interaksi Gen Menggunakan Baling-Baling Genetika



##### Keterangan:

R = Gen ayam berpial gerigi (mawar).

P = Gen ayam berpial biji (ercis).

Buatlah 2 buah baling-baling seperti gambar di atas. Huruf-huruf yang terdapat pada kotak-kotak tersebut diasumsikan sebagai gamet-gamet ayam berpial sumpel (walnut) yaitu RP, Rp, rP, dan rp. Lakukan langkah-langkah eksperimen ini dengan urutan sebagai berikut.

1. Putarlah kedua baling-baling bersamaan. Kemudian hentikan secara acak.
2. Catatlah gamet-gamet yang bertemu (berhadapan). Misal seperti gambar di atas, gamet yang bertemu adalah Rp – rp. Lakukan langkah nomor 1 dan 2 tersebut paling sedikit 96 kali.

3. Lengkapilah tabel di bawah ini berdasarkan hasil yang Anda peroleh dari langkah 1 dan 2.

No.	Genotip	Fenotip	Jumlah
1.	RRPP		
2.	RRPp		
3.	RRpp		
4.	RrPP		
5.	RrPp		
6.	Rrpp		
7.	rrPP		
8.	rrPp		
9.	rrpp		

##### Keterangan:

R–P– = pial sumpel (walnut).

R–pp = pial bergerigi (mawar).

rrP– = pial biji (ercis).

rrpp = pial tunggal.

4. Bandingkan frekuensi genotip dan fenotipnya, bandingkan pula hasilnya dengan perbandingan menurut Mendel.

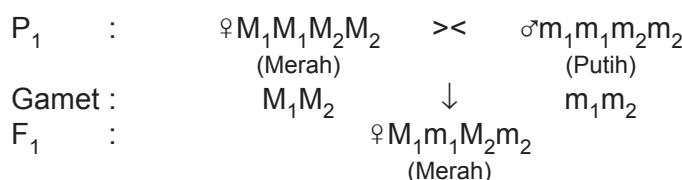
##### Pertanyaan:

1. Berapa perbandingan genotip dan fenotip  $F_2$ ?
2. Samakah perbandingan tersebut dengan perbandingan menurut Mendel?

Buatlah laporan tertulis hasil eksperimen ini dan kumpulkan kepada bapak atau ibu guru Anda.

#### d. Polimeri

Polimeri adalah pembastaran heterozigot dengan banyak sifat beda yang berdiri sendiri-sendiri, tetapi mempengaruhi bagian yang sama pada suatu organisme. Peristiwa polimeri pertama kali dilaporkan oleh **Nelson-Ehle**, melalui percobaan persilangan antara gandum berbiji merah dengan gandum berbiji putih. Perhatikan diagram persilangan berikut.



$$P_2 : \quad \text{♀} M_1 m_1 M_2 m_2 \quad >< \quad \text{♂} M_1 m_1 M_2 m_2$$

$\text{♀}$	$\text{♂}$	$M_1 M_2$	$M_1 m_2$	$m_1 M_2$	$m_1 m_2$
$M_1 M_2$		$M_1 M_1 M_2 M_2$ merah			
$M_1 m_2$		$M_1 M_1 M_2 m_2$ merah			
$m_1 M_2$		$M_1 m_1 M_2 M_2$ merah			
$m_1 m_2$		$M_1 m_1 M_2 m_2$ merah	$M_1 m_1 m_2 m_2$ merah	$m_1 m_1 M_2 m_2$ merah	$m_1 m_1 m_2 m_2$ putih

Jadi, polimeri menghasilkan rasio fenotip  $F_2 = \text{merah} : \text{putih} = 15 : 1$ .



Berdasarkan diagram di atas dihasilkan perbandingan genotip  $F_2$  sebagai berikut.

$$9 M_1 M_2 - = \text{merah} \quad 3 m_1 M_2 - = \text{merah}$$

$$3 M_1 - m_2 m_2 = \text{merah} \quad 1 m_1 m_1 m_2 m_2 = \text{putih}$$

### e. Gen Komplementer

Gen komplementer adalah gen-gen yang berinteraksi dan saling melengkapi. Kehadiran gen-gen tersebut secara bersama-sama akan memunculkan karakter (fenotip) tertentu. Sebaliknya, jika salah satu gen tidak hadir maka pemunculan karakter (fenotip) tersebut akan terhalang atau tidak sempurna.

Perhatikan contoh berikut.

Pemunculan suatu pigmen merupakan hasil interaksi dua gen, yaitu gen C dan gen P.

Gen C : mengakibatkan munculnya bahan mentah pigmen.

Gen c : tidak menghasilkan pigmen.

Gen P : menghasilkan enzim pengaktif pigmen.

Gen p : tidak mampu menghasilkan enzim.

Perhatikan persilangan yang menunjukkan adanya gen komplementer antara individu CCpp (putih) dengan individu ccPP (putih) pada diagram berikut.

$P : \quad \text{CCpp}$	$><$	$\text{ccPP}$
(Putih)		(Putih)
Gamet :		cP
	$\downarrow$	
$F_1 : \quad \text{CcPp}$		
	(Ungu)	

Jadi, rasio fenotip  $F_2$  adalah 9 ungu : 7 putih.



$\text{♀}$	$\text{♂}$	CP	Cp	cP	cp
CP	CCPP 1 ungu	CCPp 2 ungu	CcPP 3 ungu	CcPp 4 ungu	
Cp	CCPp 5 ungu	CCpp 6 putih	CcPp 7 ungu	Ccpp 8 putih	
cP	CcPP 9 ungu	CcPp 10 ungu	ccPP 11 putih	ccPp 12 putih	
cp	CcPp 13 ungu	Ccpp 14 putih	ccPp 15 putih	ccpp 16 putih	

## f. Gen-Gen Rangkap yang Mempunyai Pengaruh Kumulatif

Miyake dan Imai (Jepang) menemukan bahwa pada tanaman gandum (*Hordeum vulgare*) terdapat biji yang kulitnya berwarna ungu tua, ungu, dan putih.

Jika gen dominan A dan B terdapat bersama-sama dalam genotip, kulit buah akan berwarna ungu tua. Bila terdapat salah satu gen dominan saja (A atau B), kulit buah berwarna ungu. Absennya gen dominan menyebabkan kulit buah berwarna putih. Perhatikan diagram persilangan berikut.

$P_1$	:	$\text{♀AABB}$ (Ungu tua)	$><$	$\text{♂aabb}$ (Putih)																										
Gamet :		AB	↓	ab																										
$F_1$	:		AbBb																											
			(Ungu tua)																											
$P_2$	:	$\text{♀AaBb}$ (Ungu tua)	$><$	$\text{♂AaBb}$ (Ungu tua)																										
Gamet :		AB, Ab aB, ab	↓	AB, Ab aB, ab																										
$F_2$	:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center; padding: 2px;"><math>\text{♀} \swarrow \text{♂}</math></th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">AB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AB</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AABB ungu tua</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 2px;">Ab</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AABb ungu tua</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AAbb ungu</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AaBb ungu tua</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">Aabb ungu</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 2px;">aB</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AaBB ungu tua</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AaBb ungu tua</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">aaBB ungu</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">aaBb ungu</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 2px;">ab</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">AaBb ungu tua</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">Aabb ungu</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">aaBb ungu</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">aabb putih</td> </tr> </tbody> </table>				$\text{♀} \swarrow \text{♂}$	AB	Ab	aB	ab	AB	AABB ungu tua	AABb ungu tua	AaBB ungu tua	AaBb ungu tua	Ab	AABb ungu tua	AAbb ungu	AaBb ungu tua	Aabb ungu	aB	AaBB ungu tua	AaBb ungu tua	aaBB ungu	aaBb ungu	ab	AaBb ungu tua	Aabb ungu	aaBb ungu	aabb putih
$\text{♀} \swarrow \text{♂}$	AB	Ab	aB	ab																										
AB	AABB ungu tua	AABb ungu tua	AaBB ungu tua	AaBb ungu tua																										
Ab	AABb ungu tua	AAbb ungu	AaBb ungu tua	Aabb ungu																										
aB	AaBB ungu tua	AaBb ungu tua	aaBB ungu	aaBb ungu																										
ab	AaBb ungu tua	Aabb ungu	aaBb ungu	aabb putih																										

Jadi, perbandingan fenotip  $F_2$  antara ungu tua : ungu : putih = 9 : 6 : 1.



Berdasarkan diagram di atas dihasilkan perbandingan genotip  $F_2$  sebagai berikut.

9 A\_B\_ = ungu tua

3 A\_bb = ungu

3 aaB\_ = ungu

1 aabb = putih

Setelah Anda mencermati uraian mengenai berbagai penyimpangan semu terhadap hukum Mendel, lakukan Tugas mandiri berikut agar Anda mendapatkan wawasan yang lebih luas.



### Tugas Mandiri

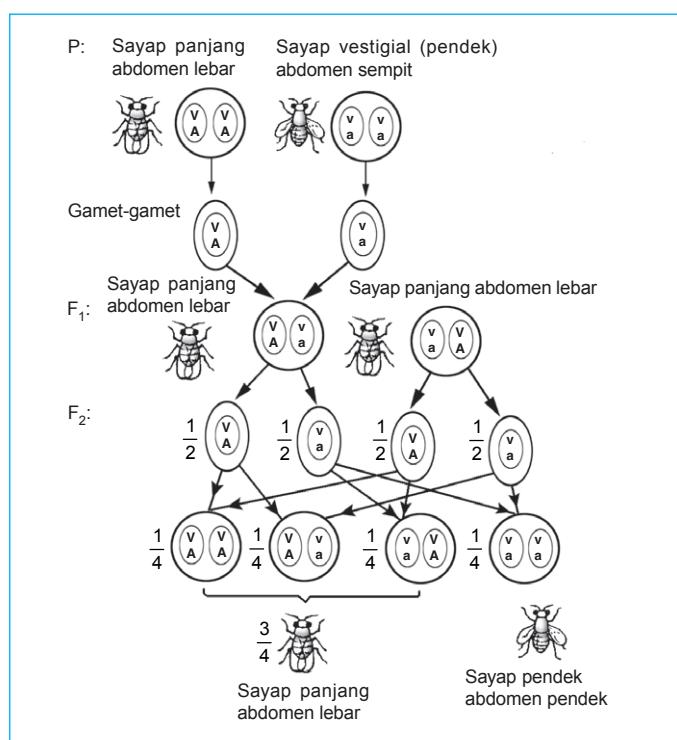
Kumpulkan beberapa artikel tentang Hereditas dengan tema penyimpangan semu terhadap hukum Mendel. Selanjutnya, pilih salah satu artikel yang menarik bagi Anda, dan tulislah dengan bahasa Anda sendiri. Presentasikan hasilnya di depan kelas.

## 2. Pautan Gen (Gen Linkage)

Pautan gen merupakan salah satu penyimpangan terhadap hukum Mendel. Pada peristiwa ini, dua gen atau lebih terletak pada satu kromosom dan tidak dapat memisahkan diri secara bebas. Hal ini terjadi karena gen-gen yang mengendalikan dua sifat beda terletak pada kromosom yang sama dengan letak lokus yang berdekatan.

Contoh peristiwa pautan terdapat pada *Drosophila melanogaster*, yang dilaporkan pertama kali oleh **T.H. Morgan**. *Drosophila melanogaster* memiliki empat pasang kromosom dalam inti selnya dan memiliki banyak gen yang semua berada pada kromosom sehingga tiap kromosom mengandung banyak gen.

Fakta menjelaskan bahwa faktor pembawa sifat panjang sayap dan lebar abdomen terletak pada kromosom yang sama dan diturunkan bersama-sama. Dengan perkataan lain, gen yang mengatur ukuran panjang sayap bertaut dengan gen yang mengatur ukuran lebar abdomen. Perhatikan diagram persilangan pada Gambar 5.8 di bawah ini.



Sumber: Biology, Raven & Johnson

**Gambar 5.8**

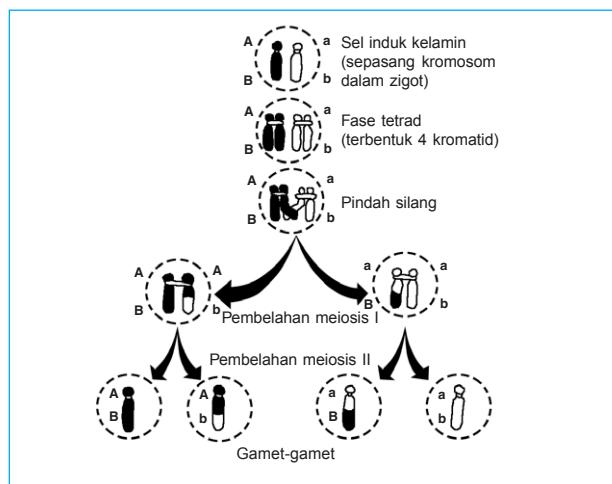
Diagram peristiwa pautan pada lalat buah

Gen-gen untuk ukuran sayap dan ukuran abdomen terletak pada kromosom yang sama dan tidak dapat disegregasikan secara bebas. Gen V (sayap panjang) dominan terhadap gen v (sayap pendek), dan gen A (abdomen lebar) dominan terhadap gen a (abdomen sempit). Rasio fenotip F<sub>2</sub> pada peristiwa pautan 3 : 1 untuk sayap panjang-abdomen lebar : sayap pendek-abdomen pendek.

### 3. Pindah Silang (*Crossing Over*)

Pindah silang terjadi apabila ada pertukaran sebagian gen-gen suatu kromatid dengan gen-gen dari kromatid pasangan homolognya. Pada peristiwa meiosis, kromatid yang berdekatan dengan kromosom homolog tidak selalu berjajar, berpasangan, dan beraturan, tetapi kadang-kadang saling melilit yang satu dengan yang lainnya. Hal ini sering mengakibatkan sebagian gen-gen suatu kromatid bertukar dengan gen-gen kromatid homolognya. Peristiwa ini disebut pindah silang atau *crossing over*. Akibat peristiwa pindah silang ini, jumlah macam fenotip hasil uji silang (*test cross*) tidak 1 : 1. Macam gamet yang dihasilkan  $F_1$  tidak dua macam, tetapi empat macam. Dua gamet memiliki gen-gen yang seperti pada induknya, disebut **gamet tipe parental**. Dua gamet lainnya berbeda dengan induknya dan merupakan hasil pindah silang, disebut **gamet tipe rekombinasi**.

Perhatikan bagan gametogenesis pada Gambar 5.9 yang menggambarkan terjadinya pindah silang antara satu pasang kromosom yang membawa gen AaBb dan menghasilkan empat macam gamet.



Sumber: Biology, Raven & Johnson

Gambar 5.9

Diagram pindah silang pada *Drosophila*

Berdasarkan percobaan Morgan dan Bridges pada *Drosophila melanogaster*, dilaporkan adanya peristiwa pindah silang pada lalat betina, tetapi tidak terjadi pada lalat jantan. Morgan dan Bridges menyilangkan lalat buah jantan bermata merah-sayap normal (PPVV) dengan lalat buah betina bermata ungu-sayap keriput (ppvv). Setelah itu, dilakukan uji silang (*test cross*) terhadap keturunan  $F_1$  (PpVv), baik pada lalat buah jantan maupun betina. Perhatikan diagram persilangan berikut.

P :	$\text{♀ ppvv}$ (Mata ungu sayap keriput)	$><$	$\text{♂ PPVV}$ (Mata merah sayap normal)
$F_1$ :		↓	PpVv (Mata merah sayap normal)

Test cross pada lalat buah jantan:

P :	$\text{♂PpVv}$	$><$	$\text{♀ppvv}$
	(Mata merah sayap normal)		(Mata ungu sayap keriput)
	↓		
F <sub>1</sub> : PpVv : mata merah-sayap normal = 79			
ppvv : mata ungu-sayap keriput = 72		$\} 1 : 1$	

Test cross pada lalat buah betina:

P :	$\text{♀PpVv}$	$><$	$\text{♂ppvv}$
	(Mata merah sayap normal)		(Mata ungu sayap keriput)
	↓		
F : PpVv : mata merah-sayap normal = 382 = tipe parental			
Ppvv : mata ungu-sayap keriput = 16		$\} \text{tipe rekombinasi}$	
ppVv : mata ungu-sayap normal = 22		$\}$	
ppvV : mata ungu-sayap keriput = 353 = tipe parental			

Individu bergenotip tipe parental, yaitu PpVv (mata merah-sayap normal) dan ppvv (mata ungu-sayap keriput). Individu bergenotip tipe rekombinasi, yaitu Ppvv (mata merah-sayap keriput) dan ppVv (mata ungu-sayap normal). Besarnya nilai pindah silang (NPS) dapat dihitung sebagai berikut.

$$\text{NPS} = \frac{\text{Jumlah tipe rekombinasi}}{\text{Jumlah seluruh individu}} \times 100\%$$

Berdasarkan data percobaan Morgan dan Bridges di atas, besar nilai pindah silang dapat dihitung sebagai berikut.

$$\frac{16 + 22}{773} \times 100\% = 4,90\%$$

Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan pindah silang (*crossing over*) antargen sebesar 4,90%.

#### 4. Pautan Seks (Rangkai Kelamin)

Pada beberapa hewan dan manusia mempunyai suatu sifat keturunan yang pewarisannya ditentukan oleh kromosom kelamin. Hal ini terjadi karena gen tersebut terpaut pada kromosom kelamin. Peristiwa itu disebut **pautan seks** atau **rangkai kelamin**. Pautan seks menunjukkan adanya pewarisan sifat didasarkan pada gen yang terdapat pada kromosom seks.

##### a. Pautan Seks (Rangkai Kelamin) pada *Drosophila*

Pautan seks atau rangkai kelamin mula-mula ditemukan oleh **Morgan** melalui penyilangan lalat buah betina bermata merah dan lalat jantan bermata putih. Perkawinan tersebut menghasilkan keturunan (F<sub>1</sub>) bermata merah. Sementara itu, keturunannya (F<sub>2</sub>) memperlihatkan perbandingan 3 lalat bermata merah : 1 lalat bermata putih. Anehnya yang bermata putih selalu jantan. Hal ini menunjukkan adanya sifat dominan bermata merah terhadap warna mata putih.

Perhatikan diagram persilangan berikut.

P :	$\text{♀ } W1 \downarrow W$ (Mata merah) x x	$\text{♂ } w1 \uparrow$ (Mata putih) x y								
	Ovum $W1$ x	Sperma $w1 \uparrow$ ↓ x y								
$F_1$ :	$\text{♀ } W1 \downarrow W$ (Mata merah) x x	$\text{♂ } w1 \uparrow$ (Mata merah) ↓ x y								
$F_2$ :	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center; padding: 5px;"><math>\text{♂ }</math> <math>\text{♀ }</math></th><th style="text-align: center; padding: 5px;"><math>W1</math> x</th><th style="text-align: center; padding: 5px;"><math>w1</math> y</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;"><math>W1</math> x</td><td style="text-align: center; padding: 5px;"><math>W1W1</math> Mata merah x x</td><td style="text-align: center; padding: 5px;"><math>w1w1</math> Mata merah x y</td></tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;"><math>w1</math> x</td><td style="text-align: center; padding: 5px;"><math>W1w1</math> Mata merah x x</td><td style="text-align: center; padding: 5px;"><math>w1w1</math> Mata putih x y</td></tr> </tbody> </table>	$\text{♂ }$ $\text{♀ }$	$W1$ x	$w1$ y	$W1$ x	$W1W1$ Mata merah x x	$w1w1$ Mata merah x y	$w1$ x	$W1w1$ Mata merah x x	$w1w1$ Mata putih x y
$\text{♂ }$ $\text{♀ }$	$W1$ x	$w1$ y								
$W1$ x	$W1W1$ Mata merah x x	$w1w1$ Mata merah x y								
$w1$ x	$W1w1$ Mata merah x x	$w1w1$ Mata putih x y								

Morgan menyusun hipotesis bahwa gen yang bertanggung jawab pada warna mata terdapat pada kromosom-X. Sementara itu, dalam kromosom-Y tidak terdapat gen yang bertanggung jawab atas warna mata. Faktor warna mata merah dominan terhadap faktor mata putih.

### b. Pautan Seks pada Manusia

Pada manusia, pautan seks dapat dibedakan pada gen resesif dengan gen dominan. Pautan seks pada gen resesif misalnya buta warna, hemofilia, anadontia. Sementara itu, pautan seks pada gen dominan misalnya gigi cokelat dan *hypertrichosis*. Hal ini akan dibahas dalam subbab hereditas pada manusia.

### c. Pautan Seks pada *Mammalia*

Pautan seks pada *Mammalia*, misalnya terjadi pada gen yang menentukan rambut kucing. Warna rambut kucing ditentukan oleh gen-gen berikut.

B = gen yang menentukan warna hitam.

b = gen yang menentukan warna kuning.

Bb = gen yang menentukan warna rambut belang tiga (hitam - kuning - putih) atau disebut **kaliko**. Perhatikan Gambar 5.10.

Kucing berambut belang tiga disebut kucing kaliko dan selalu betina. Perhatikan diagram persilangan berikut.



Sumber: Dokumentasi Penerbit

**Gambar 5.10**

Kucing kaliko

P :	$\text{♀ } B1 B 1$ x x	$\text{♂ } b1 \uparrow$ Kucing hitam
Gamet :	$B 1$ x	$b1 \uparrow$ ↓ x y
$F_1$ :	$\text{♀ } B1 b 1$ x x	dan $\text{♂ } B1 \uparrow$ Kucing kaliko $x y$

$P_2$	:	$\text{♀ } B1b1$ $x \quad x$ Kucing kaliko	$><$	$\text{♂ } B1t$ $x \quad y$ Kucing hitam
Gamet :		$B \quad 1 \quad b \quad 1$ $x \quad x$	$\downarrow$	$B \quad 1 \quad t$ $x \quad y$
$F_2$	:	$\text{♀ } B1B1 \quad \text{♀ } B1b1$ $x \quad x \quad x \quad x$ Hitam      kucing kaliko	$\text{♂ } B1t$ $x \quad x$ Hitam	$\text{♂ } b1t$ $x \quad y$ Kuning

#### d. Pautan Seks pada Ayam

Pautan seks pada ayam dengan penentuan jenis kelamin tipe ZO untuk ayam betina dan jantan ZZ. Warna bulu ayam ditentukan oleh gen-gen yang terpaut pada kromosom seks. Misalnya B = gen untuk bulu bergaris (blorok), b = gen untuk bulu polos.

Lakukan Tugas mandiri berikut agar Anda lebih memahami pautan seks pada ayam.



#### Tugas Mandiri

Perkawinan ayam jantan bulu polos dengan betina blorok menghasilkan keturunan berupa ayam jantan blorok dan betina bulu polos. Buatlah diagram persilangan pautan seks pada ayam tersebut.

### 5. Gen Letal

Gen letal adalah gen yang mengakibatkan kematian jika dalam keadaan homozigot. Gen letal dapat berupa homozigot dominan maupun resesif. Gen letal mengakibatkan keturunan menyimpang dari hukum Mendel, karena pada perkawinan monohibrid menghasilkan perbandingan fenotip 2 : 1, bukan 3 : 1. Contoh gen letal dominan sebagai berikut.

- Gen dominan C pada ayam. Ayam bergenotip CC letal (mati). Sementara itu, dalam keadaan heterozigot (Cc) menyebabkan ayam berkaki pendek disebut **redep (creeper)**. Ayam bergenotip cc bersifat normal.

$P$	:	$\text{♀ } Cc$ Creepers	$><$	$\text{♂ } Cc$ Creepers
			$\downarrow$	
$F_1$	:	1 CC → letal 2 Cc → Creeper 1 cc → normal		

Jadi, perbandingan fenotip keturunannya = creeper : normal = 2 : 1.

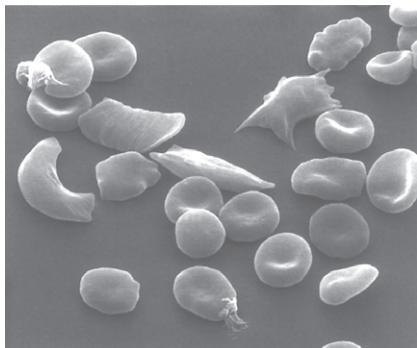
- Pada manusia terdapat gen B, yaitu gen penyebab jari pendek (*brakhidaktili*). Dalam keadaan heterozigot menyebabkan seseorang hanya mempunyai dua ruas jari. Sebaliknya, dalam keadaan homozigot menyebabkan seseorang dilahirkan tanpa jari tangan dan kaki, serta kerusakan rangka (*skeleton*) yang mengakibatkan kematian.

- c. Gen letal dominan Y pada tikus. Dalam keadaan homozigot dominan (YY) mengakibatkan tikus berpigmen kuning dan bersifat letal, sedangkan dalam keadaan homozigot resesif (yy) menghasilkan tikus normal dan berpigmen kelabu.

Contoh gen letal resesif sebagai berikut.

- a. Gen letal resesif g pada jagung yang merupakan pasangan alel dari gen dominan G. Individu yang memiliki gen resesif homozigot (gg) mempunyai daun lembaga yang tidak berklorofil. Akibatnya, kecambah akan mati.
- b. Gen letal resesif s yang mengakibatkan penyakit anemia sel sabit (*sickle cell*), yaitu sel darah merah penderita (manusia) berbentuk seperti sabit. Sel darah merah ini mempunyai kemampuan mengikat O<sub>2</sub> sangat rendah. Pertumbuhan individu homozigot resesif (ss) terhambat, jika mengalami infeksi dan peradangan dapat mengakibatkan kerusakan darah, bahkan dapat mengakibatkan kematian pada masa bayi atau anak-anak. Perhatikan Gambar 5.11.
- c. *Ichtyosis congenita*

Genotip homozigot resesif menyebabkan letal dan alelnya menentukan bayi normal. Penyakit ini terjadi karena bayi yang lahir kulitnya tebal, banyak luka berupa sobekan terutama pada lekukan-lekukan sehingga umumnya bayi mati dalam kandungan atau sewaktu dilahirkan.



Sumber: Biology for Advanced Level, Glenn and Susan Toole

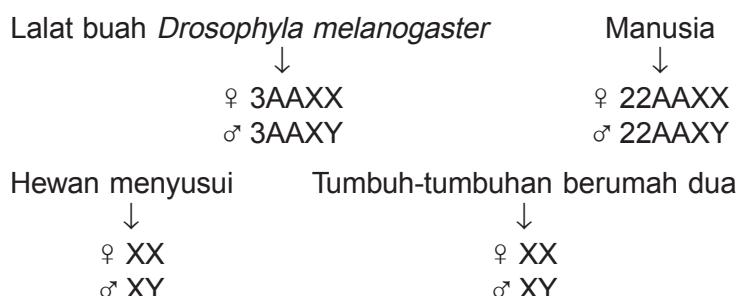
**Gambar 5.11**  
Sickle cell

### Berbagai Tipe Penentuan Jenis Kelamin

Cara menentukan jenis kelamin pada berbagai makhluk hidup tidak sama. Perhatikan Gambar 5.12 di halaman berikutnya. Beberapa tipe penentuan jenis kelamin makhluk hidup di antaranya sebagai berikut.

#### 1. Tipe XY

Cara penentuan jenis kelamin tipe XY, misalnya terdapat pada lalat buah, manusia, hewan menyusui, dan tumbuhan berumah dua.



#### 2. Tipe XO

Pada beberapa serangga anggota ordo *Orthoptera* dan *Heteroptera*, seperti belalang tidak memiliki kromosom-Y. Jadi, belalang jantan hanya memiliki sebuah kromosom-X saja, maka menjadi XO. Berbeda dengan lalat *Drosophila* jantan XO belalang jantan XO bersifat subur, sedangkan *Drosophila* jantan XO bersifat mandul. Belalang betina memiliki sepasang kromosom-X sehingga ditulis XX.

### 3. Tipe ZW

Pada beberapa jenis kupu-kupu, ikan, reptil, dan burung, memiliki kromosom kelamin yang berbeda. Kromosom kelamin pada hewan-hewan tersebut di atas yaitu **ZZ** dan **ZW**. ZZ merupakan hewan jantan. Sementara itu, ZW merupakan hewan betina. Jadi, semua spermatozoa mengandung kromosom kelamin Z. Sel telurnya ada kemungkinan mengandung kromosom kelamin Z dan ada kemungkinan mengandung kromosom kelamin W.

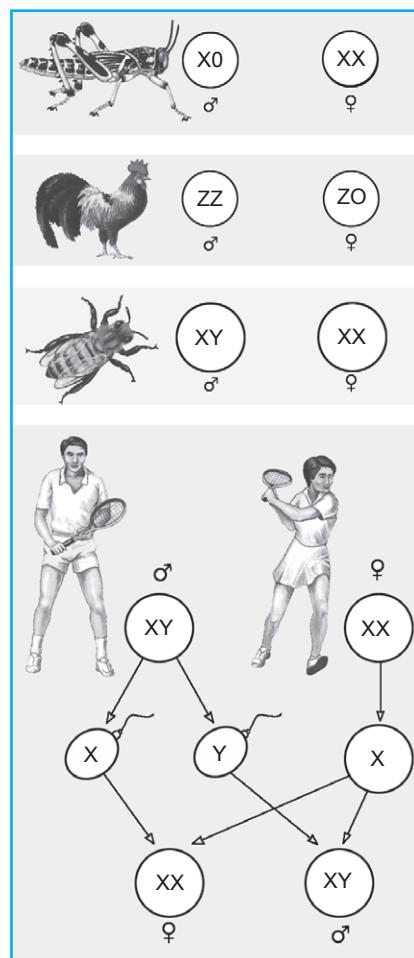
### 4. Tipe ZO

Susunan kromosom tipe ZO terdapat pada unggas (ayam, itik, dan sebagainya). Hewan betina hanya memiliki sebuah kromosom kelamin saja, tetapi bentuknya lain dengan yang dijumpai pada belalang. Kromosom kelamin ayam betina adalah **ZO** (heterogamet). Ayam jantan memiliki sepasang kromosom kelamin yang sama bentuknya sehingga tipe jenis kelaminnya **ZZ** (homogamet). Spermatozoa ayam hanya satu macam saja, yaitu membawa kromosom kelamin Z. Sel telurnya ada dua macam, mungkin membawa kromosom kelamin Z dan mungkin juga tidak memiliki kromosom kelamin sama sekali.

### 5. Tipe Haploid-Diploid

Serangga yang termasuk ordo *Hymenoptera* seperti lebah madu dan semut, penentuan jenis kelaminnya tidak berhubungan dengan kromosom kelamin. Lebah madu jantan terjadi karena partenogenesis, yaitu terbentuknya individu baru dari sel telur tanpa didahului pembuahan. Dengan demikian, lebah madu jantan bersifat haploid, yang memiliki 16 buah kromosom. Sel telur yang dibuahi oleh spermatozoa akan menghasilkan lebah madu betina yang berupa lebah ratu dan pekerja, masing-masing bersifat diploid dan memiliki 32 kromosom. Karena perbedaan tempat dan makanan, lebah ratu yang dihasilkan bersifat subur (fertil), sedangkan lebah pekerja mandul (steril).

Jelaslah bahwa jenis kelamin serangga-serangga tersebut tidak ditentukan oleh kromosom kelamin seperti yang lazim berlaku pada makhluk lainnya, tetapi tergantung dari sifat ploidi dari serangga itu. Serangga haploid berarti jantan, dan serangga diploid berarti betina.



Sumber: Biology, Campbell

Gambar 5.12

Tipe-tipe penentuan jenis kelamin

### Uji Kompetensi B

Jawablah soal-soal berikut.

1. Mengapa terjadi peristiwa gagal berpisah?
2. Dari perkawinan-perkawinan berikut ini, manakah yang menguntungkan?
  - a. ayam *creeper* >< ayam *creeper*
  - b. ayam *creeper* >< ayam normal
3. Bagaimanakah genotip dari kedua induknya dalam perkawinan walnut >< mawar, apabila dalam keturunan didapatkan perbandingan 3 mawar : 3 walnut : 1 ercis : 1 tunggal?
4. Apakah pautan seks itu? Berilah sebuah contoh peristiwa itu menggunakan diagram.

## C. Hereditas pada Manusia



### Tahukah Anda

**Tabel Sifat-Sifat Dominan atau Resesif yang Diturunkan**

Sifat-Sifat	Dominan	Resesif
rambut rambut bulu tubuh rambut warna kulit warna bola mata penglihatan penglihatan ukuran bibir ukuran mata pendengaran	keriting cokelat tua kasar botak (pada laki-laki) normal cokelat rabun jauh atau dekat normal lebar besar normal	lurus warna lain halus botak (pada wanita) albino biru atau abu-abu normal buta warna tipis sipit tulu

Ada beberapa penyakit yang dapat diturunkan dari orang tua kepada anak-anaknya misalnya asma, diabetes melitus, kelainan jantung, dan lain-lain. Para peneliti mengalami kesulitan untuk menyelidiki sifat keturunan pada manusia karena tidak mungkin mengawinkan pasangan satu dengan yang lain sekehendak hati. Berikut akan dipaparkan beberapa kendala yang dijumpai para peneliti dalam mempelajari genetika dengan objek manusia.

1. Jarang orang yang bersedia menjadi objek penelitian.
2. Umur atau daur hidup manusia panjang.
3. Jumlah keturunan manusia relatif sedikit.
4. Tidak dapat melalui percobaan karena norma tidak membenarkan.
5. Kondisi lingkungan tidak dapat dikontrol peneliti.
6. Peneliti mengalami kesulitan dalam meneliti dan mengontrol karakter yang berkaitan dengan kemauan.

Adanya kendala-kendala tersebut menyebabkan timbulnya cara lain dalam mempelajari genetika manusia. Beberapa cara yang umum dipergunakan sebagai berikut.

1. Menggunakan *pedigree* (peta silsilah) yaitu catatan sifat menurun dari generasi ke generasi secara beruntun.
2. Meneliti genetika pada hewan yang memiliki sifat atau karakter mirip dengan yang dimiliki manusia.
3. Mempelajari penurunan sifat pada anak kembar.

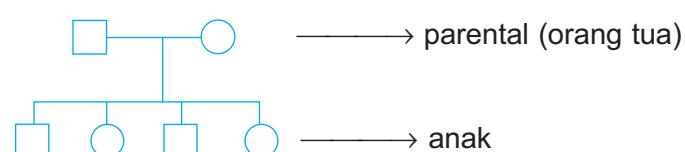
Sifat-sifat yang dimiliki orang tua diturunkan pada anaknya melalui pola pewarisan tertentu. Salah satu metode mempelajari penurunan sifat manusia yang banyak digunakan adalah dengan metode asal usul atau silsilah dalam bentuk *pedigree* (peta silsilah).

Simbol-simbol umum yang digunakan pada *pedigree* sebagai berikut.

= laki-laki

= wanita

atau → sifat (fenotip) yang diselidiki



→ pembawa sifat atau karier

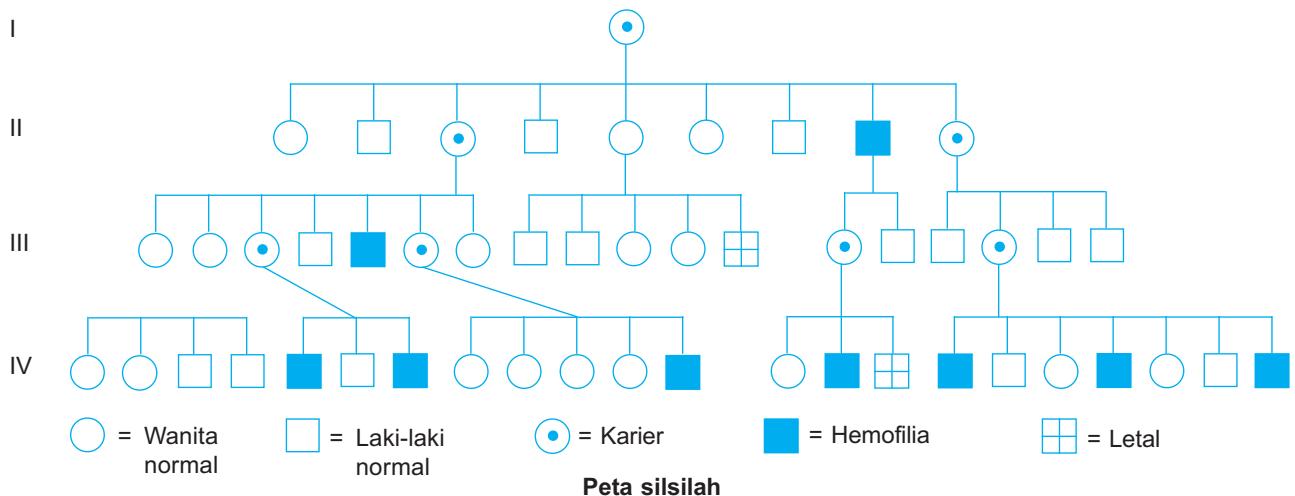


→ kembar biasa



Angka romawi (I, II, III, . . . ) menunjukkan keturunan atau generasi ke . . . .

Berikut merupakan contoh peta silsilah untuk menelusuri penyakit hemofilia.



Cacat dan penyakit menurun pada manusia dapat disebabkan oleh gen yang terdapat pada autosom atau oleh gen yang terdapat pada kromosom seks (gonosom). Ciri cacat atau penyakit menurun yaitu tidak menular, sulit atau bahkan tidak dapat disembuhkan, tetapi dapat diusahakan agar tidak terjadi pada generasi berikutnya, dan umumnya disebabkan oleh gen resesif.

## 1. Cacat atau Penyakit Menurun yang Tidak Terpaut Kromosom Seks

Beberapa cacat dan kelainan menurun yang tidak terpaut kromosom seks atau bersifat autosomal, antara lain albinisme, polidaktili, fenilketonuria, diabetes melitus, *thalassemia*, *dentinogenesis imperfecta*, retinal aplasia, katarak, dan botak.

### a. Albinisme

Albinisme mengakibatkan individu mengalami kelainan kulit tubuh yang disebut **albino**. Albino merupakan kelainan genetika yang ditandai adanya abnormalitas pigmentasi kulit dan organ tubuh lainnya serta penglihatan yang sangat peka terhadap cahaya. Abnormalitas pigmentasi ini terjadi karena tubuh tidak mampu mensintesis enzim yang diperlukan untuk mengubah asam amino tirosin menjadi 3,4 dihidro fenilalanin, yang selanjutnya akan diubah menjadi pigmen melanin. Akibatnya, rambut dan kulitnya berwarna putih atau bule.

Gen albino dikendalikan oleh gen resesif *a* dan gen *A* menentukan sifat kulit normal. Penderita albino mempunyai genotip *aa*, sedangkan orang normal mempunyai fenotip *AA* atau *Aa*.

Perhatikan beberapa peristiwa persilangan berikut.

- 1) Pria albino (*aa*) menikah dengan wanita normal homozigot (*AA*). Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	♀ AA (Normal)	><	♂ aa (Albino)
Gamet :	A	↓	a
F <sub>1</sub> :	Aa (Normal)		

Jadi, semua keturunan F<sub>1</sub> normal.

- 2) Wanita normal heterozigot (Aa) menikah dengan pria normal heterozigot. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ Aa}$	$><$	$\text{♂ Aa}$
	(Normal)		(Normal)
Gamet :	A, a	↓	A, a
F <sub>1</sub> :	AA Aa Aa aa	} normal } normal } normal = albino	

Jadi, keturunan F<sub>1</sub> terdapat rasio fenotip normal : albino = 3 : 1.

### b. Polidaktili

Polidaktili adalah kelainan genetika yang ditandai banyaknya jari tangan atau jari kaki melebihi normal, misalnya jari tangan atau jari kaki berjumlah enam buah. Polidaktili dapat terjadi pada kedua jari tangan (kanan dan kiri) atau salah satu saja. Perhatikan Gambar 5.13.

Polidaktili disebabkan oleh gen dominan P sehingga penderita polidaktili mempunyai genotip PP atau Pp. Genotip orang berjari normal yaitu pp. Bagaimanakah pewarisan gen polidaktili? Perhatikan diagram persilangan berikut.

Seorang wanita menikah dengan pria polidaktili. Kemungkinan genotip dan fenotip akan-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ pp}$	$><$	$\text{♂ Pp}$
	(Normal)		(Polidaktili)
Gamet :	p		P, p
F <sub>1</sub> :	Pp = polidaktili (50%) pp = normal (50%)		
P :	$\text{♀ pp}$	$><$	$\text{♂ PP}$
	(Normal)		(Polidaktili)
Gamet :	p		P
F <sub>1</sub> :	Pp = polidaktili (100%)		

### c. Fenilketonuria (FKU)

**Fenilketonuria** adalah kelainan genetika karena tubuh tidak mampu melakukan metabolisme fenilalanin. Akibatnya, fenilalanin tertimbun dalam darah dan dibuang bersama urine. Penderita fenilketonuria mengalami keterbelakangan mental dan ber-IQ rendah. Secara fisik penderita fenilketonuria bermata biru, berambut putih, dan kulitnya mirip albino.

Fenilketonuria disebabkan oleh gen resesif ph, sedangkan gen Ph menentukan sifat normal. Bagaimanakah cara pewarisan fenilketonuria? Perhatikan contoh berikut.

Pasangan suami istri normal heterozigot untuk fenilketonuria, kemungkinan genotip dan fenotip keturunannya (F<sub>1</sub>) sebagai berikut.



Sumber: Dokumentasi Penerbit

**Gambar 5.13**

Tangan penderita polidaktili

?

### Tahukah Anda

**Data Statistik Pengidap FKU**

Sampai saat ini, di Indonesia belum dapat diketahui jumlah pengidap FKU. Dari data statistik kasus FKU di Indonesia belum ditemukan. Namun, besar kemungkinan Indonesia memiliki cukup banyak pengidap. Sejauh ini di Cina terdapat 1 kasus FKU dari 16.500 kelahiran. Di Jepang terdapat 60 kasus FKU dari satu juta kelahiran.

P : ♀ Phph (Normal) >< ♂ Phph (Normal)

Gamet : Ph, ph Ph, ph

F<sub>1</sub> : 1 PhPh = normal (25%)

2 Phph = normal (50%)

1 phph = fenilketonuria (25%)

Jadi, rasio fenotip F<sub>1</sub> normal : fenilketonuria = 3 : 1.

#### d. Kemampuan Mengencap Phenylthiocarbamida (PTC)

*Phenylthiocarbamida* (PTC) yaitu suatu senyawa kimia yang rasanya pahit. Sebagian besar orang yang dapat merasakan rasa pahit PTC disebut **pengencap** atau **taster**, sedangkan sebagian lainnya yang tidak dapat merasakan pahit disebut **nontaster**. Gen T menentukan sifat perasa PTC dan alelnya gen t yang bersifat resesif menentukan seseorang tidak dapat merasakan PTC atau disebut **buta kecap**. Cara pewarisan perasa PTC dan bukan perasa PTC dapat dijelaskan dalam persilangan berikut.

- 1) Wanita perasa PTC (homozigotik) menikah dengan pria buta kecap, kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P : ♀ TT >< ♂ tt  
(Perasa PTC) (Buta kecap)  
Gamet : T ↓ t  
F<sub>1</sub> : Tt

Jadi, semua keturunannya dapat merasakan PTC.

- 2) Pasangan suami istri keduanya perasa PTC heterozigotik. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P : ♀ Tt >< ♂ Tt  
(Perasa PTC) (Perasa PTC)  
Gamet : T, t ↓ T, t  
F<sub>1</sub> : 1 TT } perasa PTC  
2 Tt }  
1 tt = buta kecap

Jadi, 75% anak-anaknya perasa PTC dan 25% buta kecap.

#### e. Thalassemia

*Thalassemia* merupakan kelainan genetika karena rendahnya pembentukan hemoglobin. Hal ini mengakibatkan kemampuan eritrosit untuk mengikat oksigen rendah. *Thalassemia* dikarenakan adanya kesalahan transkripsi mRNA dalam menerjemahkan kodon untuk asam amino globin.

*Thalassemia* disebabkan oleh gen dominan Th, sedangkan alelnya menentukan sifat normal. Penderita *thalassemia* bergenotip ThTh (*thalassemia major*) atau Thth (*thalassemia minor*). Penderita *thalassemia* mayor keadaannya lebih parah daripada *thalassemia* minor. Penderita *thalassemia* mayor biasanya bersifat letal (mati). Pewarisan *thalassemia* dijelaskan dalam contoh berikut.



#### Tahukah Anda

##### Perlunya Pemeriksaan Genetik Pranikah

Pembawa sifat penyakit *thalassemia* pada populasi masyarakat Indonesia berkisar antara 5–15%. Berarti, 10 dari 100 orang membawa sifat itu. Pada akhirnya, 25% kemungkinan anak yang lahir dari perkawinan antar-pembawa sifat itu akan mengidap *thalassemia major*. Pemeriksaan genetik pasangan yang akan menikah merupakan cara terbaik mencegah penurunan penyakit ini.

Seorang pria dan wanita sesama penderita *thalassemia* minor melakukan pernikahan. Bagaimanakah kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya?

P :	$\text{♀ Thth}$	$><$	$\text{♂ Thth}$
Gamet :	$\text{Th, th}$	$\downarrow$	$\text{Th, th}$
$F_1$ :	$1 \text{ ThTh}$	= <i>thalassemia major</i> (25%)	
	$2 \text{ Thth}$	= <i>thalassemia minor</i> (25%)	
	$1 \text{ thth}$	= normal (25%)	

#### f. *Dentinogenesis Imperfecta*

*Dentinogenesis imperfecta* merupakan salah satu kelainan pada gigi, yaitu keadaan tulang gigi berwarna putih seperti air susu. Kelainan itu disebabkan oleh gen *Dt*, sedangkan gigi normal ditentukan oleh gen resesif *dt*. Penurunan sifat atau kelainan tersebut dijelaskan dalam contoh berikut.

- 1) Seorang pria normal (*dtdt*) menikah dengan wanita penderita *dentinogenesis imperfecta*. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ DtDt}$	$><$	$\text{♂ dtdt}$
Gamet :	$\text{Dt}$	$\downarrow$	$\text{dt}$
$F_1$ :	$\text{Dtdt}$	= menderita <i>dentinogenesis imperfecta</i> (100%)	

- 2) Pasangan suami istri sesama penderita *dentinogenesis imperfecta* heterozigot melakukan pernikahan. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ Dtdt}$	$><$	$\text{♂ Dtdt}$
Gamet :	$\text{Dt, dt}$	$\downarrow$	$\text{Dt, dt}$
$F_1$ :	$1 \text{ DtDt}$	} menderita	
	$2 \text{ Dtdt}$	} <i>dentinogenesis imperfecta</i> (75%)	
	$1 \text{ dtDt}$	= normal (25%)	

#### g. Katarak

Katarak merupakan kerusakan pada kornea mata. Katarak dapat mengakibatkan kebutaan. Kelainan ini disebabkan oleh gen dominan *K*, sedangkan alel resesif *k* menentukan sifat mata normal. Bagaimana pewarisan penyakit katarak? Perhatikan contoh berikut.

- 1) Wanita normal menikah dengan pria penderita katarak. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ kk}$	$><$	$\text{♂ KK}$
	(Normal)		(Katarak)
Gamet :	$\text{k}$		$\text{K}$
$F_1$ :		$\downarrow$	
		$\text{Kk}$ (Katarak)	

- 2) Pasangan penderita katarak heterozigot menikah. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ Kk}$	$><$	$\text{♂ Kk}$
Gamet :	K, k	↓	K, k
F <sub>1</sub> :	1 KK 2 Kk 1 kk	} menderita katarak (75%) = normal (25%)	

#### h. Botak

Ekspresi gen penyebab botak dibatasi oleh jenis kelamin. Hal ini berarti dengan genotip yang sama jika terdapat pada jenis kelamin yang berbeda akan menimbulkan ekspresi fenotip yang berbeda. Kebotakan ditentukan oleh gen B dan gen b untuk kepala berambut (normal). Perhatikan Gambar 5.14. Orang yang bergenotip BB, baik perempuan maupun laki-laki akan mengalami kebotakan. Genotip Bb pada laki-laki mengakibatkan kebotakan, tetapi tidak untuk perempuan. Hal ini menunjukkan bahwa genotip Bb tidak mengakibatkan kebotakan pada perempuan. Mengapa demikian? Keadaan ini terjadi karena perempuan menghasilkan hormon estrogen yang mampu menghalangi kebotakan. Perhatikan pewarisan gen penyebab kebotakan berikut.

- 1) Misalnya seorang wanita normal menikah dengan pria botak homozigot. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ bb}$ (Normal)	$><$	$\text{♂ BB}$ (Botak)
Gamet :	b	↓	B
F <sub>1</sub> :	Bb (Pria botak, wanita normal)		

- 2) Pasangan suami istri bergenotip heterozigot. Kemungkinan genotip dan fenotip anak-anaknya sebagai berikut.

P :	$\text{♀ Bb}$ (Normal)	$><$	$\text{♂ Bb}$ (Botak)
Gamet :	B, b	↓	B, b
F <sub>1</sub> :	1 BB = botak (pria atau wanita) 2 Bb = pria botak, wanita normal 1 bb = normal (pria atau wanita)		



Sumber: Dokumentasi Penerbit

Gambar 5.14

Kebotakan ditentukan oleh gen B

## 2. Cacat dan Penyakit Menurun yang Terpaut Kromosom Seks

Gen-gen yang terangkai pada kromosom kelamin disebut juga **gen terangkai kelamin** (*sex linkage genes*). Cacat dan penyakit yang diakibatkan oleh gen terangkai kelamin oleh gen resesif, yaitu buta warna, hemofilia, anodontia, dan *hypertrichosis*. Sementara itu, cacat dan penyakit yang diakibatkan oleh gen dominan terangkai kelamin, yaitu gigi cokelat.

## a. Rangkai Kelamin oleh Gen Resesif

### 1) Buta Warna

Buta warna disebabkan oleh gen resesif c (dari kata *colour blind*) yang terpaut kromosom-X. Dengan demikian, wanita dapat normal homozigotik ( $X^cX^c$ ) atau normal heterozigotik ( $X^cX^C$ ) atau normal karier. Namun wanita buta warna ( $X^cX^c$ ) jarang dijumpai.

Perhatikan beberapa persilangan berikut.

- a) Wanita normal >< pria buta warna, semua keturunan  $F_1$  normal.

$$\begin{array}{lll} P & : & \text{♀ } X^cX^c \quad >< \quad \text{♂ } X^cY \\ \text{Gamet} & : & X^c \qquad \downarrow \qquad X^c, Y \\ F_1 & : & X^cX^c = \text{normal karier ♀} \\ & & X^cY = \text{normal ♂} \end{array}$$

- b) Wanita buta warna >< pria normal.

$$\begin{array}{lll} P & : & \text{♀ } X^cX^c \quad >< \quad \text{♂ } X^cY \\ \text{Gamet} & : & X^c \qquad \downarrow \qquad X^c, Y \\ F_1 & : & X^cX^c = \text{normal karier ♀} \\ & & X^cY = \text{buta warna ♂} \end{array}$$

Dari kedua persilangan di depan, tampak bahwa sifat ayah (normal) diwariskan kepada semua anak perempuan dan sifat ibu (buta warna) diwariskan kepada semua anak laki-lakinya. Cara pewarisan seperti ini dinamakan **pewarisan bersilang** (*criss-cross-inheritance*).

Buta warna dibedakan menjadi dua macam yaitu buta warna merah-hijau dan buta warna total. Pada buta warna total, penderita hanya mampu membedakan warna hitam dan putih. Sementara itu, buta warna merah-hijau dibagi menjadi dua yaitu **buta warna deutan**, jika yang rusak bagian mata yang peka terhadap warna hijau dan **buta warna protan** jika yang rusak adalah bagian mata yang peka terhadap warna merah.

### 2) Hemofilia

Seorang penderita hemofilia yang mengalami luka, darahnya sukar membeku. Pada orang normal, pembekuan darah memerlukan waktu  $\pm 5\text{-}7$  menit. Sementara itu, pada penderita hemofilia darah akan membeku dalam waktu 50 menit sampai 2 jam. Hal ini mengakibatkan penderita akan meninggal karena kehabisan darah.

Hemofilia disebabkan oleh gen resesif h yang terpaut pada kromosom-X. Gen H mengakibatkan sifat normal pada darah dan gen h merupakan penyebab hemofilia. Perhatikan Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5.6 Pewarisan Sifat Hemofilia

Jenis Kelamin	Normal	Hemofilia
Wanita	$X^HX^H$ , $X^HX^h$	$X^hX^h$ (letal) $X^hY$
Pria	$X^HY$	



### Tahukah Anda

#### Melakukan Tes Buta Warna

Tes buta warna (tes ishihara) dapat dilakukan di klinik atau rumah sakit yang memiliki buku untuk tes buta warna. Apabila tidak mengalami buta warna, Anda dapat melihat angka yang tersusun oleh lingkaran-lingkaran yang berwarna kontras dengan warna-warna lainnya. Selamat mencoba.

Wanita hemofilia tidak pernah dijumpai karena bersifat letal. Semua wanita normal dan beberapa di antaranya membawa sifat hemofilia.

Bagaimanakah cara pewarisan gen pembawa hemofilia? Perhatikan beberapa contoh persilangan berikut.

- a) Wanita normal homozigot dengan pria hemofilia.

$$P : \text{♀} X^H X^H \quad >< \quad \text{♂} X^h Y \\ \downarrow$$

$$F_1 : \begin{array}{l} X^H X^h = \text{normal karier (50\%)} \\ X^H Y = \text{normal (50\%)} \end{array}$$

- b) Wanita normal heterozigot dengan pria normal.

$$P : \text{♀} X^H X^h \quad >< \quad \text{♂} X^H Y \\ \downarrow$$

$$F_1 : \begin{array}{ll} X^H X^H & = \text{normal} \\ X^H X^h & = \text{normal karier} \\ X^H Y & = \text{normal} \\ X^h Y & = \text{hemofilia} \end{array} \left. \right\} (75\%)$$

$$X^h Y = \text{hemofilia} \quad = (25\%)$$

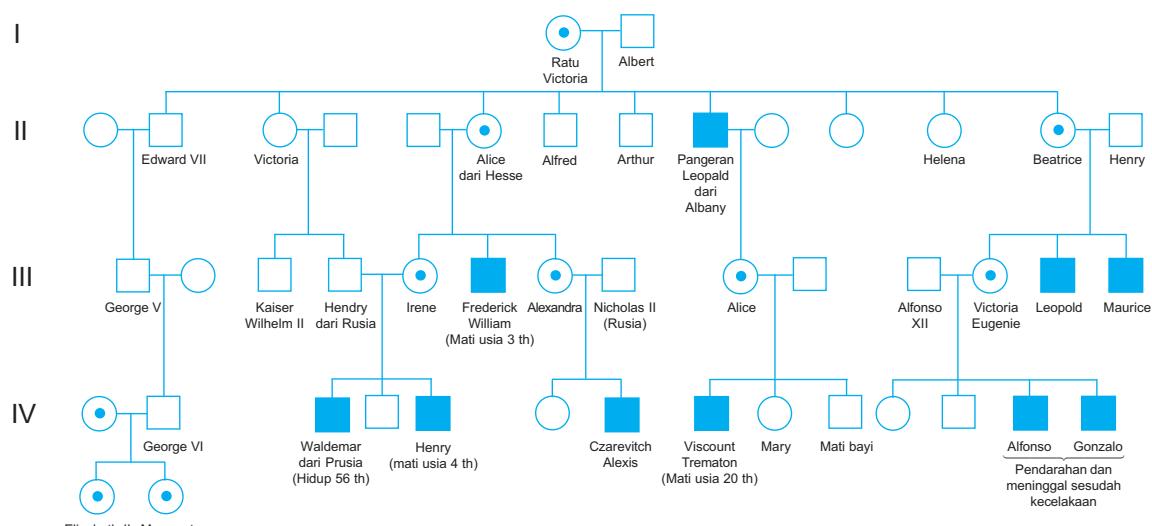
- c) Wanita normal heterozygous (karier) dengan pria hemofilia.

$$P : \text{♀} X^H X^h \quad >< \quad \text{♂} X^h Y \\ \downarrow$$

$$F_1 : \begin{array}{ll} X^H X^h & = \text{normal karier (25\%)} \\ X^h X^h & = \text{hemofilia (letal) (25\%)} \\ X^H Y & = \text{normal (25\%)} \\ X^h Y & = \text{hemofilia (25\%)} \end{array}$$

Ratu Victoria (Inggris) diduga pembawa (karier) gen penyebab hemofilia pada keluarga kerajaan Inggris. Perhatikan silsilah penurunan hemofilia pada keluarga Ratu Victoria berikut.

Peta riwayat hemofilia pada keluarga Raja Eropa yang diturunkan dari Ratu Victoria



Sekarang tidak ada lagi penderita hemofilia pada keluarga raja Inggris.

○ = Wanita

□ = Laki-Laki

● = Karier

■ = Menderita hemofilia

Lakukan Forum diskusi berikut untuk menguji kemampuan Anda dalam membaca peta riwayat hemofilia pada keluarga Raja Eropa.



### Forum Diskusi

Perhatikan sekali lagi silsilah Ratu Victoria Inggris di atas. Diskusikan dalam kelompok belajar Anda. Setelah itu, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Tuliskan genotip Ratu Victoria dan Pangeran Albert.
2. Adakah pria karier dan wanita hemofilia pada silsilah tersebut? Jelaskan alasan Anda.
3. Sebutkan wanita-wanita pembawa gen (karier) hemofilia pada silsilah tersebut.
4. Perhatikan pada generasi II yaitu perkawinan antara Putri Beatrice dengan Pangeran Henry. Tuliskan genotip putra-putrinya.
5. Perhatikan pada generasi III, Putri Alice menikah dengan pria normal. Bagaimanakah genotip putra-putrinya (generasi IV)?

### 3) *Anodontia*

Penderita anodontia tidak memiliki benih gigi dalam tulang rahangnya sehingga gigi tidak akan tumbuh. Anodontia disebabkan oleh gen resesif *a* yang terpaut pada kromosom-X, dan lebih sering dijumpai pada pria. Gen *A* menentukan pertumbuhan gigi normal dan alel resesif *a* menentukan anodontia.

### 4) *Hypertrichosis*

*Hypertrichosis* merupakan kelainan berupa tumbuhnya rambut pada bagian belakang telinga yang biasa dijumpai pada orang-orang Pakistan dan India. Kelainan ini disebabkan oleh gen resesif *h* yang terpaut pada kromosom Y sehingga faktor ini hanya diwariskan kepada anak laki-laki saja.

Apabila seorang gadis normal homozigot mendapat suami hypertrichosis, maka anak-anak yang dilahirkan akan mempunyai genotip sebagai berikut.

P :	♀ $H_1 H_1$	><	♂ $h_1 h_1$
	x x		x y
Gamet :	$H_1$		$h_1$
	x	↓	x y
$F_1$ :	$H_1 h_1$	and	$h_1 h_1$
	x x		x y
	♀ Normal		♂ Hypertrichosis

### b. Rangka Kelamin oleh Gen Dominan

Penderita gigi cokelat, mempunyai gigi berwarna cokelat dan mudah rusak karena kurang email. Penyakit ini disebabkan oleh gen dominan *B* yang terpaut kromosom-X. Alelnya yang bersifat resesif *b* menentukan gigi normal.

Seorang laki-laki bergigi cokelat menikah dengan perempuan bergigi normal akan menghasilkan keturunan bergigi cokelat pada semua anak perempuannya dan bergigi normal pada semua anak laki-lakinya. Perhatikan diagram berikut.

P :	$\text{♀ } b_1 b_1$	$><$	$\text{♂ } B_1 t$
	$x \quad x$		$x \quad y$
	Gigi normal		Gigi cokelat
Gamet :	$b \quad 1$		$B \quad 1 \quad t$
	$x$	$\downarrow$	$x \quad y$
$F_1$ :	$b \quad 1 \quad B \quad 1$	dan	$b \quad 1 \quad t$
	$x \quad x$		$x \quad y$
	♀ Gigi cokelat		♂ Gigi normal

Berdasarkan uraian di atas Anda sudah mengetahui bahwa untuk mendapatkan organisme keturunan yang baik atau unggul, Anda harus mengawinkan kedua induk yang memiliki sifat-sifat unggul pula.

Telah dijelaskan bahwa menjadikan manusia sebagai objek penelitian genetika merupakan hal tabu dan melanggar norma. Namun, kenyataannya di masyarakat terdapat individu yang mengalami kelainan genetik. Bagaimanakah cara mengatasinya? Ada dua cara mengatasi kelainan genetika pada manusia, yaitu melalui aplikasi eugenetika dan aplikasi eutenia.

1. Aplikasi eugenetika ini menyangkut perbaikan sosial melalui penggunaan hukum-hukum hereditas. Contoh beberapa saran yang diajukan oleh para ahli genetika, antara lain sebagai berikut.
  - a. Semua warga masyarakat terutama generasi muda, perlu mempelajari hukum-hukum hereditas dan memahami cara bekerjanya hukum hereditas dalam kehidupan.
  - b. Tidak kawin dengan orang yang mempunyai sakit jiwa, lemah ingatan seperti idiot, imbisil, atau penjahat berbakat.
  - c. Dianjurkan tetap memelihara kesehatan badan dan mental melalui latihan badan dan pendidikan.
  - d. Melakukan pemeriksaan terhadap kesehatan dan asal usul calon sebelum melakukan pernikahan.
2. Aplikasi Eutenia, menyangkut perbaikan sosial melalui pengubahan lingkungan yang lebih positif.

Contoh: perbaikan mutu pendidikan; perbaikan tempat tinggal; perbaikan menu makanan, misalnya harus memenuhi kriteria 4 sehat 5 sempurna; dan perbaikan lingkungan.



### Tahukah Anda

#### Perbandingan Hasil Persilangan Alami dan Buatan

Siapkanlah tumbuhan sejenis yang memiliki warna bunga beranekaragam. Biarkanlah sebagian tumbuhan bunga itu melakukan perkawinan secara alami, dan kawinkanlah sebagian yang lain. Pilihlah bunga-bunga yang Anda anggap memiliki keunggulan. Biarkan bunga-bunga berbiji dan tumbuhkanlah hingga tanaman hasil perkawinan tersebut berbunga. Bagaimanakah hasilnya?

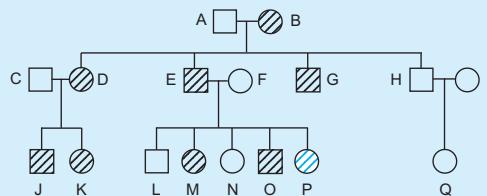


## Uji Kompetensi B

Jawablah soal-soal berikut.

- Seorang anak bergolongan darah A dan ibunya O. Bagaimanakah kemungkinan golongan darah ayahnya?
- 50% dari jumlah anak-anak suatu keluarga mempunyai golongan darah A, 25% bergolongan darah B, dan 25% bergolongan darah AB. Bagaimanakah kemungkinan fenotip dan genotip kedua orang tuanya?
- Mengapa perkawinan antarkeluarga dekat berakibat kurang baik?
- Dentinogenesis imperfecta* menyebabkan gigi berwarna cokelat. Kelainan ini ditentukan oleh

gen dominan D dan alelnya yang resesif menentukan gigi normal. Jika kotak-kotak yang diarsir pada diagram silsilah ini merupakan individu yang menderita kelainan tersebut, tentukan genotip dari tiap-tiap individu yang ada dalam diagram silsilah berikut.



- Apa yang dimaksud dengan *criss-cross inheritance*?



## Tugas Proyek

### Fenotip yang Ditentukan oleh Gen Terangkai Kromosom-X

Warna mata pada *Drosophila* ditentukan oleh gen terangkai kromosom-X. W adalah gen dominan untuk mata merah (normal), sedangkan w merupakan alelnya yang bersifat resesif dan menentukan warna putih.

#### A. Tujuan

Mengamati fenotip warna mata *Drosophila* yang terangkai kromosom-X.

#### B. Alat dan Bahan

- kertas
- botol
- lalat buah (*Drosophila*)
- pisang
- tapai

#### C. Cara Kerja

- Tangkaplah beberapa *Drosophila* dan bedakan jenis kelaminnya. *Drosophila* jantan berukuran lebih kecil dan abdomennya lima segmen. Sementara itu, abdomen *Drosophila* betina tujuh segmen. Ujung abdomen lalat jantan lebih membulat daripada ujung abdomen lalat betina yang tampak memanjang.
- Buatlah medium makanan untuk lalat buah *Drosophila* dengan menghaluskan pisang kemudian campur dengan tapai ketela.

Usahakan mediumnya agak padat sehingga larva tidak tenggelam dan mati.

- Masukkan medium ke dalam botol yang sudah disterilisasi. Masukkan kertas di tengah medium sebagai sarang *Drosophila* tersebut.
- Silangkan lalat jantan tipe liar (mata merah) dengan lalat betina bermata putih (mutan). Harap diingat bahwa gen untuk sifat ini terangkai kromosom-X, sehingga keturunannya harus dibedakan jenis kelaminnya. Biasanya *Drosophila* betina yang digunakan masih perawan, yaitu lalat betina berumur kira-kira 12 jam. Umur lalat jantan tidak menjadi soal. Pada setiap satu botol dimasukkan sepasang lalat yang organ seksnya berbeda.
- Selesai mengawinkan, tempelkan etiket pada botol dan bubuhkan tanggal, nama Anda, dan fenotip lalat yang dikawinkan itu. Amati lalat dalam botol percobaan Anda pada hari ketiga setelah mengawinkan lalat-lalat tersebut. Jika Anda berhasil mengawinkan lalat-lalat tersebut, maka dalam botol tersebut akan kelihatan adanya larva-larva. Jika larva belum tampak, berarti percobaan Anda gagal dan harus segera mengulangi dan mengadakan perkawinan lalat lagi.

6. Kira-kira dua minggu setelah mengawinkan lalat, akan diperoleh keturunan  $F_1$ . Perhatikanlah fenotipnya, pisahkan lalat tersebut berdasarkan organ seksnya, dan hitunglah. Tetapkan fenotip dan genotip dari lalat-lalat itu dan buatlah daftar sebagai berikut.

**Tabel 1.1 Hasil perkawinan lalat *Drosophila* dengan gen terangkai kromosom-X**  
Perkawinan parental (P)

Seks	Jumlah	Fenotip	Genotip
Jantan	...	...	...
Betina	...	...	...
Keturunan $F_1$			
Jantan	...	...	...
Betina	...	...	...

Pada lalat-lalat  $F_1$  biasanya tampak adanya pewarisan bersilang ("Criss cross inheritance") artinya sifat dari induk jantan diwariskan kepada anak-anak betina, sedangkan sifat dari betina diwariskan kepada anak-anak jantan.

7. Sesudah selesai membuat data itu, buatlah perkawinan antara lalat-lalat  $F_1$  dengan maksud untuk memperoleh keturunan  $F_2$ . Oleh karenanya, dipakailah 6 lalat jantan dan 6 lalat betina. Jangan lupa menempelkan etiket pada botol Anda dengan membubuhkan keterangan seperti sebelumnya. Letakkan botol itu dalam temperatur yang sesuai.

8. Setelah kira-kira 10 hari akan diperoleh lalat  $F_2$ . Sebaiknya usahakan sampai mendapatkan paling sedikit 100 lalat keturunan  $F_2$ .

9. Buatlah laporan dalam bentuk tabel sebagai berikut.

**Tabel 1.2 Perkawinan lalat-lalat dengan gen terangkai kromosom-X**

#### Perkawinan $F_1$

♀ Genotip : . . .	X ♂ Genotip : . . .
Fenotip : . . .	Fenotip : . . .

#### Keturunan $F_2$

Seks	Jumlah	Fenotip	Genotip
Jantan	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
Betina	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...

10. Buatlah kesimpulan dari hasil percobaan perkawinan ini.

#### D. Pelaporan

Buatlah laporan tertulis sesuai struktur penulisan ilmiah dari proyek ini. Kumpulkan laporan kepada bapak atau ibu guru Anda.



### Rangkuman

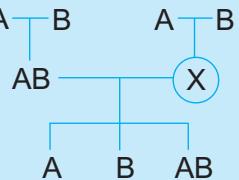
- Gregor Johann Mendel merupakan orang yang pertama kali melakukan penelitian mengenai penurunan sifat. Oleh karena itu, ia dinobatkan sebagai bapak genetika.
- Persilangan dua individu yang mempunyai sifat beda disebut hibrid. Terdapat beberapa macam hibrid di antaranya:
  - Monohibrid  
Suatu hibrid dengan satu sifat beda.
  - Dihibrid  
Suatu hibrid dengan dua sifat beda.
  - Trihibrid  
Suatu hibrid dengan tiga sifat beda.
- Individu dengan pasangan gen sama disebut homozigot.
- Individu dengan pasangan gen berbeda disebut heterozigot.
- Hukum I Mendel dikenal dengan Pemisahan Gen yang Sealel.
- Sifat dominan yang tidak muncul secara penuh disebut sifat intermediat.
- Hukum II Mendel dikenal dengan hukum Pengelompokan Gen secara Bebas.
- Perkawinan resiprokal merupakan perkawinan kebalikan dari yang semula dilakukan dan

- menghasilkan keturunan dengan perbandingan genotip yang sama.
9. Perkawinan balik (*back cross*) adalah perkawinan antara individu  $F_1$  dengan salah satu induknya.
  10. Uji silang (*test cross*) adalah perkawinan antara individu  $F_1$  (hibrid) dengan individu yang homozigot resesif.
  11. Alel adalah gen-gen yang terletak pada lokus yang sama dalam kromosom homolog.
  12. Penyimpangan semu hukum Mendel yaitu penyimpangan pola dasar yang dikemukakan dalam hukum Mendel, tetapi sebenarnya merupakan modifikasi hukum Mendel.
    - a. Epistasis dan hipostasis merupakan salah satu bentuk interaksi gen, dalam hal ini gen dominan mengalahkan gen dominan lainnya yang bukan sealel.
    - b. Kriptomeri adalah peristiwa gen dominan seolah-olah tersembunyi bila berada
  13. bersama dengan gen dominan lainnya, dan akan terlihat bila berdiri sendiri.
  - c. Atavisme merupakan peristiwa munculnya sifat baru pada  $F_1$  dan  $F_2$ .
  - d. Polimeri adalah pembastaran homozigot dengan banyak sifat beda yang berdiri sendiri-sendiri tetapi mempengaruhi bagian yang sama pada suatu organisme.
  - e. Gen komplementer adalah gen-gen yang berinteraksi dan saling melengkapi.
  14. Pautan gen merupakan peristiwa dua gen atau lebih yang terletak pada satu kromosom dan tidak dapat dipisahkan diri.
  15. Pindah silang merupakan peristiwa yang terjadi apabila ada pertukaran sebagian gen-gen suatu kromatid dengan gen-gen dari kromatid pasangan homolognya.



## Evaluasi

- A. *Pilihlah salah satu jawaban yang tepat.*
1. Gen yang terdapat pada lalat buah dan tidak dapat dipisahkan misalnya panjang sayap dan gen lebar abdomen akan mengalami peristiwa . . .
    - a. pautan gen
    - b. pindah silang
    - c. pautan seks
    - d. gen letal
    - e. determinasi seks
  2. Gen yang mungkin terjadi pada lalat buah betina yang mengalami pindah silang yaitu . . .
    - a.  $PpVv$
    - b.  $Ppvv$
    - c.  $ppVv$
    - d.  $ppvv$
    - e. betul semua
  3. Sifat keturunan pada manusia yang ditentukan oleh gen-gen yang tidak terpaut kromosom yaitu . . .
    - a. buta warna
    - b. warna mata
    - c. hemofilia
    - d. anodontia
    - e. hidrosefali
  4. Peta silsilah golongan darah.  
Individu X memiliki golongan darah . . .
    - a. O
    - b. AB
    - c. B homozigot
    - d. A homozigot
    - e. A atau B homozigot



5. Selain melalui pedigree, ada cara lain untuk mempelajari penurunan sifat pada manusia, yaitu . . .
- menggali fosil nenek moyang manusia
  - membandingkan embrio manusia dengan hewan
  - meneliti genetika hewan yang karakternya mirip manusia
  - mempelajari sifat pada anaknya yang lahir pertama kali
  - mempelajari penurunan sifat pada anak kembar
6. Polidaktili yaitu . . .
- kelainan genetika ditandai dengan kulit tubuh tidak mampu membentuk pigmen melanin
  - kelainan genetika karena rendahnya pembentukan hemoglobin
  - kelainan genetika ditandai banyaknya jari tangan atau kaki melebihi normal
  - kelainan pada gigi yang ditandai tulang gigi berwarna putih
  - kelainan genetika karena tubuh tak mampu melakukan metabolisme fenilalanin
7. Pada peristiwa interaksi beberapa pasangan alel (atavisme) menghasilkan rasio fenotip  $F_2$  sama seperti dihibrid biasa. Namun, digolongkan sebagai penyimpangan terhadap hukum Mendel karena . . .
- terdapat gen dominan yang saling menutupi
  - muncul sifat baru yang sebelumnya tidak dikenal
  - kedua induk merupakan galur murni
  - terjadi *inhibiting* gen
  - munculnya jenis pial yang bersifat intermediat
8. Jika diketahui terdapat gen  $\frac{ABCD}{abcd}$  maka peristiwa pindah silang dapat terjadi antara . . .
- gen A dengan gen B
  - gen b dengan gen c
  - gen B dengan gen C
  - gen B dengan gen c
  - gen c dengan gen d
9. Pernyataan berikut ini yang sesuai dengan metode determinasi seks lebah madu yaitu . . .
- Lebah betina (pekerja) mempunyai kromosom haploid.
  - Sel sperma mengandung kromosom haploid.
  - Lebah jantan mempunyai kromosom diploid.
  - Sel telur yang dibuahi akan menjadi lebah jantan.
  - Sel telur yang mengalami partenogenesis akan menjadi lebah pekerja.
10. Penyimpangan hukum Mendel yang memunculkan sifat baru pada  $F_1$  dan  $F_2$ , tetapi perbandingan fenotipnya tetap disebut . . .
- epistasis
  - polimeri
  - criptomeri
  - interaksi
  - komplementer
11. Jumlah kromosom tubuh pada belalang jantan yaitu . . .
- $22 + XX$
  - $22 + XY$
  - $22 + X$
  - $11 + X$
  - $11 + XY$
12. Suatu persilangan dihibrida menghasilkan  $F_2$  dengan rasio fenotip 12 : 3 : 1. Hal ini menunjukkan adanya penyimpangan hukum Mendel yaitu . . .
- criptomeri
  - interaksi
  - epistasi
  - dominasi
  - polimeri
13. Tanaman sejenis gandum berkulit hitam ( $HhKk$ ) disilangkan dengan yang berkulit kuning ( $hhKk$ ). Jika gen H = hitam epistasis terhadap gen k = kuning, perbandingan fenotip hitam : kuning : putih yang muncul pada keturunannya yaitu . . .
- 2 : 1 : 1
  - 2 : 2 : 1
  - 4 : 2 : 2
  - 4 : 3 : 1
  - 6 : 2 : 2

14. Perhatikan bagan persilangan peristiwa penyimpangan hukum Mendel berikut ini.

P: Hitam >< Hitam  
RrCc RrCc

$F_2$	$\sigma$	RC	Rc	rC	rc			
$\varphi$								
RC	RRCC	1	RRCc	2	RrCC	3	RrCc	4
Rc	RRCc	5	RRcc	6	RrCc	7	Rrcc	8
rC	RrCC	9	RrCc	10	rrCC	11	rrCc	12
rc	RrCc	13	Rrcc	14	rrCc	15	rrcc	16

Berdasarkan bagan di atas, fenotip yang berwarna hitam terdapat pada nomor . . . .

- a. 1, 2, 3, 4, 6, dan 8
  - b. 1, 2, 3, 5, 7, dan 9
  - c. 2, 3, 4, 6, 8, dan 10
  - d. 3, 5, 6, 8, 10, dan 12
  - e. 4, 6, 8, 12, 14, dan 16

15. *Drosophila* warna tubuh kelabu dan bentuk sayap merupakan pautan. Gamet yang dibentuk oleh *Drosophila* bergenotip BbVv yaitu . . . .

- a. BV dan Bv
  - b. BV dan bv
  - c. BV, bV, dan bv
  - d. Bv dan bv
  - e. By dan bV

16. Persilangan antara lalat buah mata merah sayap normal dengan mata ungu sayap keriput dihasilkan  $F_1$  yang bermata merah sayap normal. Kemudian diadakan uji silang antara  $F_1$  mata merah sayap normal heterozigotik dengan induk jantan resesif, diperoleh hasil sebagai berikut.

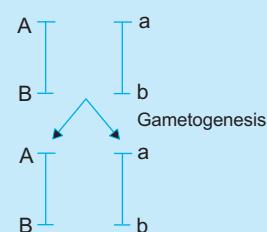
- 1) 864 mata merah sayap normal
  - 2) 876 mata ungu sayap keriput
  - 3) 36 mata merah sayap keriput
  - 4) 24 mata ungu sayap normal

Kedua gen tersebut terletak pada kromosom yang sama. Nilai pindah silangnya sebesar . . . .

- a. 0,3 %
  - b. 3,3 %
  - c. 6,7 %
  - d. 33,3 %
  - e. 66,7 %

17. Diagram di samping menunjukkan terjadinya peristiwa

- a. gagal berpisah
  - b. pindah silang
  - c. terpaut seks
  - d. ploidi
  - e. pautan



18. Hasil uji silang (*test cross*) *Drosophila melanogaster* tubuh abu-abu sayap panjang diperoleh hasil:

- 1) tubuh abu-abu sayap panjang 965 ekor,
  - 2) tubuh hitam sayap pendek 959 ekor,
  - 3) tubuh abu-abu sayap pendek 962 ekor, dan
  - 4) tubuh hitam sayap panjang 964 ekor.

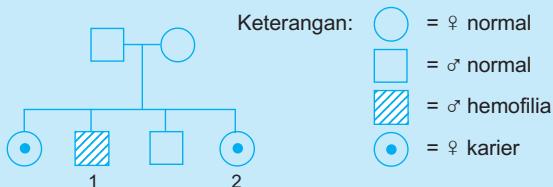
Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses yang terjadi yaitu . . .

- a. tidak ada pautan antara tubuh abu-abu dengan sayap panjang
  - b. terjadi pindah silang antara tubuh abu-abu dengan sayap panjang
  - c. terjadi gagal berpisah antara tubuh abu-abu dengan sayap panjang
  - d. tidak ada gen yang terpaut pada kromosom seks
  - e. tidak terjadi rekombinasi antara tubuh abu-abu dengan sayap panjang

19. Seorang wanita normal menikah dengan laki-laki penderita buta warna, anak wanitanya normal menikah dengan laki-laki normal. Cucu laki-laki yang mengalami buta warna sebanyak



20. Perhatikan diagram peta silsilah dari keluarga hemofilia.



Berdasarkan data di atas untuk nomor 1 dan nomor 2 berfenotip . . . .

- a. normal dan hemofilia
  - b. karier dan karier
  - c. hemofilia dan hemofilia
  - d. normal dan karier
  - e. hemofilia dan karier

B. Jawablah soal-soal berikut.

1. Bagaimana terjadinya *crossing over* (pindah silang)?
2. Genetika manusia sangat penting manfaatnya bagi manusia, tetapi mengapa dalam penelitiannya tidak pernah menggunakan manusia sebagai objek kajian?
3. Upaya apakah yang paling bijaksana untuk memperbaiki mutu generatif pada manusia?
4. Bagaimana cara mendapatkan bibit unggul pada hewan dan tumbuhan?
5. Cara-cara apakah yang paling bijaksana untuk ditempuh agar dapat menghindari penyakit yang bersifat menurun pada manusia?
6. Mengapa penyakit yang bersifat menurun sukar atau tidak bisa disembuhkan?
7. Bagaimanakah cara kita dapat mengetahui suatu sifat itu dominan atau resesif?
8. Mengapa terjadi peristiwa gagal berpisah?
9. Mengapa pada individu yang memiliki gen letal keturunannya menyimpang dari hukum Mendel?

10. Seorang anak terlahir dengan golongan darah O. Bagaimanakah kemungkinan terbesar golongan darah yang dippunyai kedua orang tuanya?

C. Berpikir kritis.

Di halaman Kampus Universitas Sebelas Maret Surakarta terdapat sebuah pohon yang cukup mengherankan dan menarik perhatian. Biji-bijinya yang jatuh dari pohon itu tumbuh di tanah, tetapi di antara tumbuhan baru ini selalu terdapat sejumlah tanaman yang daunnya putih (tidak berklorofil), sehingga tidak lama kemudian mati.

- a. Dapatkah Anda menerangkan keajaiban tersebut?
- b. Apakah ada kemungkinan melalui suatu percobaan untuk mendapatkan biji-biji dari pohon itu yang tidak akan menghasilkan tanaman berdaun putih? Andaikan jawaban Anda "dapat", bagaimanakah caranya?



## Refleksi

### Hukum Hereditas

Pelajari kembali

Jawablah beberapa pertanyaan berikut.

1. Apakah hereditas itu?
2. Sebutkan hukum Mendel I dan II.
3. Sebutkan penyimpangan hukum Mendel.
4. Apa manfaat mempelajari hereditas pada manusia?

Jawaban betul < 60%

Jawaban betul  $\geq 60\%$

