

# Hukum Mendel dan Pewarisan Sifat

Drs. Koesmadji Wirjosoemarto, M.Sc.



## PENDAHULUAN

---

Pengetahuan genetika telah berkembang pesat selama 60 tahun terakhir dalam usaha mengetahui peranan pewarisan sifat di antara organisme. Untuk memahami mekanisme pewarisan sifat dari induk kepada turunannya perlu diketahui mengenai fakta dan prinsip genetika.

Modul 1 ini menjadi dasar untuk memahami materi modul-modul selanjutnya. Pembahasan dalam Modul 1 ini, meliputi pengertian genetika dan manfaat pengetahuan genetika bagi manusia, cara mempelajari penurunan sifat dan penelitian yang dilakukan Mendel, Hukum Mendel dan penyimpangan semu Hukum Mendel. Di akhir modul dibahas pula tentang mekanisme sel, yaitu pembelahan mitosis, meiosis, dan proses fertilisasi, serta gametogenesis.

Setelah mempelajari Modul 1 ini, Anda diharapkan akan dapat menjelaskan pengertian genetika dan hukum Mendel, serta menjelaskan mekanisme pewarisan sifat, dan secara khusus setelah mempelajari modul ini diharapkan Anda dapat:

1. menjelaskan pengertian genetika;
2. menjelaskan cara mempelajari penurunan sifat;
3. menjelaskan penelitian Mendel;
4. menjelaskan Hukum Mendel;
5. menjelaskan penyimpangan Hukum Mendel;
6. menjelaskan mitosis;
7. menjelaskan meiosis;
8. menjelaskan gametogenesis dan fertilisasi.

**KEGIATAN BELAJAR 1****Pengertian Genetika dan Hukum Mendel**

☉ Pada kegiatan belajar berikut ini kita akan membahas pengertian genetika, cara mempelajari genetika, beberapa penelitian yang dilakukan Mendel hingga ditemukannya Hukum Mendel. Berdasarkan penelitian pada persilangan/pembastaran yang dilakukan orang lain ternyata ditemukan bahwa temuan Mendel itu tidak selalu benar. Oleh karenanya temuan Mendel ini selanjutnya disebut sebagai “penyimpangan semu hukum Mendel”.

**A. PENGERTIAN GENETIKA**

Keturunan hewan, tumbuhan maupun manusia, masing-masing akan mirip dengan induknya dari generasi ke generasi. Misalnya, kucing akan melahirkan anak kucing, pohon mangga akan menghasilkan pohon mangga lagi dan manusia akan melahirkan anak manusia. Pengamatan lebih dekat terhadap makhluk hidup tersebut di atas, akan jelas bahwa pada hewan di samping terdapat kemiripan, terdapat juga perpaduan antara induk dan turunannya. Kadang-kadang turunannya mempunyai sifat-sifat seperti induknya, dan ada pula yang mempunyai sifat yang berbeda atau lain dari induknya dan mungkin memperlihatkan sifat yang sama sekali baru pada keluarga tersebut.

Genetika merupakan cabang ilmu dari biologi yang mencoba menjelaskan persamaan dan perbedaan sifat yang diturunkan pada makhluk hidup. Selain itu, genetika juga mencoba menjawab pertanyaan yang berhubungan dengan apa yang diturunkan atau diwariskan dari induk kepada turunannya, bagaimana mekanisme materi genetika itu diturunkan, dan bagaimana peran materi genetika tersebut.

Terkait dengan hal tersebut, hingga saat ini genetika telah banyak menunjukkan manfaat yang besar bagi manusia, khususnya di bidang peternakan, pertanian, kedokteran, dan psikologi. Berikut adalah uraian tentang implementasi dan manfaat genetika pada bidang tersebut dalam kehidupan.

## 1. Penangkaran Tumbuhan dan Hewan

Manusia sangat dibantu oleh genetika dalam usahanya untuk meningkatkan mutu hewan peliharaan dan tanaman budidaya melalui penangkaran (*breeding*). Manusia telah berhasil memperoleh bibit unggul macam-macam hewan ternak yang mempunyai sifat lebih baik seperti menghasilkan susu lebih banyak, lebih baik mutu dagingnya atau yang tahan terhadap penyakit hewan dan sebagainya. Di bidang pertanian penangkaran dilakukan untuk memperoleh bibit unggul tanaman budidaya yang lebih baik, seperti memiliki sifat buah yang manis dan tidak berbiji, buah yang tidak cepat busuk, buah yang berdaging tebal, tahan terhadap hama tanaman, tahan terhadap kekeringan. Tanpa penggunaan prinsip-prinsip genetika pada bidang pertanian dalam usaha meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil panen, lahan yang tersedia saat ini tak akan mampu memberi makan penduduk yang selalu bertambah.

## 2. Kedokteran

Penerapan prinsip genetika pada manusia berhubungan erat dengan sifat-sifat menurun, terutama penyakit yang dapat diturunkan, seperti di bidang kedokteran telah berhasil mendiagnosis, mencegah, dan bahkan mencoba mengobati penyakit tersebut. Penyuluhan perkawinan telah banyak berjasa dalam memperkecil kemungkinan bertambahnya individu memperoleh penyakit keturunan dari suatu perkawinan di mana salah satu pasangannya memiliki kelainan atau penyakit keturunan, yang dapat menimbulkan kematian pada turunannya.

## B. CARA MEMPELAJARI GENETIKA

Dalam mempelajari penurunan sifat dari induk kepada turunannya, terdapat beberapa cara, antara lain berikut ini.

### 1. Percobaan Penangkaran (*Breeding*)

Percobaan ini, meliputi perkawinan silang antarorganisme yang memiliki sifat berbeda, yang kemudian diikuti dengan tabulasi turunan yang dihasilkan dan mencoba menganalisisnya untuk dapat menentukan pola penurunan sifat yang terjadi. Sebagai objek percobaan biasanya dipergunakan hewan atau tumbuhan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan apabila kita akan memilih organisme sebagai bahan percobaan, antara lain berikut ini.

a. *Mempunyai daur hidup pendek*

Seseorang akan memperoleh sedikit keterangan tentang penurunan sifat apabila mempergunakan gajah sebagai hewan percobaan karena daur hidup gajah cukup lama sehingga memerlukan waktu bertahun-tahun untuk mengetahui pewarisan sifatnya. Berbeda apabila kita mempergunakan tikus, yang sudah siap untuk kawin setelah enam minggu sejak kelahirannya.

b. *Mempunyai turunan yang cukup banyak*

Untuk menganalisis hasil turunan dari suatu perkawinan silang diperlukan analisis statistik. Hal tersebut dapat dilaksanakan dengan baik apabila tersedia turunan yang relatif banyak, agar hasil yang diperoleh cukup berarti.

c. *Mempunyai variasi sifat*

Tidaklah mungkin menyelidiki pewarisan sifat bulu hitam tikus, apabila semua tikus yang disilangkan berbulu hitam. Alangkah baiknya apabila dipergunakan tikus yang mempunyai bulu hitam dan putih atau mempunyai mata berwarna merah dan putih. Begitu juga dengan kacang kapri ada yang berwarna merah atau pun putih, ada yang bijinya kisut ataupun licin. Artinya, sebaiknya organisme yang digunakan dalam penangkaran mempunyai banyak sifat.

d. *Mudah dilakukan*

Syarat ini merupakan hal yang perlu dipertimbangkan apabila mempergunakan hewan sebagai percobaan, di mana faktor makanan dan tempat pemeliharaan menjadi masalah. Pada umumnya, pilihan jatuh pada hewan-hewan kecil sebagai bahan percobaan. Tikus telah banyak dipilih sebagai hewan percobaan karena memenuhi persyaratan tersebut. Selain itu, lalat buah (*Drosophila melanogaster*) telah banyak dipilih sebagai hewan percobaan yang memenuhi keempat persyaratan tersebut di atas. Lalat memiliki mata yang beraneka warna, begitu pula bentuk sayap dan bulu pada tubuhnya. Makanan dan pemeliharaannya pun cukup sederhana.

## 2. Silsilah Keluarga

Mempelajari penurunan sifat pada manusia agak sukar, lain halnya apabila dilakukan pada hewan atau tumbuhan. Kita tidak dapat memaksa orang yang berambut keriting kawin dengan yang berambut lurus, demi

penelitian penurunan sifat rambut keriting. Apabila memang terjadi perkawinan semacam itu, kita harus menunggu lama untuk mengetahui pola penurunan sifat tersebut kepada anak dan cucu mereka.

Dengan mempelajari silsilah keluarga, kita dapat mengetahui pola pewarisan sifat dari orang tua kepada turunannya. Dari catatan yang ada mungkin kita dapat mengetahui pola penurunan sifat, misalnya penyakit buta warna dan haemofilia. Dari sifat yang nampak pada morfologi manusia kita dapat menelusuri penurunan sifat tersebut. Sebagai contoh, rambut keriting, letak menempelnya telinga, ibu jari yang dapat melengkung ke belakang, lesung pipit di pipi, golongan darah. Mempelajari pola penurunan sifat dapat pula dilakukan terhadap anak kembar, kembar **fraternal** (kembar sesaudara, yaitu yang berasal dari zigot yang berbeda) atau kembar **identik** (yang berasal dari satu zigot).

### 3. Sitologi

Dengan mempelajari struktur sel, para ahli genetika dapat mempelajari sifat yang diturunkan. Kromosom sebagai pembawa sifat yang diturunkan dapat diketahui bentuk, jumlah, dan sifat-sifatnya. Beberapa pertanyaan sehubungan dengan hasil penangkaran, dapat dijelaskan melalui pengamatan sitologis.

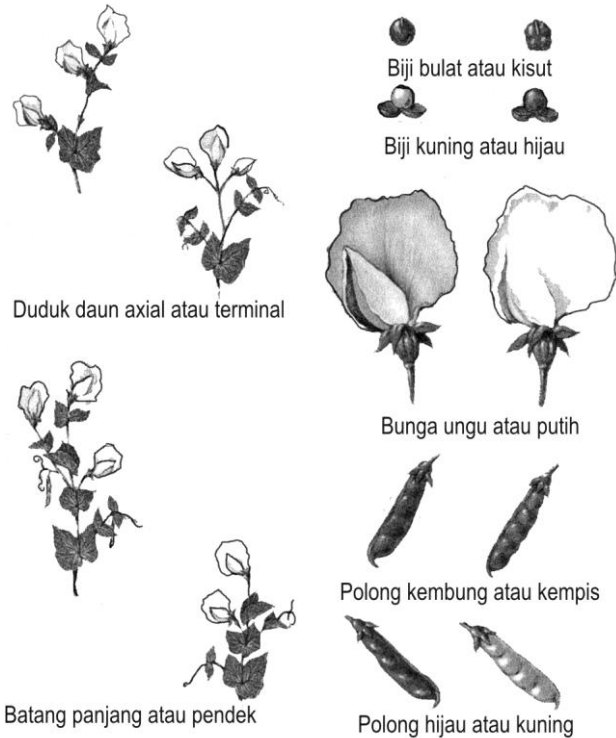
### 4. Analisis Biokimia

Melalui analisis biokimia dapat diketahui susunan kimia dari kromosom serta gen yang terdapat pada kromosom. Mengapa reaksi fisiologis pada tubuh seorang albino berbeda dengan pada orang yang normal, telah dapat dijawab melalui analisis biokimia. Ternyata pada orang albino tidak dijumpai suatu enzim yang memecah asam amino yang akan menghasilkan pigmen melanin yang membuat rambut, kulit, dan iris mata hitam.

## C. PENELITIAN MENDEL DAN HUKUM MENDEL

Nama lengkapnya ialah Gregor Mendel (1822–1884). Mendel mengadakan percobaan di kebunnya dengan tanaman kacang kapri. Di kebunnya Mendel mempunyai tanaman kacang kapri yang beraneka ragam, ada yang mempunyai bunga merah dan putih, ada yang tanamannya tinggi dan rendah, duduk bunga, warna dan bentuk polong berbeda (Gambar 1.1). Mendel memilih tanaman kapri yang berbunga merah dan putih untuk

mempelajari penurunan sifat bunga merah dan putih kacang kapri. Dia berulang kali mengadakan pembastaran antara tanaman kacang kapri bunga merah dengan tanaman kapri berbunga putih dan hasilnya dicatat dengan sangat teliti. Caranya dengan menyebarkan tepung sari bunga putih ke putik bunga merah.

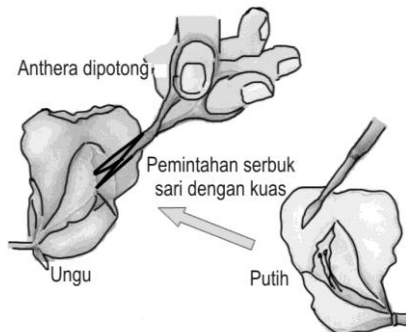


Gambar 1.1.  
Aneka Sifat Tanaman Kapri pada Penelitian Mendel

Secara terinci percobaan Mendel dengan tanaman kacang kapri dapat diterangkan sebagai berikut. Mula-mula Mendel memilih tanaman kacang kapri yang bunganya merah. Tanaman kapri bunga merah diserbuki sendiri, artinya serbuk sari bunga kapri merah diserbukkan pada putik bunga kapri merah yang sama. Setelah itu, ditunggu sampai kacang kapri menghasilkan buah. Setelah buah kacang kapri masak, kemudian diambil bijinya dan

ditanam lagi. Dari biji tersebut, akan diperoleh tanaman kapri yang berbunga merah. Kemudian diadakan penyerbukan sendiri dan setelah buah masak diambil bijinya dan ditanam lagi, dilakukan begitu berulang kali sehingga yakin bahwa tanaman kacang kapri tersebut akan selalu menghasilkan tanaman kapri yang berbunga merah saja. Demikian pula hal itu dilakukan pada tanaman kapri berbunga putih, berulang kali sehingga yakin bahwa tanaman kapri berbunga putih akan selalu menghasilkan tanaman kapri yang berbunga putih saja. Dikatakan bahwa telah diperoleh tanaman kacang kapri berbunga **merah galur murni**, dan tanaman kacang kapri berbunga **putih galur murni**. Selanjutnya, apa yang akan dilakukan pada percobaan itu?

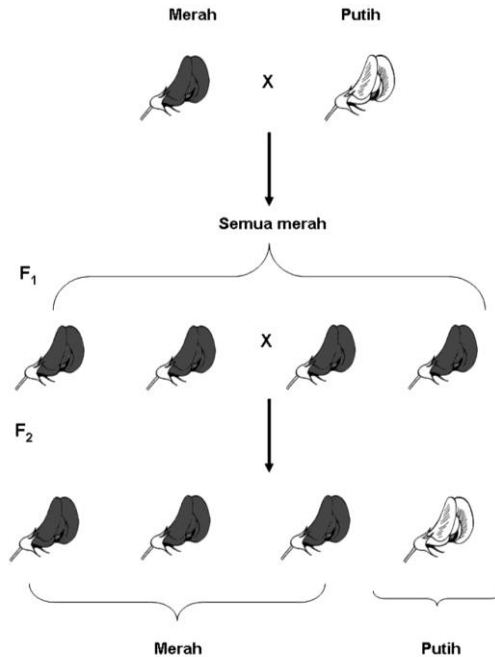
Caranya sebagai berikut: Sediakan tanaman kacang kapri berbunga merah dan kacang kapri berbunga putih. Kedua tanaman kacang kapri galur murni, yaitu yang berbunga merah dan yang berbunga putih dipergunakan sebagai **induk**, atau sebagai **Parental** (disingkat P). Serbuk sari dari bunga merah diletakkan pada kepala putik bunga putih. Ini artinya telah diadakan **penyerbukan silang** dengan **satu sifat beda** (Gambar 1.2) yang dikenal dengan istilah **monohibrid**, yaitu terkait dengan *warna bunga*.



Gambar 1.2.  
Contoh Penyerbukan Silang antara  
Tanaman Bunga Ungu dan Putih

Setelah diadakan penyerbukan, tunggu beberapa bulan sampai muncul buah pada tanaman kacang kapri bunga merah atau pada tanaman yang berbunga putih. Setelah buah masak, bijinya diambil dan biji-biji tadi ditanam lagi. Tunggu beberapa minggu sampai tanaman kacang kapri yang tumbuh dari biji tersebut berbunga. Tanaman kacang kapri hasil pembastaran ini disebut sebagai **turunan ke-1**, atau sebagai **Filial ke-1** (disingkat **F<sub>1</sub>**). Amati warna-warna bunga yang terjadi. Warna bunga apa saja yang timbul pada tanaman kacang kapri **F<sub>1</sub>** tersebut? Mendel mencatat bunga yang timbul, yaitu semua bunganya berwarna merah pada tanaman kacang kapri **F<sub>1</sub>**.

Apa kesimpulan Mendel dari hasil percobaannya? Mendel menyimpulkan bahwa *sifat merah* dari bunga disebut **sifat dominan** terhadap *sifat putih* dari bunga tanaman kacang kapri. Artinya, sifat merah akan "mengalahkan" sifat putih bunga pada tanaman kacang kapri sehingga sifat putih "tertutup" oleh sifat merah sehingga sifat putih tidak tampak (Gambar 1.3).



Gambar 1.3.

Pembastaran antara tanaman kacang kapri bunga merah dan bunga putih menghasilkan turunan F<sub>1</sub> yang semuanya berbunga merah, dan turunan F<sub>2</sub> yang berbunga merah 3 bagian dan berbunga putih 1 bagian atau 3:1.

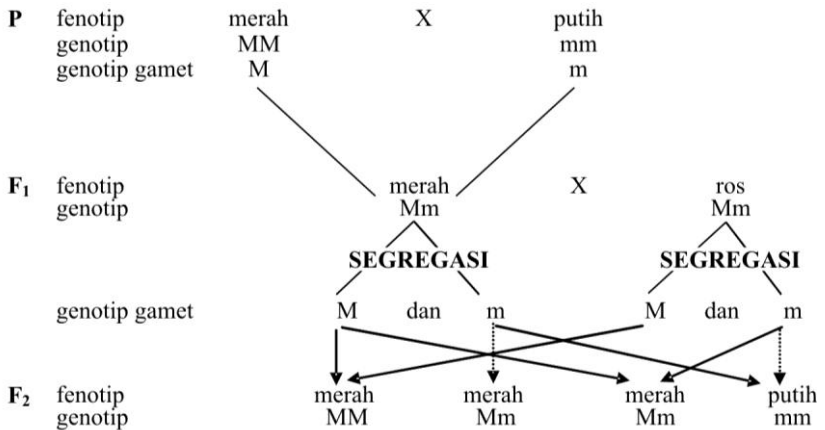
Sifat putih yang seolah-olah tertutup atau kalah oleh sifat merah, disebut sebagai **sifat resesif**. Sifat merah atau putih dari bunga, atau sifat bulat atau lonjong dari bentuk biji, selanjutnya kita sebut sebagai **gen**. Pada waktu itu Mendel menyebut sifat tanaman seperti warna bunga, bentuk biji, tinggi rendahnya tanaman sebagai **sifat** atau **faktor** saja. Penjelasan tentang apa itu gen secara mendalam akan Anda pelajari pada bagian lain dari modul ini.

Selanjutnya, apa yang dilakukan Mendel? Mendel membastarkan tanaman kacang kapri F<sub>1</sub> dengan tanaman kacang kapri F<sub>1</sub> lainnya. Jadi, di sini tanaman kacang kapri F<sub>1</sub> yang berbunga merah dibastarkan dengan kacang kapri F<sub>1</sub> yang berbunga merah juga. Hasilnya bagaimana? Ternyata turunan yang dihasilkan atau **turunan ke-2** atau **Filial ke-2** (disingkat F<sub>2</sub>), memberikan hasil tanaman kacang kapri yang berbunga merah dan putih dengan perbandingan 3:1. Artinya, dari biji hasil pembastaran atau



penyilangan setelah ditanam akan menghasilkan 3 bagian tanaman kacang kapri yang berbunga merah dan 1 bagian tanaman kacang kapri berbunga putih (Gambar 1.3). Ini berarti apabila dihasilkan 100 tanaman kacang kapri pada turunan  $F_2$  maka akan dihasilkan 75 tanaman kacang kapri yang berbunga merah, dan 25 tanaman kacang kapri yang berbunga putih pada turunan  $F_2$  tersebut.

Bagaimana genotip dari turunan  $F_2$  tersebut? Untuk mengetahui genotip tanaman  $F_2$  tersebut pelajari Gambar 1.4 di bawah ini.



Gambar 1.4.

Pembastaran tanaman kacang kapri berbunga merah dengan kacang kapri yang berbunga putih, akan menghasilkan turunan  $F_2$  dengan tanaman kacang kapri berbunga merah 3 bagian, dan yang berbunga putih 1 bagian (3:1), dilihat dari fenotip dan genotipnya.

Umpamakan sifat atau gen bunga merah kita namakan **M**, dan sifat atau gen bunga putih kita namakan **m**. Ada perjanjian cara penulisan simbol huruf bagi gen yang bersifat dominan dan yang resesif. Gen yang dominan ditulis dengan huruf kapital (huruf besar), sedangkan yang bersifat resesif ditulis dengan simbol huruf kecil. Maka tanaman yang berbunga merah galur murni mempunyai genotip **MM**, dan yang berbunga putih galur murni mempunyai genotip **mm**. Gen-gen tadi juga berpasangan atau memiliki alel. Oleh karena itu, gen pada tanaman kacang kapri selalu ditulis dengan simbol huruf secara lengkap, misalnya **MM**, **Mm**, dan **mm**.

Seperti telah diketahui bahwa bunga akan menghasilkan *serbuk sari*, yaitu sel kelamin (disebut *gamet*) jantan dari bunga. Bunga akan menghasilkan sel kelamin (*gamet*) betina yang disebut *sel telur*, dan terdapat dalam putik bunga. Serbuk sari bunga warna merah mengandung separuh jumlah gen yang dimiliki sel tanaman kacang kapri (MM), yaitu memiliki gen M, dan sel telurnya mengandung gen M; sedangkan serbuk sari bunga warna putih akan mengandung gen m, dan sel telurnya mengandung gen m (lihat dan pelajari bagan Gambar 1.4).

Agar Anda dapat mempelajari dan memahami bagan pada Gambar 1.3. dan 1.4. maka terlebih dahulu diperkenalkan beberapa istilah yang dipakai pada genetika. Kalau kita lihat tanaman kacang kapri berbunga merah atau berbunga putih maka *apa yang dapat dilihat* itu disebut sebagai **fenotip**. Apa fenotip tanaman kacang kapri yang berbunga merah itu? Fenotipnya ialah merah. Apa fenotip tanaman kacang kapri yang berbunga putih? Fenotipnya ialah putih. Begitu pula hal ini berlaku untuk fenotip rambut keriting pada orang yang mempunyai rambut keriting atau fenotip hidung mancung untuk orang berhidung mancung.

Jadi, pengertian fenotip berkaitan dengan sifat luar tanaman atau makhluk hidup **sebagai ekspresi gen** yang dimilikinya.

Istilah lain yang perlu diketahui oleh Anda ialah istilah **genotip**. Tadi dikatakan bahwa tanaman kacang kapri yang berbunga merah mempunyai gen MM. Gen M inilah yang menyebabkan tanaman tersebut menjadi berwarna merah bunganya. Susunan gen pada tanaman kacang kapri berbunga merah adalah MM dan ini dikatakan bahwa genotip tanaman kacang kapri berbunga merah mempunyai genotip MM. Dengan demikian, kalau bicara mengenai *genotip* maka kita berbicara **susunan gen yang terdapat pada kromosom sel tanaman** atau makhluk hidup lain dan sudah barang tentu tidak tampak dari luar. Akan tetapi, perlu diingat bahwa tidak berarti pada kromosom tanaman tersebut ada gen bertuliskan MM atau mm. Huruf-huruf ini hanya dipergunakan sebagai simbol untuk menerangkan bahwa gen yang dimiliki itu gen tentang warna bunga.

Mari kita pelajari bersama Gambar 1.4. Pembastaran pada Gambar 1.4 ini merupakan pembastaran dengan melihat *fenotipnya* dan melihat *genotipnya*, yaitu bunga merah dan putih. Kacang kapri bunga merah genotipnya MM, dan kacang kapri bunga putih genotipnya mm. Selanjutnya, kacang kapri bunga merah akan menghasilkan sel kelamin dengan gen M, dan kacang kapri bunga putih akan menghasilkan sel kelamin dengan gen m.

Pembastaran ini akan menghasilkan turunan  $F_1$  berupa kacang kapri berwarna merah dengan genotip Mm. Di sini kelihatan ada sifat dominan gen M terhadap gen m sehingga semua kacang kapri yang dihasilkan akan berbunga merah meskipun genotipnya Mm. Jadi, pengaruh m (putih) tidak tampak karena "tertutup" atau "kalah" oleh gen M (merah).

Selanjutnya, turunan  $F_1$  akan dibastarkan dengan turunan  $F_1$  lainnya, yaitu kacang kapri bunga merah (Mm) dengan kacang kapri bunga merah (Mm) maka akan dihasilkan turunan  $F_2$  yang terdiri dari 3 bagian kacang kapri bunga merah, dengan genotip MM, Mm, dan Mm, serta 1 bagian kacang kapri berbunga putih dengan genotip mm.

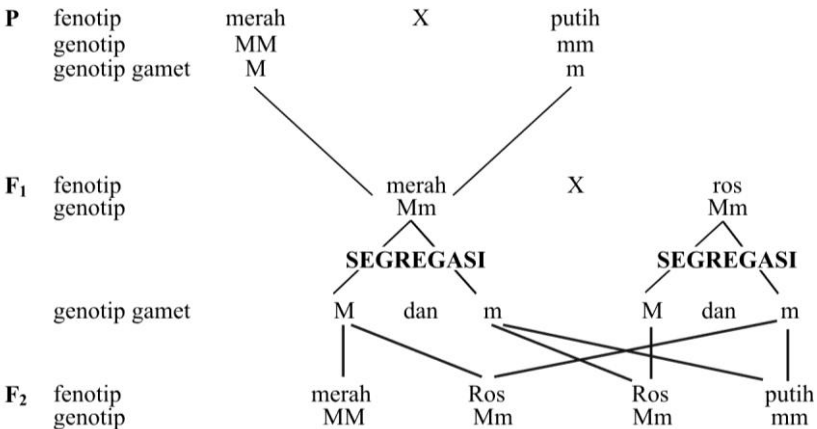
Apa yang dapat disimpulkan dari pembastaran yang dilakukan Mendel? Beberapa kesimpulan dari percobaan Mendel adalah sebagai berikut.

1. **Gen dominan (M)** akan "mengalahkan pengaruh" **gen resesif (m)** sehingga tanaman kacang kapri turunan  $F_1$  dengan genotip Mm akan berbunga merah. Ini disebut sebagai **prinsip dominan**.
2. Turunan  $F_1$  dengan genotip Mm akan menghasilkan dua macam gamet yang bergenotip M dan m dalam jumlah yang sama. Ini artinya kalau dihasilkan 100 serbuk sari maka 50 serbuk sari akan bergenotip M, dan sisanya 50 serbuk akan bergenotip m. Begitu pula jika dihasilkan 100 sel telur maka yang 50 akan bergenotip M, dan yang 50 lagi akan bergenotip m. Dengan kata lain, akan menghasilkan 50% serbuk sari bergenotip M dan 50% bergenotip m; dan 50% sel telur bergenotip M dan 50% bergenotip m. Hal ini terjadi karena pada waktu pembentukan sel kelamin (gamet), pasangan gen Mm akan mengadakan pemisahan (disebut juga **segregasi**) sehingga masing-masing sel kelamin yang terbentuk memperoleh hanya satu gen saja, M atau m. Peristiwa pemisahan ini selanjutnya disebut sebagai **prinsip segregasi** atau **Hukum Mendel I**.
3. Apabila diadakan pembastaran antara tanaman turunan  $F_1$  dengan tanaman  $F_1$  lainnya maka akan terjadi turunan  $F_2$  yang terdiri dari 3 bagian (75%) bunga merah dan 1 bagian (25%) bunga putih. Secara bagan dapat digambarkan dengan *papan catur* (papan Punnet) sebagai berikut:

		Serbuk sari	
		50% M	50% m
Sel telur	50% M	25% MM merah	25% Mm merah
	50% m	25% Mm merah	25% mm putih

Marilah kita lihat hasil percobaan Mendel yang lain. Mendel membastarkan tanaman kacang kapri bunga merah dengan tanaman kacang kapri bunga putih. Turunan F<sub>1</sub> diperoleh tanaman kacang kapri berbunga *ros* (merah muda), bukan bunga berwarna merah.

Hal ini terjadi karena gen merah (M) mempunyai pengaruh sama dengan gen putih (m). Jadi di sini tidak ada gen yang dominan, yang terjadi pada turunan F<sub>1</sub> di sini ialah turunan yang mempunyai **sifat intermediet**, yaitu mempunyai **sifat antara** dari kedua induknya. Untuk memahami sifat tentang intermediet pelajari Gambar 1.5. berikut:



Gambar 1.5.

Pembastaran tanaman kacang kapri berbunga merah dengan kacang kapri berbunga putih, akan menghasilkan turunan F<sub>2</sub> dengan tanaman kacang kapri berbunga merah 1 bagian, yang berbunga ros 2 bagian dan yang berbunga putih 1 bagian atau dengan perbandingan = 1:2:1. Di sini ada sifat intermediet.

Turunan  $F_1$  mempunyai fenotip ros, dengan genotip Mm. Kemudian turunan  $F_1$  dibastarkan dengan turunan  $F_1$  lainnya.

Turunan  $F_1$  (Mm) akan menghasilkan gamet dengan genotip M dan m. Hasil pembastaran akan diperoleh turunan  $F_2 = 1$  bagian bunga merah (MM), 2 bagian bunga ros (Mm), dan 1 bagian bunga putih (mm). Atau dapat dikatakan akan diperoleh perbandingan pada turunan  $F_2 = 1 : 2 : 1$ .

Secara bagan dapat digambar sebagai berikut:

		Serbuk sari	
		50% M	50% m
Sel telur	50% M	25% MM merah	25% Mm ros
	50% m	25% Mm ros	25% mm putih

Pembastaran yang dilakukan oleh Mendel seperti dibicarakan di atas ialah pembastaran dengan **satu sifat beda** atau disebut sebagai pembastaran **monohibrid**. Pembastaran ini hanya melibatkan satu sifat, misalnya hanya sifat warna bunga. Selanjutnya Mendel melakukan percobaan lain, yaitu melibatkan **dua sifat beda** atau disebut sebagai pembastaran **dihibrid**. Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui apakah prinsip-prinsip pada pembastaran monohibrid juga berlaku pada dihibrid. Apa yang Mendel lakukan? Mendel membastarkan tanaman kacang kapri biji bulat warna kuning (selanjutnya disingkat bulat-kuning) galur murni, dengan kacang kapri biji kisut warna hijau (disingkat kisut-hijau), juga galur murni. Diperoleh turunan  $F_1$  dibastarkan dengan turunan  $F_1$  lainnya dan menghasilkan turunan  $F_2$  sebagai berikut:

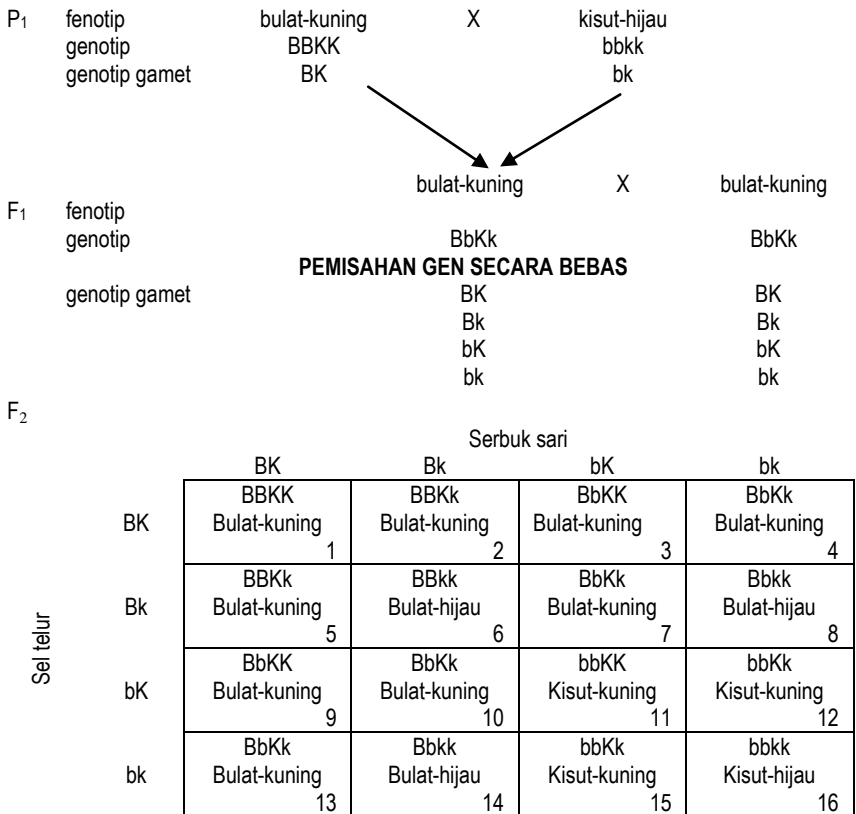
- 315 bulat-kuning
- 108 bulat-hijau
- 101 kisut-kuning
- 32 kisut hijau

Hal yang menarik dari hasil pembastaran ini ialah timbul dua jenis biji baru yang sebelumnya tidak dimiliki oleh P (induk) atau oleh turunan  $F_1$ . Kedua jenis biji ini adalah *bulat-hijau* dan *kisut-kuning*. Jenis baru ini, lain dari P maupun dari  $F_1$ , disebut sebagai **kombinasi baru** atau **rekombinasi**. Mengapa disebut sebagai rekombinasi? Pertanyaan ini dapat dijawab dengan

melihat susunan gen dari kedua jenis biji tersebut. Susunan gennya lain dengan yang telah diketahui, yaitu pada P maupun pada  $F_1$ . Jadi, di sini terjadi susunan baru dari gen. Selain itu, diperoleh macam biji seperti macam biji induknya (P), yaitu bulat-kuning dan kisut-hijau, yang selanjutnya disebut sebagai **kombinasi parental**. Disebut demikian karena fenotipnya sama dengan induk yang dibastarkan.

Pembastaran dihibrid dapat ditulis seperti pada Gambar 1.6 berikut ini. Pada pembentukan gamet turunan  $F_1$ , Mendel menyatakan bahwa sebuah gamet hanya akan mempunyai salah satu gen dari sepasang gen sehingga sebuah gamet hanya akan mempunyai B (gen bulat) atau b (gen kisut) dan K (gen kuning) atau k (gen hijau). Empat macam gamet akan dihasilkan dalam jumlah yang sama, yaitu BK, Bk, bK dan bk.

Dari turunan  $F_2$  terdapat 16 kemungkinan kombinasi turunan yang terdiri dari: 9 bagian bulat-kuning, 3 bagian bulat-hijau, 3 bagian kisut-kuning dan 1 bagian kisut-hijau sehingga dapat dikatakan bahwa perbandingan turunan yang diperoleh pada  $F_2$  adalah = 9:3:3:1. Perbandingan ini dapat ditulis dengan cara lain, yaitu  $9/16 : 3/16 : 3/16 : 1/16$ .



Gambar 1.6.

Pembastaran antara tanaman kacang kapri biji bulat-kuning dengan tanaman kacang kapri biji kisut-hijau akan menghasilkan turunan F<sub>2</sub> dengan perbandingan 9:3:3:1.

Dari pembastaran dihibrid yang dilakukan Mendel tersebut di atas dapat dibuat kesimpulan bahwa:

- a. Pada pembastaran dihibrid, yaitu yang melibatkan dua sifat beda, setiap pasang gen dari turunan F<sub>1</sub> akan memisah dan mengelompok secara bebas menuju gamet pada waktu pembentukan gamet. Karena ada peristiwa pemisahan dan pengelompokan secara bebas ini pada turunan F<sub>1</sub>, dengan genotip BbKk akan dihasilkan 4 macam gamet, yaitu BK, Bk, bK dan bk, yang masing-masing mempunyai perbandingan ¼ : ¼ : ¼ : ¼. Selanjutnya pemisahan secara bebas ini disebut Mendel sebagai

**prinsip pemisahan gen secara bebas** atau disebut sebagai **Prinsip/Hukum Mendel II**. Untuk memahami prinsip ini perhatikan papan catur (Gambar 1.6.).

- b. Karena dari turunan  $F_1$  dihasilkan 4 macam gamet maka turunan  $F_2$  akan dihasilkan 16 kemungkinan macam genotip atau kombinasi, seperti yang tampak pada papan catur tersebut, dengan perbandingan fenotip = 9 : 3 : 3 : 1, yaitu 9 bulat-kuning, 3 bulat-hijau, 3 kisut-kuning dan 1 kisut-hijau. Dari 4 macam fenotip yang dihasilkan, muncul 2 fenotip baru, yaitu *bulat-hijau* dan *kisut-kuning*, yang berbeda dari fenotip induk (P) dan juga dari fenotip turunan  $F_1$ .

#### D. PENYIMPANGAN SEMU HUKUM MENDEL

Hasil-hasil pembastaran seperti yang dilakukan oleh Mendel, ternyata tidak semuanya berlaku untuk pembastaran makhluk hidup lainnya. Perbandingan fenotip seperti 3:1 dan 9:3:3:1, pada turunan  $F_2$  tidak selalu ditemukan. Misalnya pada suatu pembastaran diperoleh hasil turunan  $F_2$  dengan perbandingan 9:7 atau 9:3:4, bukan 9:3:3:1. Penyimpangan yang terjadi seperti itu disebut sebagai **penyimpangan semu dari temuan Mendel** karena sebenarnya perbandingan yang diperoleh seperti di atas dapat dilihat sebagai perbandingan gabungan dari perbandingan 9:3:3:1 yang ada. Perbandingan 9:7 merupakan perbandingan 9:(3+3+1), dan perbandingan 9:3:4 merupakan perbandingan 9:3:(3+1). Selain perbandingan fenotip pada turunan  $F_2$  yang tidak sesuai dengan penemuan Mendel, muncul pula fenotip baru yang tidak sesuai dengan prinsip yang ditemukan oleh Mendel. Di sini tampak seolah-olah ada "penyimpangan" dari apa yang telah ditemukan oleh Mendel. Mengapa dapat terjadi semacam penyimpangan seperti itu?

Ahli genetika dari Inggris yang bernama Bateson telah menjelaskan mengapa terjadi semacam penyimpangan dari temuan Mendel. Penyimpangan yang tampak pada perbandingan fenotip tersebut dapat dijelaskan karena banyak ciri-ciri atau sifat-sifat makhluk hidup dipengaruhi oleh dua atau lebih pasangan gen. Perbandingan fenotip pada turunan  $F_2$  akan berubah (tidak sesuai dengan temuan Mendel) dengan berbagai ragam, tergantung dari bentuk **interaksi** atau **saling mempengaruhi** antar sifat atau gen.

Beberapa contoh di bawah ini menerangkan beberapa bentuk interaksi gen tersebut, dengan perbandingan fenotip yang diperoleh pada turunan  $F_2$ nya.

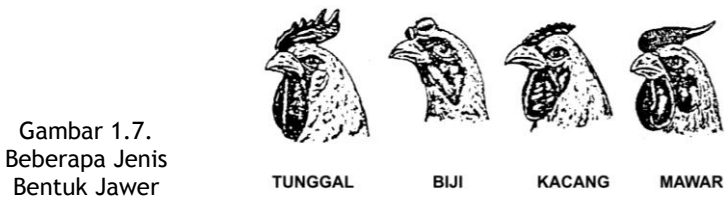


**1. Dua Gen mempengaruhi Satu Sifat**

Pada peternakan ayam diketahui adanya macam-macam bentuk jengger atau *jawer* ayam. Macam bentuk jawer ada 4 macam, yaitu sebagai berikut.

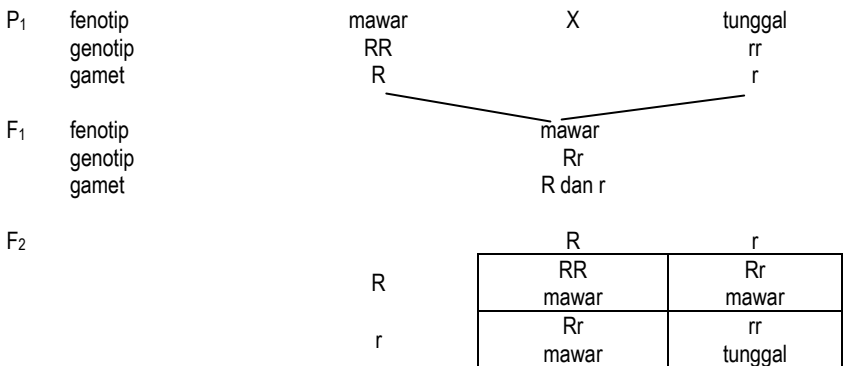
- a. bentuk *tunggal* (single), terdapat pada ayam Leghorn.
- b. bentuk *mawar* (ros), terdapat pada ayam Wyandotte.
- c. bentuk *kacang* (pea), terdapat pada ayam Brahma.
- d. bentuk *biji* (walnut), terdapat pada ayam Malaya.

Bentuk jawer dapat Anda lihat pada Gambar 1.7. berikut ini.



Gambar 1.7.  
Beberapa Jenis  
Bentuk Jawer

Pembastaran antara ayam jawer *mawar* dengan jawer *tunggal* menghasilkan turunan F<sub>1</sub> yang semuanya mempunyai jawer *mawar*. Ini berarti bahwa jawer *mawar* mempunyai sifat dominan terhadap jawer *tunggal*. Gen R adalah gen untuk timbulnya jawer mawar dan gen r untuk timbulnya jawer tunggal. Pada turunan F<sub>2</sub> akan diperoleh 3 mawar dan 1 tunggal (Gambar 1.8).



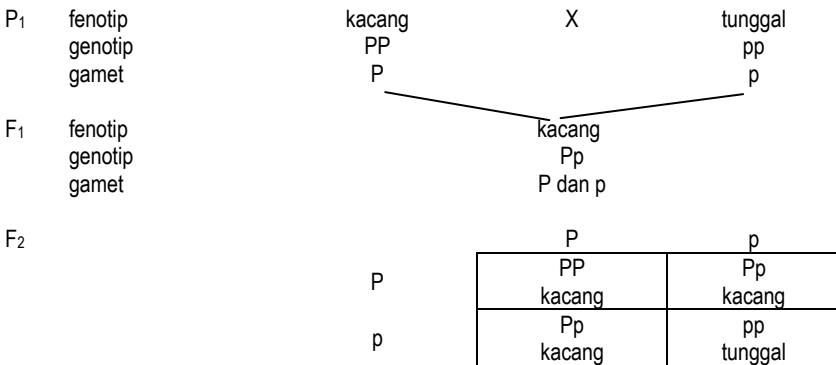
Gambar 1.8.

Pembastaran ayam jawer mawar dengan jawer tunggal menghasilkan turunan F<sub>1</sub> semuanya mawar, dan pada turunan F<sub>2</sub> terdapat 3 mawar dan 1 tunggal.

Apabila diadakan pembastaran antara ayam jawa*r kacang* dengan jawa*r tunggal*, akan menghasilkan turunan  $F_1$  yang semuanya mempunyai jawa*r kacang*. Ini menunjukkan bahwa jawa*r kacang* dominan terhadap jawa*r tunggal*. Gen P adalah gen untuk timbulnya jawa*r kacang* dan gen p untuk timbulnya jawa*r tunggal*. Dan pada turunan  $F_2$  akan diperoleh 3 jawa*r kacang* dan 1 jawa*r tunggal* (Gambar 1.9).

Lihat kedua macam pembastaran (Gambar 1.8 dan 1.9). Keduanya tidak memperlihatkan hal-hal yang luar biasa. Keduanya menunjukkan pembastaran monohibrid dengan memperlihatkan sifat dominan.

Akan tetapi, kita lihat dengan teliti kedua pembastaran seperti tertulis di atas. Dari kedua pembastaran tersebut akan timbul pertanyaan: Mengapa genotip jawa*r tunggal* pada pembastaran ke satu (Gambar 1.8) ditulis sebagai rr, dan ditulis sebagai pp pada pembastaran kedua (Gambar 1.9)? Jawaban atas pertanyaan ini akan terjawab dari hasil pembastaran berikut ini, yaitu antara jawa*r kacang* dengan jawa*r mawar*, yang keduanya bersifat dominan seperti pada pembastaran terdahulu. Jawa*r kacang* dominan terhadap jawa*r tunggal* dan jawa*r mawar* dominan terhadap jawa*r tunggal*.



Gambar 1.9.

Pembastaran ayam jawa*r kacang* dengan jawa*r tunggal* menghasilkan turunan  $F_1$  semuanya jawa*r kacang*, dan pada turunan  $F_2$  terdapat 3 kacang dan 1 tunggal.

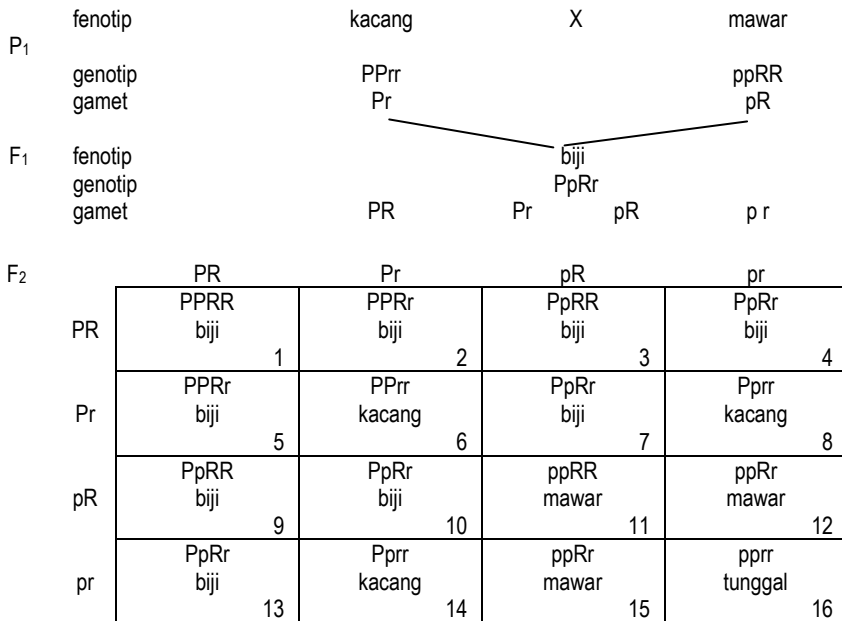
Apa yang akan dihasilkan dari pembastaran jawa*r kacang* dengan jawa*r mawar* yang keduanya bersifat dominan itu? Dari pembastaran diperoleh jenis bentuk jawa*r baru*, yaitu jawa*r biji*. Selain itu, pada turunan  $F_2$  akan diperoleh 16 kemungkinan macam turunan dengan perbandingan = 9:3:3:1,

yang terdiri dari 9 jawer *biji*, 3 jawer *mawar*, 3 jawer *kacang*, dan 1 jawer *tunggal*. Apa artinya ini semua? (Gambar 1.10).

Ini berarti pada pembastaran jawer *kacang* dengan jawer *mawar* terlihat dua sifat beda atau *dihibrida*, yaitu dengan diperoleh turunan pada  $F_2$  dengan perbandingan 9:3:3:1. Dengan demikian, pertanyaan mengapa genotip jawer *tunggal* ditulis dengan  $rr$  dan  $pp$ , dapat dijawab bahwa jawer *tunggal* timbul karena adanya *interaksi dari dua gen resesif yang berbeda, yaitu  $r$  dan  $p$* .

Marilah kita lihat hasil pembastaran pada Gambar 1.10. di bawah ini sebagai berikut ini.

- a. *Jawer tunggal* terjadi sebagai hasil **interaksi antara dua gen resesif**, yaitu gen  $p$  dan  $r$ . Genotip jawer tunggal ialah  $pprr$ .
- b. *Jawer mawar* diperoleh apabila hewan itu homozigot atau heterozigot untuk gen  $R$ , dan homozigot untuk gen  $p$ . Sehingga genotip jawer mawar ialah  $ppRR$  dan  $ppRr$ . Genotip  $ppRR$ , artinya homozigot untuk gen  $p$  dan heterozigot untuk gen  $R$ . Apa arti **homozigot**? Apa arti **heterozigot**? Homozigot, artinya genotip suatu individu yang mempunyai pasangan gen yang sama. Pasangan gen ini dapat berupa pasangan gen yang dominan (misal  $PP$  dan  $RR$ ), dan disebut sebagai **homozigot dominan** atau berupa pasangan gen yang resesif (misal pada  $pp$  dan  $rr$ ), dan disebut sebagai **homozigot resesif**, sedangkan arti heterozigot ialah genotip suatu individu yang mempunyai pasangan gen yang beda. Misalnya, individu dengan genotip  $Pp$  dan  $Rr$ .
- c. *Jawer kacang* diperoleh apabila hewan itu homozigot atau heterozigot untuk gen  $P$  dan homozigot untuk gen  $r$ . Jadi, genotip jawer kacang ialah  $PPrr$  dan  $Pprr$ . Genotip  $PPrr$ , artinya homozigot untuk gen  $P$  dan homozigot untuk gen  $r$ , sedangkan genotip  $Pprr$ , artinya ialah heterozigot untuk gen  $P$  dan homozigot untuk gen  $r$ .
- d. *Jawer biji* akan muncul apabila terdapat paling sedikit ada *satu gen  $P$  bersama-sama dengan paling sedikit satu gen  $R$* . Jadi genotip jawer biji ialah  $PPRR$ ,  $PPRr$ ,  $PpRR$ ,  $PpRr$ .



Gambar 1.10.

Pembastaran antara ayam jawer kacang dan jawer mawar menghasilkan turunan F<sub>1</sub> semuanya jawer biji, dan pada turunan F<sub>2</sub> terdapat 9 jawer biji, 3 jawer mawar, 3 jawer kacang, dan 1 jawer tunggal.

Apa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pembastaran tersebut di atas? Kesimpulannya ialah berikut ini.

- Jawer tunggal terjadi sebagai hasil interaksi dari dua gen yang resesif, yaitu gen p dan r.
- Jawer biji baru muncul apabila terjadi interaksi antara dua gen yang dominan, yaitu P dan R.
- Hasil pembastaran tersebut bukan menyimpang dari temuan Mendel, akan tetapi disebabkan karena dugaan dua gen bekerja sama (berinteraksi) mempengaruhi satu sifat makhluk hidup.

Di bawah ini dicantumkan macam genotip dari jawer-jawer ayam tersebut di atas sebagai berikut.

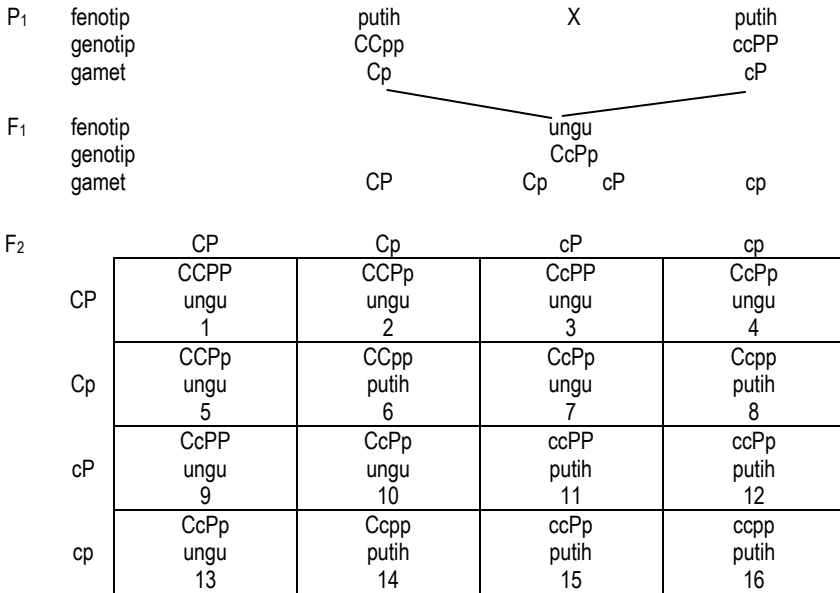
Jenis Jawer/Fenotip	Genotip
Jawer tunggal	pprr
Jawer mawar	ppRR ppRr
Jawer kacang	PPrr Pprr
Jawer biji	PPRR PPRr PpRR PpRr

## 2. Kriptomeri

Penelitian lain dari Bateson ialah pada tanaman kacang buncis. Tanaman yang berbunga putih dibastarkan dengan tanaman yang berbunga ungu. Turunan  $F_1$  akan berbunga ungu semuanya. Pada turunan  $F_2$  diperoleh tanaman dengan bunga ungu dan putih, dengan perbandingan 9 ungu : 7 putih. Penjelasan dari pembastaran ini dapat dilihat pada Gambar 1.11.

Kalau kita lihat induk P, di sini tampak merupakan pembastaran monohibrid. Akan tetapi, kalau kita lihat turunan yang diperoleh pada  $F_2$  sejumlah 16 kombinasi, dengan perbandingan 9 : 7. Hal ini menunjukkan bahwa pembastaran tersebut di atas antara tanaman berbunga ungu dan tanaman berbunga putih merupakan dihibrid (melibatkan 2 faktor beda).

Mengapa pada turunan  $F_2$  tidak diperoleh perbandingan turunan 9:3:3:1, tetapi diperoleh dengan perbandingan 9:7? Hal ini dapat diterangkan sebagai berikut.



Gambar 1.11.

Pembastaran antara kacang buncis berbunga putih dan kacang buncis berbunga putih menghasilkan turunan F<sub>1</sub> semuanya berbunga ungu, dan pada turunan F<sub>2</sub> terdapat 9 berbunga ungu dan 7 berbunga putih (9:7).

Gen C adalah gen untuk timbulnya warna. Gen P adalah gen untuk enzim yang dapat menimbulkan warna, sedangkan gen p adalah gen yang tidak dapat membuat enzim. Enzim dapat terjadi kalau ada gen P. Warna bunga (yaitu ungu) dapat timbul apabila suatu tanaman mempunyai gen untuk warna (gen C) dan gen untuk enzim (gen P). Sehingga bila pada tanaman terdapat gen C dan gen P maka tanaman tersebut menjadi berwarna (ungu). Kalau hanya ada gen C, tetapi tidak ada gen P (misal hanya ada gen p), warna bunga akan menjadi putih. Apabila pada genotip tanaman hanya terdapat gen C atau gen P saja maka tidak akan timbul warna (ungu).

Di sini dikatakan bahwa tanaman akan berbunga ungu apabila gen P berada bersama gen C atau dapat pula dikatakan bahwa gen P akan mempunyai pengaruh dalam pembentukan warna apabila berada bersama dengan gen C. Dikatakan di sini bahwa gen P itu tersembunyi atau disebut **kriptomer** (kriptos = tersembunyi). Lihat Gambar 1.11 sekali lagi. Turunan

pada  $F_2$  yang berbunga putih, bila tanaman itu hanya memiliki gen C saja atau gen P saja, dan tidak dalam keadaan bersama antara gen C dan P.

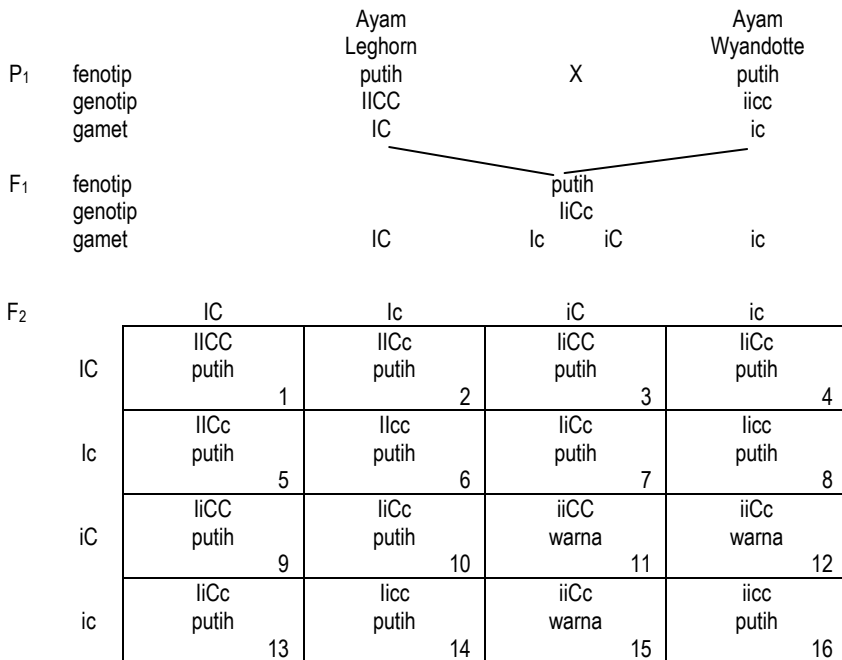
Pada pembastaran tersebut di atas seolah-olah hasil turunan  $F_2$  menyimpang dari temuan Mendel, yaitu bukan 9:3:3:1, melainkan 9:7 karena adanya peristiwa bahwa apabila dua gen yang dominan bertemu (gen C dan P), akan mempengaruhi sifat suatu individu (dalam hal ini warna ungu bunga kacang buncis).

### 3. Epistasis dan Hipostasis

Pada umumnya ayam Leghorn bulu putih itu dominan terhadap warna bulu hitam atau warna lainnya. Akan tetapi, pada ayam Wyandotte bulu putih ternyata bersifat resesif terhadap warna lainnya pada ayam tersebut. Penyelidikan menunjukkan bahwa pada Leghorn bulu putih terdapat **gen warna**, dan di samping itu terdapat pula **gen pencegah timbulnya warna**. Secara genetik ayam Leghorn putih sebenarnya mempunyai sifat warna, akan tetapi tidak mampu untuk menimbulkan warna tersebut karena mempunyai juga gen pencegah warna. **Gen pencegah warna** dapat ditulis dengan huruf **I**, dan **gen warna** dengan huruf **C** maka Leghorn bulu putih mempunyai genotip IICC, dan ayam Wyandotte bulu putih mempunyai genotip iicc.

Untuk lebih jelas maka gen-gen yang ada pada kedua macam ayam tersebut ialah **I** adalah **gen untuk mencegah warna**, **i** adalah **gen untuk menimbulkan warna**. **C** adalah **gen untuk warna**, dan **c** **gen untuk tidak ada warna**.

Apabila ayam Leghorn bulu putih (IICC) dibastarkan dengan ayam Wyandotte bulu putih (iicc) maka akan diperoleh turunan  $F_1$  yang berbulu putih, dan pada turunan  $F_2$  akan diperoleh 13 ayam bulu putih dan 3 ayam berwarna (13:3). Penjelasan dapat dilihat pada Gambar 1.12.



Gambar 1.12.

Pembastaran antara ayam Leghorn putih dan ayam Wyandotte putih menghasilkan turunan F<sub>1</sub> semuanya berbulu putih, dan pada turunan F<sub>2</sub> terdapat 13 ayam berbulu putih dan 3 berbulu berwarna (13:3).

Pada ke-13 ayam yang putih terdapat pencegah timbulnya warna (gen I), dan gen untuk warna (gen C). Jadi meskipun ada gen C, akan tetapi ada gen I (pencegah warna) maka ayam-ayam tadi akan menjadi berbulu putih.

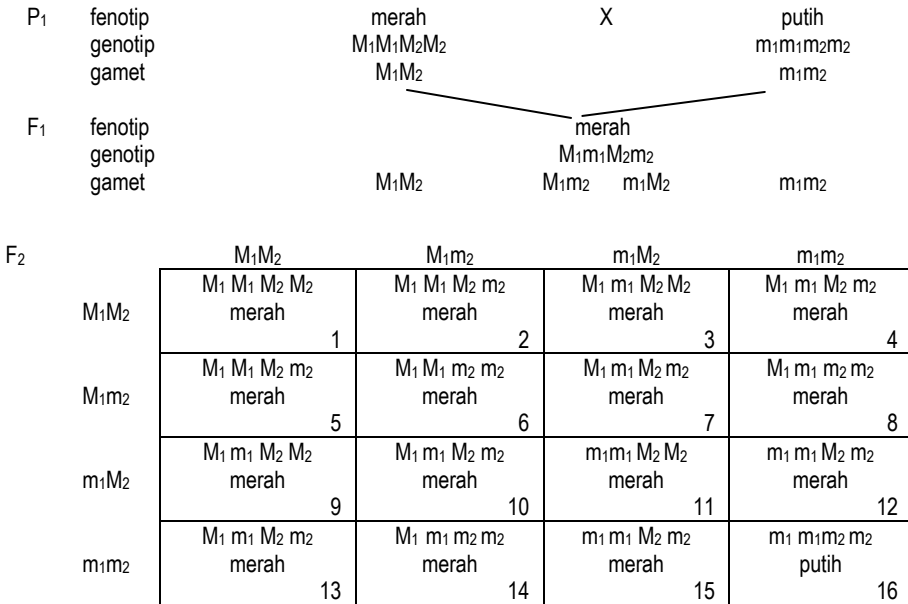
Bagaimana dengan ayam yang berwarna (ada 3 bagian)? Pada ayam berwarna terdapat gen warna C, tetapi tidak terdapat gen pencegah warna (gen I) sehingga timbullah warna pada bulu ayam tersebut. Dapat disimpulkan bahwa apabila pada suatu genotip ayam terdapat gen I maka tidak akan timbul warna. Gen I seolah-olah menutupi gen warna (gen C) untuk muncul. Gen yang menutupi ini, yaitu **gen I**, dikatakan sebagai **gen epistasis**. Gen yang ditutupi, yaitu **gen C**, dikatakan sebagai **gen hipostasis**.



Pada peristiwa epistasis dan hipostasis ini terdapat interaksi antara 2 gen, yang akan mempengaruhi fenotip atau sifat individu, dalam contoh di atas ialah pada bulu ayam. Pada peristiwa pembastaran di atas tampak seolah-olah “menyimpang” dari temuan Mendel (9:3:3:1), yang sebenarnya perbandingannya  $(9 + 3 + 1) : (3) = 13 : 3$ . Oleh karena itu, dikatakan sebagai **”penyimpangan semu dari temuan Mendel.”**

#### 4. Polimeri

Penyelidikan lain dilakukan oleh Nilson dan Ehle pada tanaman gandum yang berbiji merah dan berbiji putih. Warna merah menunjukkan dominan tidak sempurna, yang artinya turunan yang dihasilkan lebih mirip dengan salah satu induknya daripada induk yang lain, tetapi tidak sama tepat dengan salah satu induk tersebut. Di atas dikatakan bahwa sifat merah mempunyai sifat dominan tidak sempurna terhadap sifat putih. Pada tanaman yang heterozigot mempunyai sifat merah yang lebih muda (warnanya kurang merah) dari pada tanaman yang homozigot. Pembastaran antara gandum biji merah dengan gandum biji putih diperoleh turunan  $F_1$  yang berwarna merah, tetapi warna merahnya kurang dibandingkan dengan warna merah tanaman induk. Pada turunan  $F_2$  diperoleh 15 tanaman yang berwarna merah dan 1 tanaman yang berwarna putih (15:1). Dengan perbandingan ini menunjukkan bahwa pembastaran tersebut melibatkan 2 sifat beda atau dihibrid. Apa yang dapat disimpulkan dari hasil pembastaran di atas? Kesimpulannya ialah terdapat dua pasang gen untuk merah, dan yang warna putih karena ada gen  $m_1$  dan  $m_2$  untuk timbulnya warna putih (Gambar 1.13).



Gambar 1.13.

Pembastaran antara gandum biji merah dan gandum biji putih menghasilkan turunan F<sub>1</sub> semuanya berbiji merah, dan pada turunan F<sub>2</sub> terdapat 15 bagian gandum berbiji merah dan 1 bagian gandum berbiji putih (15:1).

Pada Gambar 1.13. digambarkan pembastaran antara gandum biji merah dan gandum biji putih, dan pada turunan F<sub>2</sub> diperoleh 15 bagian turunan warna merah dengan perincian sebagai berikut.

- 1 bagian turunan mempunyai 4 buah gen M (baik M<sub>1</sub> dan M<sub>2</sub>).
- 4 bagian turunan mempunyai 3 buah gen M.
- 6 bagian turunan mempunyai 2 buah gen M.
- 4 bagian turunan mempunyai 1 buah gen M.

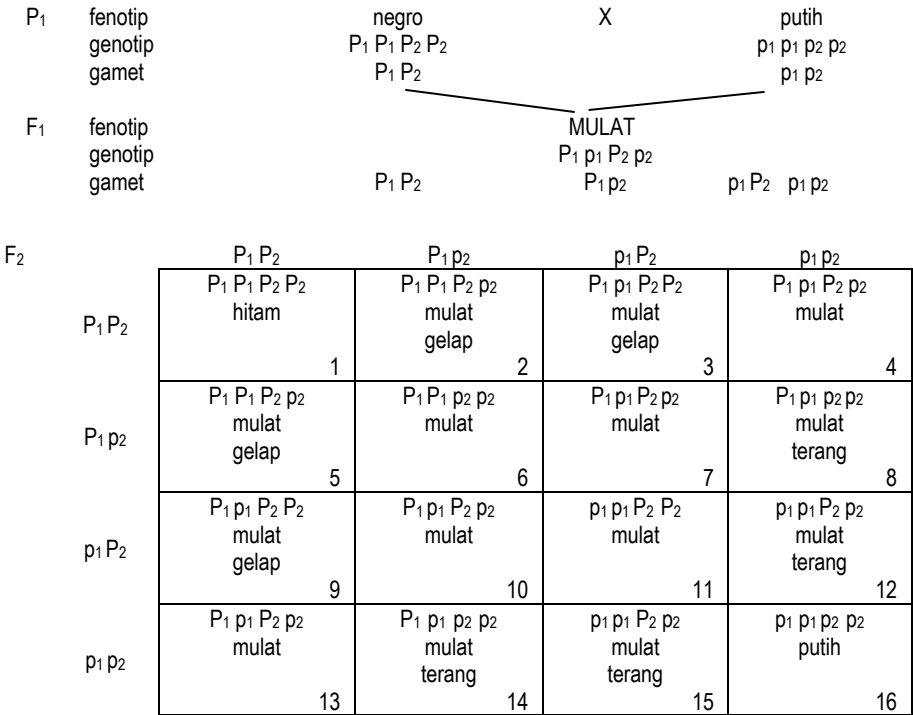
Tanaman gandum yang berwarna putih (hanya 1 bagian) sama sekali tidak memiliki gen M (baik M<sub>1</sub> maupun M<sub>2</sub>), yaitu hanya memiliki gen m (m<sub>1</sub> dan m<sub>2</sub>).

Dari 15 bagian turunan F<sub>2</sub> yang berwarna merah, hanya satu bagian yang paling merah, sisanya merahnya makin kurang. Hal ini tergantung dari banyaknya gen M<sub>1</sub> dan M<sub>2</sub> yang dimiliki pada genotip tanaman. Makin

banyak memiliki gen  $M_1$  dan  $M_2$  maka akan makin merah warna bunganya. Sebaliknya,, makin sedikit atau kurang gen  $M_1$  atau  $M_2$  warna merahnya akan berkurang juga. Gen  $M_1$  dan gen  $M_2$  merupakan gen-gen yang berdiri sendiri, artinya mempengaruhi sifat tersendiri. Akan tetapi, di sini gen-gen tersebut bersama-sama mempengaruhi bagian yang sama (dalam hal ini warna bunga) pada suatu turunan. Peristiwa semacam ini dikatakan peristiwa **polimeri**.

Peristiwa polimeri dapat dilihat pada manusia, yaitu hasil perkawinan orang negro (hitam) dan orang kulit putih (putih). Dari hasil perkawinan diperoleh turunan  $F_1$  yang berkulit **mulat**, yaitu berkulit tidak hitam seperti negro, dan tidak seputih kulit orang tua kulit putihnya (Gambar 1.14.).

Bila seseorang mulat kawin dengan seorang mulat lain maka akan diperoleh turunan  $F_2$  dengan kulit hitam, mulat gelap, mulat, mulat terang, dan kulit putih. Hal ini tergantung dari banyaknya gen P (gen untuk pigmen) yang dimiliki. Di bawah ini diterangkan tentang warna kulit yang ditentukan oleh banyaknya gen P (baik  $P_1$  maupun  $P_2$ ).



Gambar 1.14.

Perkawinan antara orang Negro dan orang kulit putih menghasilkan turunan F<sub>1</sub> semuanya mulat, dan pada turunan F<sub>2</sub> terdapat 1 bagian berkulit hitam, 6 bagian mulat, 1 bagian kulit putih dan 4 bagian berkulit lebih hitam dari mulat dan 4 bagian lebih hitam dari kulit putih (1:4:6:4:1).

Bagan banyaknya gen P ( $P_1$  dan  $P_2$ ) yang menentukan warna kulit.

Jumlah gen P	Genotip	Fenotip/warna kulit
0	$p_1 p_1 p_2 p_2$	putih
1	$P_1 p_1 p_2 p_2$ $p_1 P_1 p_2 p_2$	mulat terang
2	$P_1 P_1 p_2 p_2$ $P_1 p_1 P_2 p_2$	mulat
3	$P_1 P_1 P_2 p_2$ $P_1 p_1 P_2 P_2$	mulat gelap
4	$P_1 P_1 P_2 P_2$	hitam

Pada pembastaran di atas makin banyak gen P (baik  $P_1$  maupun  $P_2$ ) pada suatu genotip seseorang maka makin gelap warna kulitnya. Makin sedikit gen P-nya, makin terang warna kulitnya. Warna kulit putih tidak mempunyai gen P. Di sini gen  $P_1$  dan gen  $P_2$  bersama-sama mempengaruhi warna kulit manusia.

Pembicaraan di atas dari a sampai dengan d mengenai penyimpangan semu dari temuan Mendel. Sebenarnya hal itu terjadi karena ada gen yang saling berinteraksi (berhubungan) dan mempengaruhi suatu fenotip tanaman atau manusia, dengan hasil perbandingan pada turunan  $F_2$ nya berbeda dengan temuan Mendel (yaitu 9:3:3:1).



## LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Apakah manfaat pengetahuan genetika bagi manusia?
- 2) Sebutkan dan jelaskan tiga cara mempelajari penurunan sifat!
- 3) Prinsip-prinsip pewarisan sifat apa saja yang berhasil ditemukan oleh Mendel?
- 4) Selesaikan masalah pembastaran berikut ini:

- a) Tanaman kacang kapri yang homozigot tinggi (batangnya) dibastarkan dengan tanaman kacang kapri homozigot pendek (batangnya). Turunan  $F_1$  yang diperoleh diserbuki sendiri dan akan menghasilkan turunan  $F_2$ . Dari pembastaran tersebut cari turunan  $F_2$ nya dengan menggunakan papan catur. Diketahui gen T untuk sifat tinggi dan gen t untuk sifat rendah. Sifat tinggi (T) dominan terhadap sifat rendah (t).
- b) Tikus berbulu homozigot hitam berekor panjang dibastarkan dengan tikus homozigot berbulu putih berekor pendek. Turunan  $F_1$  yang diperoleh dibastarkan dengan turunan  $F_1$  lainnya, dan akan menghasilkan turunan  $F_2$ . Dari pembastaran tersebut cari turunan  $F_2$ nya dengan menggunakan papan catur. Diketahui gen H untuk sifat bulu hitam, gen h untuk bulu putih; gen P untuk ekor panjang dan gen p untuk ekor pendek. Sifat bulu hitam (H) dominan terhadap sifat bulu putih (h); sifat ekor panjang (P) dominan terhadap sifat ekor pendek (p).

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

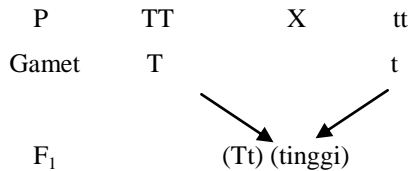
- 1) Pencarian bibit unggul di bidang pertanian/peternakan. Mendiagnosis dan mencegah penurunan sifat yang tidak menguntungkan pada manusia.
- 2) Tiga cara mempelajari penurunan sifat: (3 dari 4 cara)
  - a) Percobaan penangkaran untuk mengetahui pola penurunan sifat pada hewan atau tumbuhan.
  - b) Melalui silsilah keluarga dapat diketahui pola penurunan sifat dari induk kepada turunannya.
  - c) Melalui penyelidikan sitologi dapat diperoleh keterangan tentang kromosom, sebagai pembawa sifat, hal-hal mengenai bentuk dan tingkah lakunya.
  - d) Melalui analisis biokimia telah dapat diketahui susunan kimia kromosom dan gen sehingga telah dapat pula menerangkan adanya kelainan reaksi fisiologis pada tubuh seseorang yang diturunkan.
- 3) Coba Anda kaji kembali kesimpulan Mendel dari percobaan penyilangan tanaman kapri!

Apabila Anda melakukannya dengan seksama kami yakin akan mendapatkan jawaban yang memadai.

a) Mula-mula anda tentukan:

- genotip kacang kapri homozigot tinggi:.....(TT)
- genotip kacang kapri homozigot rendah.....(tt)

Kemudian buat bagan penyilangan parental sampai dihasilkan F<sub>1</sub>, yaitu:



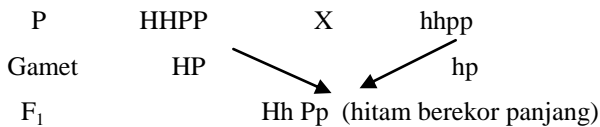
Untuk mendapatkan F<sub>2</sub> dari penyilangan tersebut gunakan papan catur berikut:

	T	t
T	TT	Tt
	.....	.....
t	Tt	tt
	.....	.....

Jadi perbandingan fenotip turunan (F<sub>2</sub>) adalah  
 ..... tinggi : ..... Rendah

b) Mula-mula Anda tentukan:

- Genotip tikus homozigot hitam berekor panjang! (HHPP)
  - Genotip tikus homozigot putih berekor pendek (hhpp).
- Kemudian buat bagan penyilangan parental sampai dihasilkan F<sub>1</sub> yaitu:



Untuk mendapatkan  $F_2$  nya carilah dengan menggunakan sistem papan catur sebagai berikut:

- Mula-mula tentukan gamet dari  $F_1$  (HhPp), yaitu: HP, Hp, hP, hp) kemudian gambar bagan berikut:

	Hp	Hp	hP	hp
HP	HHPp Hitam ekor panjang	.....	.....	.....
Hp	.....	.....	.....	.....
hP	.....	.....	.....	.....
hp	.....	.....	.....	.....

Coba Anda kerjakan sendiri! Kami yakin Anda akan mampu menyelesaikannya!

Fenotip apa saja yang akan tampak dari hasil  $F_2$ ?

Bagaimana perbandingan fenotipnya?



## RANGKUMAN

Genetika merupakan cabang biologi yang mencoba menjelaskan adanya persamaan dan perbedaan sifat turunan pada makhluk hidup.

Manfaat pengetahuan genetika bagi manusia, yaitu sebagai berikut.

1. Penangkaran tumbuhan dan hewan untuk mencari bibit unggul, yang pada dasarnya untuk mencukupi makanan dalam segi kualitas maupun kuantitas.
2. Kedokteran: mencoba mendiagnosa adanya penurunan sifat yang tidak menguntungkan, antara lain penyakit menurun serta berusaha mencegahnya.

Cara mempelajari penurunan sifat, dapat dengan cara berikut ini.

1. Percobaan penangkaran, khususnya pada hewan dan tumbuhan untuk mengetahui pola pewarisan sifat dari induk kepada turunannya.
2. Silsilah keluarga, melalui silsilah keluarga memungkinkan seseorang mempelajari pola penurunan sifat dari orang tua kepada



anak atau cucu. Sifat menurun yang dapat dipelajari, antara lain penyakit buta warna, hemofilia. Begitu pula pewarisan sifat-sifat morfologi bagian tubuh dapat pula dipelajari, misalnya rambut keriting, lesung pipit di pipi, letak menempelnya telinga. Anak kembar juga merupakan bahan yang baik untuk mempelajari pola penurunan sifat.

3. Sitologi, melalui sitologi, kromosom sebagai bagian sel yang membawa sifat yang diturunkan dapat diketahui sifat-sifatnya.
4. Analisis Biokimia, melalui analisis biokimia dapat diketahui susunan kimia kromosom dan gen sehingga dapat menerangkan adanya kelainan reaksi fisiologis pada tubuh seseorang yang diturunkan.

Beberapa hal yang harus diperhatikan apabila kita akan memilih organisme sebagai bahan percobaan, yaitu sebagai berikut.

1. Mempunyai daur hidup pendek. Waktu yang diperlukan dari telur sampai menetas dan kemudian menjadi individu yang siap untuk bertelur lagi relatif pendek.
2. Mempunyai turunan yang banyak.
3. Mempunyai variasi sifat. Sifat-sifat yang tampak beraneka.
4. Mudah dilakukan. Penyediaan makanan dan tempat memudahkan untuk melakukan percobaan.

Mendel dalam penyelidikannya dengan menggunakan kacang kapri telah memperoleh beberapa prinsip, yaitu sebagai berikut.

1. Prinsip Dominan. Penampakan suatu gen pada fenotip mengalahkan gen lainnya (yang resesif).
2. Prinsip segregasi. Pemisahan pasangan gen menuju ke gamet yang berbeda.
3. Prinsip pengelompokan secara bebas. Setiap pasangan gen dari turunan  $F_1$  akan memisah dan mengelompok secara bebas menuju gamet pada waktu pembentukan gamet.

Pada beberapa pembastaran dihasilkan turunan  $F_2$  dengan perbandingan yang berbeda dengan perbandingan pada turunan  $F_2$  yang ditemukan Mendel. Peristiwa ini disebut sebagai penyimpangan semu dari temuan Mendel. Disebut sebagai penyimpangan semu karena sebenarnya pembastaran tersebut mengikut aturan pembastaran menurut Mendel (dengan perbandingan 9 : 3 : 3 : 1). Akan tetapi, ada peristiwa interaksi gen maka diperoleh perbandingan yang lain dari 9:3:3:1. Beberapa contoh adanya interaksi gen ialah Kriptomeri, Polimeri, Epistasis, dan Hipostasis.

**TES FORMATIF 1**

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Genetika, suatu cabang biologi yang menjelaskan hal-hal berikut, *kecuali ...*
  - A. apa yang diturunkan/diwariskan dari induk kepada turunannya
  - B. persamaan sifat turunan yang dimiliki oleh suatu makhluk hidup
  - C. bagaimana materi genetika diturunkan
  - D. bagaimana cara kerja materi genetika pada individu
  
- 2) Pencarian bibit unggul di bidang pertanian dan peternakan pada hakikatnya bertujuan untuk ....
  - A. mencari jenis unggul sapi perah
  - B. mencegah tanaman padi terserang hama
  - C. memperoleh jenis ayam petelur yang baik
  - D. memenuhi kebutuhan pangan manusia
  
- 3) Tujuan dari percobaan penangkaran (*breeding*) pada tanaman atau hewan ialah untuk ....
  - A. menentukan penurunan sifat dari induk kepada turunannya
  - B. memperoleh sifat-sifat keturunan yang berbeda dengan induk
  - C. menganalisis sifat-sifat keturunan yang diperoleh
  - D. mengetahui silsilah keluarga suatu hewan percobaan
  
- 4) Apabila kita akan melakukan percobaan penangkaran pada hewan maka kita akan memilih hewan yang memiliki syarat sebagai berikut ....
  - A. mempunyai variasi sifat dan turunannya hanya sedikit
  - B. mempunyai arti ekonomi dan tidak sukar melakukannya
  - C. mudah dipelihara dan daur hidup relatif singkat
  - D. mempunyai tubuh yang kecil dan sifat yang sama
  
- 5) *Drosophila* banyak dipergunakan sebagai hewan percobaan penangkaran. Hal-hal apa yang menjadi pertimbangan atas pemilihan hewan tersebut?
  - A. Waktu yang diperlukan sejak telur menetas sampai dengan siap untuk kawin relatif singkat sekali.
  - B. Dari sepasang *Drosophila* dapat diperoleh anak dalam jumlah yang banyak.

- C. Sifat yang dimilikinya sangat beraneka ragam dan mudah dibedakan.
  - D. Jawaban A, B, dan C benar.
- 6) Mempelajari sifat menurun pada manusia dilakukan melalui cara ....
- A. memperhatikan sifat-sifat yang dimiliki oleh kedua induk (orang tua)
  - B. mencatat golongan darah yang dimiliki oleh setiap anak di suatu sekolah
  - C. menelusuri sifat yang dimiliki oleh suatu keluarga secara turun menurun
  - D. membandingkan sifat yang dimiliki oleh anak-anak dari suatu keluarga
- 7) Pengamatan sel secara sitologis dapat diperoleh data tentang ....
- A. jumlah dan susunan kimia kromosom suatu individu
  - B. bentuk dan jumlah kromosom sel tubuh
  - C. sifat fisik dan kimia suatu pasangan kromosom
  - D. ukuran dan bentuk sel badan dari suatu individu
- 8) Kelainan fisiologis yang diturunkan pada manusia ternyata dapat diketahui oleh ahli genetika. Cara apa yang dipergunakannya?
- A. Penelitian sitologi sejak kromosom
  - B. Penangkaran (*breeding*) anak kembar
  - C. Analisis biokimia kromosom
  - D. Jawaban A, B, dan C benar
- 9) Ketika Mendel melakukan pembastaran antara tanaman kacang berbiji merah dan yang berbiji putih diperoleh pada turunan  $F_2$ , yaitu 705 tanaman berbunga merah dan 224 tanaman berbunga putih. Dari hasil pembastaran tersebut tadi menunjukkan ....
- A. terdapat perbandingan 3:1 pada turunan  $F_2$
  - B. sifat merah dominan terhadap sifat putih
  - C. merah dan putih merupakan gen pembentuk sifat
  - D. jawaban A, B, dan C benar

Untuk soal no. 10) sampai dengan no. 12) didasarkan atas papan catur berikut ini:

	W	w
W	WW	Ww
w	Ww	ww

- 10) Pada papan catur tersebut di atas gamet dinyatakan oleh ....
- Ww dan ww
  - WW dan ww
  - W dan w
  - Ww dan Ww
- 11) Bagan turunan yang heterozigot dari keseluruhan turunan yang ada ialah ....
- 50:50
  - dua dari empat
  - satu dari dua
  - jawaban A, B, dan C benar
- 12) Individu yang mempunyai genotip Ww akan menghasilkan gamet ....
- WW, Ww, Ww, ww
  - semua W
  - W dan w
  - semua w
- 13) Apabila Anda membastarkan tanaman kacang kapri bulat dengan tanaman kacang kapri kisut dan diperoleh turunan  $F_1$  yang bulat dan kisut (kisut resesif) maka kesimpulan Anda ialah ....
- induk tanaman bulat heterozigot
  - induk tanaman kisut heterozigot
  - kedua induk homozigot
  - bulat dominan terhadap kisut
- 14) Suatu induk dengan genotip AaBb akan menghasilkan macam gamet ....
- AA, aa, BB, dan bb
  - A, a, B, dan b
  - AaB, aBb, dan Abb
  - AB, Ab, aB, dan ab
- 15) Apakah hasil turunan  $F_1$  antara tanaman berbunga merah dan tanaman berbunga ros, apabila diketahui bahwa tidak ada warna yang dominan?
- Beberapa turunan berbunga merah dan beberapa berbunga putih.
  - Semua turunan berbunga merah.
  - Semua tanaman berbunga ros.
  - Setengah dari turunannya berbunga merah dan setengahnya lagi berbunga ros.

- 16) Peristiwa epistasis menunjukkan bahwa ....
- A. ada gen menghalangi munculnya pengaruh gen lain apabila berada bersama-sama
  - B. dua atau lebih pasangan gen mempengaruhi sifat yang sama pada suatu makhluk hidup
  - C. sifat suatu makhluk hidup dipengaruhi oleh jumlah gen dominan yang dimiliki pada genotipnya.
  - D. salah satu gen bersifat dominan terhadap gen pasangannya
- 17) Bentuk jawer biji pada ayam akan muncul apabila ....
- A. dua gen dominan bertemu pada suatu genotip
  - B. dua gen resesif bertemu pada suatu genotip
  - C. salah satu gen resesif terhadap gen lain
  - D. tidak ada sifat dominan pada pembastaran

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

**KEGIATAN BELAJAR 2****Mekanisme Pewarisan Sifat**

Pada Kegiatan Belajar 1 Anda telah mengetahui bahwa kromosom yang terdapat pada inti sel mengandung pembawa sifat yang disebut gen. Bahwa sifat induk akan diturunkan ke turunannya, telah diteliti oleh Mendel. Dari hasil penelitiannya diperoleh prinsip atau Hukum Mendel. Pada kegiatan belajar berikut ini akan kita coba menerangkan bagaimana mekanisme pewarisan sifat itu terjadi. Dengan pengamatan tingkah laku kromosom pada pembelahan sel (mitosis dan meiosis) dan peristiwa pembuahan (fertilisasi) maka hal tersebut di atas dapat dijawab.

**A. MITOSIS**

Seperti telah Anda ketahui bahwa makhluk hidup dalam kehidupannya mengalami pertumbuhan. Pertumbuhan berarti ada penambahan sel-sel tubuh sehingga makhluk hidup akan bertambah jumlah selnya atau sel-sel itu bertambah dengan membelah diri. Sel-sel membelah diri selain untuk menambah jumlah sel sewaktu tubuh mengalami pertumbuhan, sel-sel tersebut membelah diri untuk mengganti sel-sel tubuh yang telah aus. Sel-sel anak yang dihasilkan dari pembelahan sel ini mempunyai susunan dan fungsi yang sama dengan sel induk.

Pembelahan sel terdiri dari dua tingkatan, yaitu mitosis dan sitokinesis. Mitosis, disebut sebagai pembelahan inti, dapat dikatakan sebagai jalan atau cara di mana materi genetika yang terdapat pada kromosom, dibagikan sama kepada dua inti sel anak. Sitokinesis adalah pembelahan sitoplasma sel induk dan memisahkan inti anak menjadi sel anak yang terpisah. Mitosis pada umumnya diikuti dengan sitokinesis sehingga waktu pembicaraan mitosis sudah tercakup peristiwa sitokinesis.

Mitosis merupakan suatu proses yang kontinu yang dapat dibagi menjadi 4 fase utama, yaitu profase, metafase, anafase, dan telofase, di mana setiap fase mempunyai ciri bentuk dan tingkah laku kromosom yang khusus.

**1. Profase**

Pada awal profase, kromosom secara bertahap tampak bagi benang yang panjang tersebar tak teratur pada inti sel. Selama fase itu berlangsung,

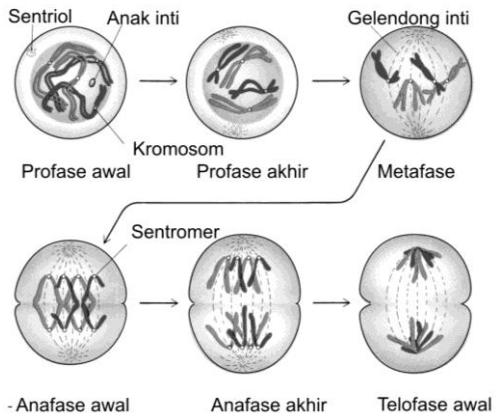
benang tadi memendek dan menebal dan kromosom tampak terdiri dari dua benang yang disebut kromatid. Kedua kromatid diikat satu sama lain oleh sebuah sentromer. Pada akhir profase, anak inti (nukleolus) secara bertahap tidak tampak dan akhirnya hilang. Setelah itu, selaput inti (membran inti) hilang dan merupakan tanda dari akhir profase.

**2. Metafase**

Metafase bermula dengan tampaknya gelendong (spindle) yang tersusun sebagai benang gelendong (spindle fiber), yang terbentang menghubungkan kedua kutub inti. Selama metafase, kromosom, masing-masing terdiri dari dua kromatid, tersusun sedemikian rupa sehingga setiap sentromer terletak pada bidang ekuator melekat pada benang gelendong. Beberapa benang gelendong terentang dari kutub ke kutub tanpa membawa kromosom melekat padanya. Apabila semua kromosom telah bergerak ke bidang ekuator, sel telah mencapai fase metafase penuh. Sekarang kedua kromatid siap untuk berpisah.

**3. Anafase**

Selama anafase, kromatid dari setiap kromosom saling memisahkan diri dan membentuk kromosom anak. Kemudian sentromer membelah dan kedua kromosom anak akan saling berpisah yang kemudian menuju ke kutub yang berlawanan. Tampak di sini bahwa benang gelendong seolah-olah menarik kromosom anak pada bagian sentromernya, menuju kutub. Pada akhir anafase, dua perangkat kromosom anak telah terpisah dan bergerak ke kutub yang berlawanan.



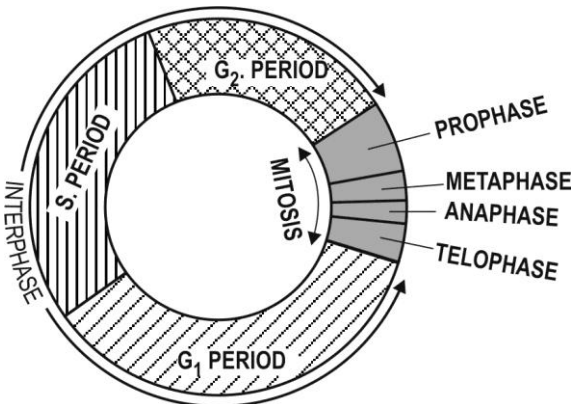
Gambar 1.15.  
Diagram Mitosis

#### 4. Telofase

Selama telofase, pemisahan dua perangkat kromosom selesai dengan munculnya kembali selaput inti. Demikian pula anak inti terbentuk kembali. Pada fase ini kromosom mulai tidak tampak, memanjang, dan berubah menjadi benang tipis lagi. Apabila proses ini selesai dan dua anak inti memasuki fase interfase, yang kemudian akan mengalami mitosis lagi pada suatu saat.

Selama mitosis, dua inti anak yang dihasilkan mempunyai materi genetika yang setara (ekuivalen) dengan inti induknya. Hal ini penting karena inti merupakan pusat kontrol sel, yang terdiri dari perintah-perintah untuk memerinci pembuatan protein. Sifat-sifat seperti ini haruslah dengan tepat diwariskan kepada sel-sel anak, dan hal ini dimungkinkan karena adanya pembagian kromosom pada mitosis tersebut.

Lamanya mitosis sangatlah beraneka ragam, tergantung jaringan dan makhluk hidup di mana proses tadi terjadi. Akan tetapi, secara umum diketahui bahwa profase merupakan fase yang terlama, sedang anafase yang terpendek. Penelitian pada ujung akar menunjukkan waktu relatif dari setiap fase. Profase berlangsung antara 1 sampai 2 jam, metafase 5 sampai 15 menit, anafase 2 sampai 10 menit dan telofase berlangsung antara 10 sampai 30 menit.



Gambar 1.16.  
Daur Sel (Siklus Sel)

Di atas dikatakan bahwa setelah telofase dua anak inti memasuki fase interfase. Interfase merupakan fase di antara dua mitosis, dan dikatakan pula sebagai fase istirahat. Pada fase ini kegiatan sel menjadi sangat aktif. Interfase dapat dibagi menjadi 3

periode, yaitu periode G<sub>1</sub>, S dan G<sub>2</sub> (G = Gap) yang semuanya itu bersama mitosis membentuk **daur sel** (*siklus sel*). (Gambar 1.16). Periode G<sub>1</sub> berlangsung setelah mitosis dan merupakan waktu untuk tumbuhnya materi



sitoplasma. Periode S (sintesis) berlangsung setelah periode  $G_1$ . Selama periode S, materi genetika (DNA) mengalami duplikasi. Periode selanjutnya ialah periode  $G_2$  di mana bagian-bagian yang terlibat pada mitosis seperti benang gelendong terbentuk.

## B. MEIOSIS

Meiosis berlangsung pada sel-sel diploid ( $2n$ ) yang akan menghasilkan sel-sel haploid ( $n$ ), apakah itu gamet atau spora. Fase ini merupakan mekanisme di mana jumlah kromosom ( $2n$ ) berkurang menjadi setengahnya ( $n$ ) pada saat pembentukan gamet atau spora. Mengetahui tingkah laku kromosom sewaktu meiosis sangatlah penting untuk mengetahui mekanisme pewarisan sifat.

Meiosis terdiri dari dua tingkat: meiosis I dan meiosis II, di mana masing-masing tingkatan mengikuti fase-fase yang sama yaitu: profase, metafase, anafase, dan telofase.

### 1. Meiosis I

Pada profase I (profase pada meiosis I), kromosom tampak sebagai benang yang panjang. Kemudian memendek dan berpasangan dengan kromosom yang homolog (sinapsis) membentuk pasangan kromosom yang homolog dan disebut bivalen (diad). Selanjutnya, kromosom membelah pada arah memanjang dan menghasilkan 4 buah kromatid yang disebut tetrad. Kemudian akan terjadi pindah silang antar kromatid yang homolog pada titik **persilangan** (kiasma). Selaput inti hilang, demikian juga anak inti. Kromosom homolog mulai tampak memisahkan diri dan kromatid yang telah bersilangan memisahkan diri.

Pada metafase I, benang gelendong mulai tampak. Pasangan kromosom masih berhubungan pada kiasma dan bergerak menuju bidang ekuator; dan sentromer akan terikat pada benang gelendong. Sentromer tampak tidak terletak pada bidang ekuator, melainkan terletak segaris pada kedua sisi bidang ekuator.

Anafase I dimulai dengan memisahkan pasangan kromosom dan bergerak menuju kutub yang berlawanan. Oleh karena adanya pertukaran bagian-bagian dari kromatid selama pindah silang maka kromatid tidak sama (identik) lagi. Artinya gen yang berada pada masing-masing kromatid sudah berbeda susunannya.

Pada telofase I kromosom berkumpul pada setiap kutub, dan sel membelah membentuk dua sel yang haploid ( $n$ ). Selaput inti dan anak inti mulai tampak lagi.

## 2. Meiosis II

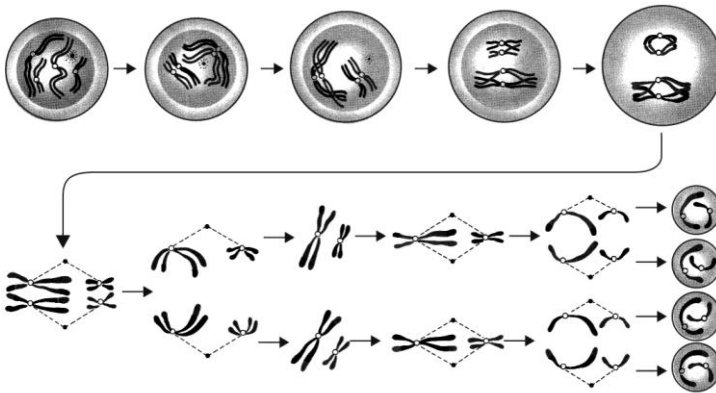
Pada permulaan meiosis II ini (profase II), kromatid masih terikat pada sentromer. Pembelahan selanjutnya sama halnya yang terjadi pada mitosis: selaput inti dan anak inti hilang pada akhir fase Profase II ini.

Pada metafase II benang gelendong tampak dan pasangan kromosom bergerak ke arah bidang ekuator dengan sentromer terletak pada bidang ekuator.

Pada anafase II, sentromer membelah dan berpisah. Selanjutnya, kromatid menjadi kromosom anak inti dan menuju ke kutub yang berlawanan.

Pada telofase II, kromosom secara lengkap telah terpisah dan terbentuklah empat anak inti dengan selaput inti dan anak inti, yang selanjutnya sel memasuki fase interfase.

Sebagai hasil akhir dari meiosis ialah bahwa materi genetik pada sel diploid telah mengalami sekali replikasi dan dua kali pembelahan sehingga pada akhirnya dihasilkan sel anak yang masing-masing mempunyai setengah jumlah kromosom yang dimiliki oleh sel diploid.



Gambar 1.17.  
Diagram Meiosis

Meiosis berbeda dengan mitosis dalam 3 hal berikut ini.

- a. Meskipun materi genetika mengalami sekali replikasi, terdapat pula dua pembelahan inti yang akhirnya menghasilkan 4 inti anak.
- b. Masing-masing anak inti tersebut di atas adalah haploid ( $n$ ), yang mengandung setengah dari jumlah kromosom induk diploid ( $2n$ ).
- c. Inti anak yang dihasilkan melalui meiosis mengandung kombinasi kromosom baru akibat adanya peristiwa pindah silang.

## C. GAMETOGENESIS DAN FERTILISASI

Pembentukan gamet (gametogenesis) pada hewan dan tumbuhan pada dasarnya sama, yaitu melibatkan pembelahan meiosis. Untuk dapat memahami lebih lanjut tentang pembelahan sel tersebut, di bawah ini akan dibahas mengenai *spermatogenesis* dan *oogenesis* pada hewan atau manusia, dan *mikrosporogenesis* dan *megasporogenesis* pada tumbuhan.

### 1. Spermatogenesis dan Oogenesis

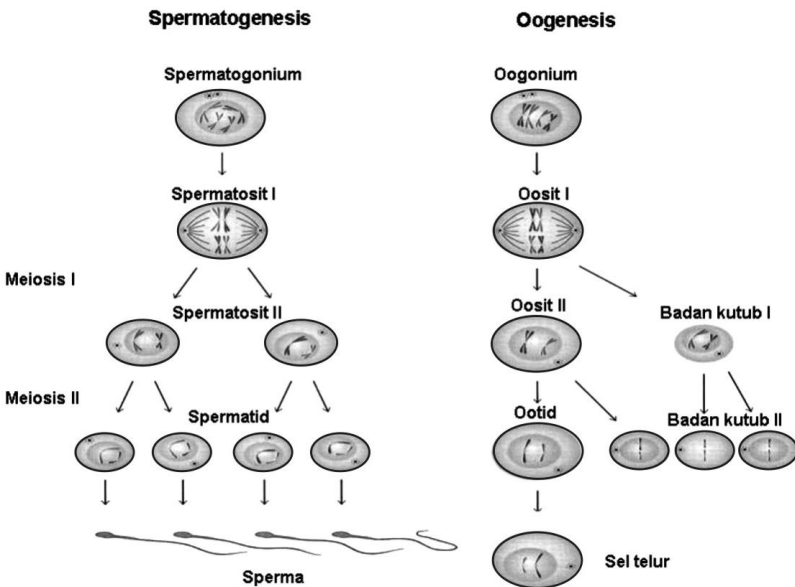
#### a. *Spermatogenesis*

Sebagai contoh pembentukan sperma (spermatogenesis) kita akan mengambil manusia. Sel tubuh manusia mempunyai kromosom berjumlah 46 kromosom, yaitu merupakan sel yang diploid ( $2n$ ). Pada testes terdapat spermatogonia, sel-sel yang bakal membentuk sperma, dan merupakan sel diploid pula. Sel-sel baru dihasilkannya melalui pembelahan mitosis, dan akan segera menjadi spermatosit I (spermatosit primer). Selanjutnya, sel-sel tersebut akan mengalami pembelahan secara meiosis. Dari hasil meiosis I akan dihasilkan 2 sel spermatosis II (spermatosis sekunder). Kemudian spermatosis II akan mengalami pembelahan meiosis II dan menghasilkan 4 spermatid. Spermatid tersebut sekarang memiliki jumlah kromosom yang haploid ( $n$ ), yang selanjutnya akan membentuk sperma dengan kromosom haploid (Gambar 1.18).

### 2. Oogenesis

Pada ovarium terdapat *oogonia*, sel-sel yang nantinya akan membentuk sel telur. Oogonium mempunyai kromosom diploid ( $2n$ ). Beberapa dari sel-sel tersebut di atas akan membentuk **oosit I (oosit primer)** melalui pembelahan mitosis, yang selanjutnya akan mengalami pembelahan meiosis

seperti halnya terjadi pada spermatogenesis. Akan tetapi, di sini ada perbedaan dasar, yaitu sitoplasma membagi tidak sama sehingga dihasilkan satu sel besar dan satu sel kecil. Dari hasil pembelahan meiosis I dihasilkan sebuah **oosit II**, dan sebuah **badan kutub I** yang sangat kecil ukurannya. Kemudian melalui pembelahan meiosis II dari oosit II tersebut akan dihasilkan sebuah **ootid**, yang ukurannya sebesar oosit I, dan sebuah **badan kutub II**. Badan kutub I akan membelah menjadi 2 buah badan kutub II. Sehingga akan dihasilkan 3 buah badan kutub II. Ketiga badan kutub II tersebut akan mengalami degenerasi dan akhirnya hilang sehingga sama sekali tidak mempunyai peran pada reproduksi. Dari spermatogenesis dan oogenesis diperoleh sperma dan sel telur haploid dengan jumlah kromosom setengah dari sel induk.



Gambar 1.18.  
Spermatogenesis dan Oogenesis

### Mikrosporogenesis dan Makrosporogenesis

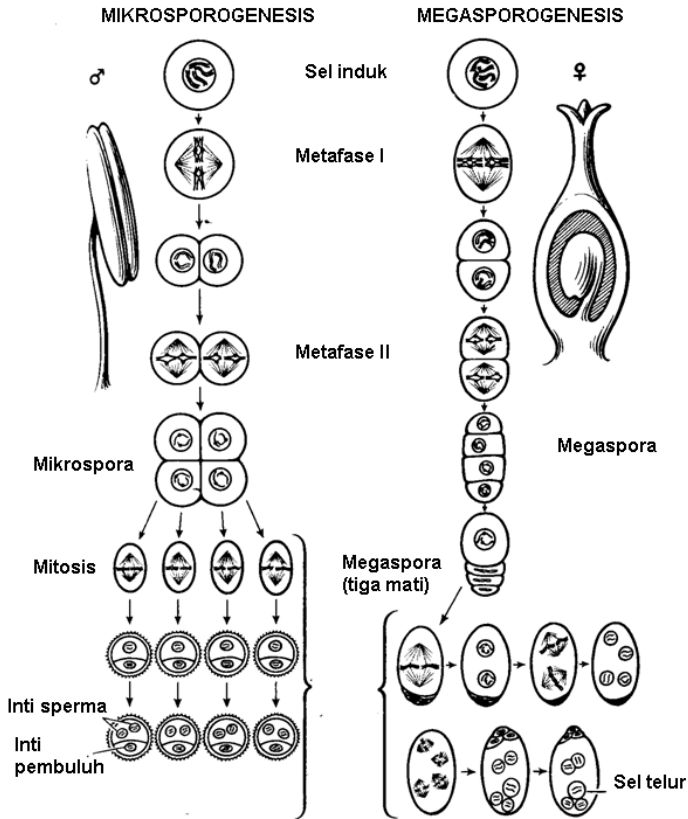
#### a) Mikrosporogenesis

Pembentukan gamet pada tumbuhan, terutama pada tumbuhan tinggi, pada dasarnya mengalami pembelahan meiosis yang sama

dengan yang terjadi pada hewan (Gambar 1.19). Akan tetapi, pada tumbuhan akan terjadi dua atau lebih pembelahan mitosis setelah pembelahan meiosis II. Pada mikrosporogenesis setelah terjadi pembelahan meiosis II dihasilkan 4 buah *mikrospora* yang tersusun dalam tetrad, yang mempunyai kromosom haploid ( $n$ ). Masing-masing mikrospora membelah diri menjadi dua buah sel dan diselubungi dengan dinding tebal yang disebut butir **serbuk sari**. kedua sel pada butir serbuk sari dinamakan **sel generatif** dan **sel tabung**, yang sudah tentu mempunyai kromosom haploid pula. Pada saat terjadi penyerbukan, butir serbuk sari akan mengalami pembelahan mitosis, dan dari sel generatif akan terbentuk sel sperma yang siap untuk memasuki tahap fertilisasi. Bagaimana dengan halnya yang terjadi pada megasporogenesis?

b) Megasporogenesis

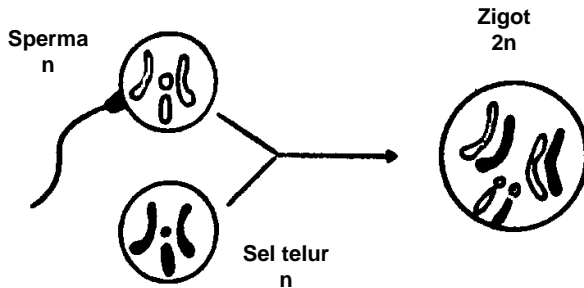
Setelah mengalami pembelahan meiosis II dihasilkan 4 buah *megaspora* yang tersusun dalam tetrad dan tersusun memanjang. Megaspora mempunyai kromosom haploid. Tiga dari 4 megaspora mengalami degenerasi dan hilang, sedangkan 1 megaspora akan tumbuh menjadi besar. Selanjutnya, dalam megaspora tersebut akan terjadi pembelahan mitosis tiga kali dan menghasilkan delapan buah inti haploid, yang mengelompok menjadi dua kelompok masing-masing terdiri dari 4 inti. Kedua kelompok inti kemudian akan bergerak ke kutub-kutub kantong embrio yang berlawanan. Setelah itu sebuah inti dari masing-masing kelompok inti akan bergerak ke tengah dan bergabung membentuk **inti-inti kutub**, dan selanjutnya dinamakan **sel tengah** yang berinti dua. Satu dari tiga inti yang terdapat pada salah satu kutub (pada mikrofil) menjadi **sel telur** haploid. Dua inti lagi akan menjadi **sel-sel sinergid**. Tiga buah inti kutub lain akan membentuk **sel-sel antipoda**.



Gambar 1.19.  
 Mikrosporogenesis dan Megasporogenesis

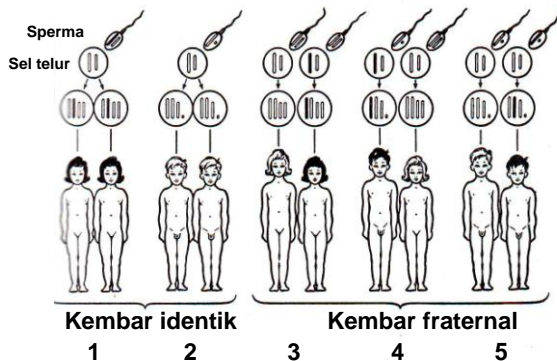
Akhir dari mikrosporogenesis dan megasporogenesis akan dihasilkan sperma dan sel telur yang haploid, melalui pembelahan mitosis dan meiosis.

Apabila sperma haploid dan sel telur haploid bergabung maka terjadi peristiwa fertilisasi, yang menghasilkan suatu zigot yang mempunyai jumlah kromosom diploid (Gambar 1.20).



Gambar 1.20.  
Fertilisasi

Dari proses mitosis, meiosis dan fertilisasi kita dapat mengetahui tingkah laku kromosom. Mengapa jumlah kromosom makhluk hidup cenderung sama jumlah kromosomnya, hal itu dapat dilihat dari proses fertilisasi tersebut. Ini berarti pula bahwa materi genetika telah diturunkan dari induk kepada turunannya. Pada akhir pembicaraan ini Anda dapat melihat penurunan materi genetika pada peristiwa anak kembar, kembar identik dan kembar fraternal (kembar sesaudara).



Gambar 1.21.  
Peristiwa Terjadinya Anak Kembar

Kembar identik berasal dari sebuah sel telur yang dibuahi dan membelah secara mitosis. Individu yang dihasilkan mempunyai materi genetika dengan jumlah kromosom yang sama pula (46 kromosom), sama yang berasal dari

kedua induknya. Dua kemungkinan jenis kelamin pada kembar identik ialah: keduanya laki-laki atau keduanya perempuan.

Lain halnya pada kembar fraternal, di mana lebih dari satu sel telur yang masing-masing dibuahi oleh sebuah sperma. Kembar semacam ini tidaklah berbeda dengan kakak beradik yang lahir beda waktu dan juga jenis kelaminnya. Karena itu, materi genetika yang dimiliki oleh masing-masing individu berbeda satu sama lain.



## LATIHAN

---

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Sebutkan fase-fase pada mitosis!
- 2) Sebagai hasil meiosis, sel anak mempunyai jumlah kromosom haploid. Jelaskan!
- 3) Apa sebab jumlah kromosom makhluk hidup cenderung tetap ( $2n$ )?
- 4) Bedakan materi genetika yang dimiliki oleh anak kembar identik dan kembar fraternal!

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Fase-fase pada mitosis, yaitu profase, metafase, anafase, telofase.
- 2) Antara dua mitosis ada interfase. Pada meiosis terjadi sekali replikasi dan dua kali pembelahan inti yang akhirnya menghasilkan 4 inti anak haploid.
- 3) Sel gamet (sel sperma dan sel telur) yang haploid akan menggabung (fertilisasi) dan menghasilkan zigot yang diploid ( $2n$ ), yang seterusnya berkembang menjadi individu yang diploid ( $2n$ ).
- 4) Anak kembar identik: masing-masing mempunyai materi genetika yang sama/identik. Anak kembar fraternal, yaitu masing-masing mempunyai materi genetika yang berbeda satu sama lain.



**RANGKUMAN**

---

Setiap jenis makhluk hidup cenderung memiliki jumlah kromosom yang sama dan berpasangan pada sel tubuh dan merupakan individu yang diploid ( $2n$ ). Pembelahan sel atau inti pada pembelahan mitosis menghasilkan dua sel anak yang masing-masing memiliki materi genetika yang sama dan sama pula dengan yang dimiliki oleh induk.

Mitosis secara umum terdiri dari fase: profase, metafase, anafase, dan telofase. Pada masing-masing fase tingkah laku kromosom dan gen tampak berbeda-beda. Dari meiosis dihasilkan gamet atau spora yang haploid ( $n$ ). Meiosis terdiri dari dua pembelahan inti, meiosis I dan II, yang ditandai dengan tingkah laku kromosom dan gen yang berbeda-beda pula.

Pembentukan mikrospora dan makrospora pada tumbuhan tinggi terjadi dua atau lebih pembelahan mitosis setelah pembelahan meiosis. Menggabungnya sperma dan sel telur yang haploid, ( $n$ ) disebut fertilisasi, menghasilkan zigot yang haploid ( $2n$ ), yang selanjutnya berkembang menjadi individu yang diploid.

**TES FORMATIF 2**

---

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Pada saat pembelahan mitosis, kromosom melekat pada benang gelendong di bagian ....
  - A. kromatid
  - B. sentromer
  - C. sentrosom
  - D. sentriol
  
- 2) Pada fase metafase dari mitosis, keadaan seperti berikut terjadi ....
  - A. semua pasangan kromosom berada pada bidang ekuator
  - B. dua perangkat kromosom anak telah terpisah dan bergerak ke arah kutub
  - C. selaput inti dan anak inti mulai tampak
  - D. kromosom tampak terdiri dari dua benang kromatid

- 3) Pernyataan berikut ini benar mengenai pembelahan mitosis, *kecuali* ....
  - A. membentuk sel anak yang memiliki materi genetika sama dengan induk
  - B. benang gelendong mengatur pergerakan kromosom ke kutub
  - C. menentukan jumlah sitoplasma pada sel anak
  - D. terjadi pada pembelahan sel tubuh dan spermatogenesis
  
- 4) Perbedaan penting antara metafase dan metafase I ialah bahwa ....
  - A. tampaknya benang gelendong pada sel
  - B. selaput inti dan anak inti hilang
  - C. jumlah kromosom yang ada pada sel
  - D. letak sentromer terhadap bidang ekuator.
  
- 5) Interfase merupakan fase yang terletak antara ....
  - A. profase dan metafase
  - B. dua mitosis yang berurutan
  - C. meiosis I dan meiosis II
  - D. metafase I dan anafase I
  
- 6) Kromosom diploid terdapat pada ....
  - A. spermatogonia
  - B. spermatid
  - C. spermatosit II
  - D. megaspora
  
- 7) Pada mikrosporogenesis diperoleh suatu sel yang berinti dua. Sel itu dinamakan ....
  - A. sel generatif
  - B. mikrospora
  - C. sel pembuluh
  - D. sel induk
  
- 8) Kembar identik terjadi bilamana ....
  - A. dua buah sel telur yang masing-masing dibuahi lebih dari satu sel sperma
  - B. dua buah sel sperma masing-masing membuahi satu sel telur
  - C. dua buah sel telur masing-masing dibuahi oleh satu sel sperma dan membelah secara mitosis
  - D. sebuah sel telur dibuahi oleh sebuah sel sperma dan membelah secara mitosis

- 9) Pada pembelahan sel terjadi peristiwa persilangan kromatid. Peristiwa ini terjadi pada fase ....
- A. profase I
  - B. profase
  - C. anafase I
  - D. telofase II
- 10) DNA mengalami duplikasi pada fase interfase, yaitu pada periode ....
- A. S
  - B. G<sub>1</sub>
  - C. G<sub>2</sub>
  - D. G<sub>3</sub>

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

## Kunci Jawaban Tes Formatif

### *Tes Formatif 1*

- 1) B. Tidak hanya persamaan sifat saja, melainkan juga perbedaannya.
- 2) D. Tujuan akhir dari pencarian bibit-bibit unggul adalah memenuhi keperluan pangan manusia, melalui A, B, dan C.
- 3) A. Dari penangkaran pada hewan dapat diketahui pola penurunan sifat dari induk kepada turunannya.
- 4) C. Syarat ini benar-benar memenuhi syarat pada percobaan penangkaran.
- 5) D. Ini mencakup semua syarat yang benar (A, B, dan C).
- 6) C. Merupakan jawaban yang paling tepat untuk dilakukan pada manusia, tidak saja A dan D. Jawaban B salah dan tak ada kaitannya sama sekali dengan permasalahan yang ditanyakan.
- 7) B. Bentuk morfologi inilah yang dapat diketahuinya, tidak mencakup susunan kimianya. Jawaban D tidak termasuk tujuan melalui sitologi.
- 8) C. Hanya melalui analisa biokimia hal itu dapat diketahui. Jawaban lainnya mungkin merupakan cara untuk mendukung tujuan tersebut.
- 9) D. Ini mencakup semua syarat yang benar (A, B, dan C).
- 10) C. Karena ini, pembastaran monohibrid, gamet adalah haploid.
- 11) B. Ingat istilah heterozigot.
- 12) C. Ingat gamet itu haploid, dan induk adalah heterozigot.
- 13) A
- 14) D
- 15) C
- 16) A
- 17) A

### *Tes Formatif 2*

- 1) B
- 2) A
- 3) C. Hal ini tidak ada sangkut pautnya dengan mitosis.
- 4) D. Ciri khas dari metafase ialah kromosom terletak pada bidang ekuator di bagian sentromer. Pada metafase I letak sentromer segaris pada kedua belah sisi bidang ekuator.

- 5) B. Fase ini disebut juga sebagai fase istirahat dari sel, dan terletak di antara dua mitosis.
- 6) A. Jawaban B, C, dan d hasil dari mitosis.
- 7) A
- 8) D
- 9) A. Hanya terjadi pada meiosis dan hanya pada profase I.
- 10) A. Periode ini merupakan periode sintesis.

## Glosarium

Alel	: gen untuk sifat khusus terletak pada suatu lokus tertentu pada sepasang kromosom homolog.
Daur sel(siklus sel)	: siklus pertumbuhan sebuah sel yang meliputi mitosis dan interfase.
Dominan	: sifat yang tampak penuh pada fenotip.
Epistasi	: interaksi dua gen sehingga salah satu gen menutup ekspresi fenotip gen lain.
Faktor	: sifat yang diturunkan menurut Mendel.
Fenotip	: sifat/karakter yang dapat diamati sebagai hasil interaksi antara genotip dan lingkungan.
Fertilisasi	: peleburan antara gamet jantan dan gamet betina.
Filial ke-1	: turunan pertama dari pembastaran dua individu.
Filial ke-2	: turunan kedua dari pembastaran dua individu; pembastaran antara $F_1 \times F_1$ .
Galur murni	: turunan yang selalu memiliki sifat yang sama dengan induk.
Gametogenesis	: pembentukan sel kelamin (gamet).
Gen	: satuan sifat turunan yang terletak pada kromosom; suatu urutan nukleotida pada molekul DNA yang mengkode suatu polipeptida.
Genotip	: susunan genetik (gen) dari suatu individu.
Heterozigot	: sebuah sel atau suatu organisme yang mempunyai dua alel beda pada lokus/kedudukan tertentu pada kromosom homolog.
Hipostasi	: interaksi antara dua gen sehingga salah satu gen tertutup ekspresinya.
Homozigot	: sebuah sel atau suatu organisme yang mempunyai dua alel sama pada

	lokus/kedudukan tertentu pada kromosom homolog.
Intermediet	: penampilan fenotip antara dua gen yang menunjukkan tidak ada faktor dominan.
Kembar fraternal	: kembar yang berkembang dari dua ovum yang dibuahi oleh masing-masing satu sperma
Kembar identik	: kembar yang berkembang dari sebuah ovum yang telah dibuahi, menghasilkan dua embrio yang selanjutnya menjadi dua individu.
Kombinasi parental	: susunan gen dari turunan hasil persilangan yang mempunyai sifat sama (genotip) dengan induk.
Kromatid	: salah satu dari dua hasil duplikasi kromosom yang tampak pada mitosis dan meiosis.
Meiosis	: suatu bentuk pembelahan sel ( $2n$ ), yang akan menghasilkan gamet ( $n$ ).
Mitosis	: bentuk pembelahan sel ( $2n$ ) yang berhubungan dengan pertumbuhan sel, dan akan menghasilkan dua anak sel ( $2n$ ) yang identik.
Oogenesis	: pembentukan gamet betina.
Parental	: sifat seperti Induk.
Pemisahan gen secara bebas	: pada pembentukan gamet distribusi sepasang alel tidak berpengaruh pada distribusi terhadap pasangan alel lain, apabila tidak dalam keadaan berpautan.
Rekombinasi	: suatu kelompok susunan gen yang beda dengan susunan gen pada induk, terbentuk melalui peristiwa pindah silang.
Resesif	: suatu sifat/gen yang tidak terekspresi pada fenotip bila ada sifat/gen yang dominan.
Segregasi	: pemisahan kromosom homolog, termasuk alel, menuju ke gamet.
Spermatogenesis	: pembentukan gamet jantan.

## Daftar Pustaka

Ayala, F. J. and Kiger, J. A. (1984). *Modern Genetics*. 2<sup>nd</sup> ed. Menlo Park: The Benjamin/Cunning Publ. Co., Inc.

Gardner, E. J., Simmons, M. J., and Snustad, D. P. (1991). *Principles of Genetics*. 8<sup>th</sup> ed. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc.

Suryo, (1994). *Genetika Strata 1*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Weaver, R. F., and Hedrick, P. W. (1992). *Genetics*. 2<sup>nd</sup> ed. Dubuque: Wm. C. Brown Publ.