

Pembelajaran 4: Genetika dan Pewarisan Sifat

Sumber: Modul Pengembangan Keprofesian Berkelanjutan (PKB)

Modul KK D dan F, Genetika dan Pewarisan Sifat

Penulis: Any Suhaeny, M. Si

A. Kompetensi

Setelah mempelajari materi Genetika dan Pewarisan Sifat, peserta diharapkan menguasai kompetensi sebagai berikut:

1. Memahami Hukum Mendel I dan II dalam pewarisan sifat
2. Menguasai macam-macam interaksi gen dalam pewarisan sifat

B. Indikator Pencapaian Kompetensi

1. Menjelaskan struktur dan fungsi kromosom, Gen, DNA, dan RNA
2. Membedakan DNA dan RNA
3. Menjelaskan proses sintesis protein
4. Menjelaskan kode genetik
5. Menjelaskan hukum mendel dalam proses pewarisan sifat;
6. Menerapkan hukum Mendel I dan II secara teoritis dalam persilangan tumbuhan;
7. Menentukan macam-macam interaksi gen yang terjadi pada makhluk hidup;
8. Menerapkan interaksi gen dalam dalam persilangan;
9. Menjelaskan pola pewarisan sifat pada makhluk hidup berdasarkan Hukum Mendel

C. Uraian Materi

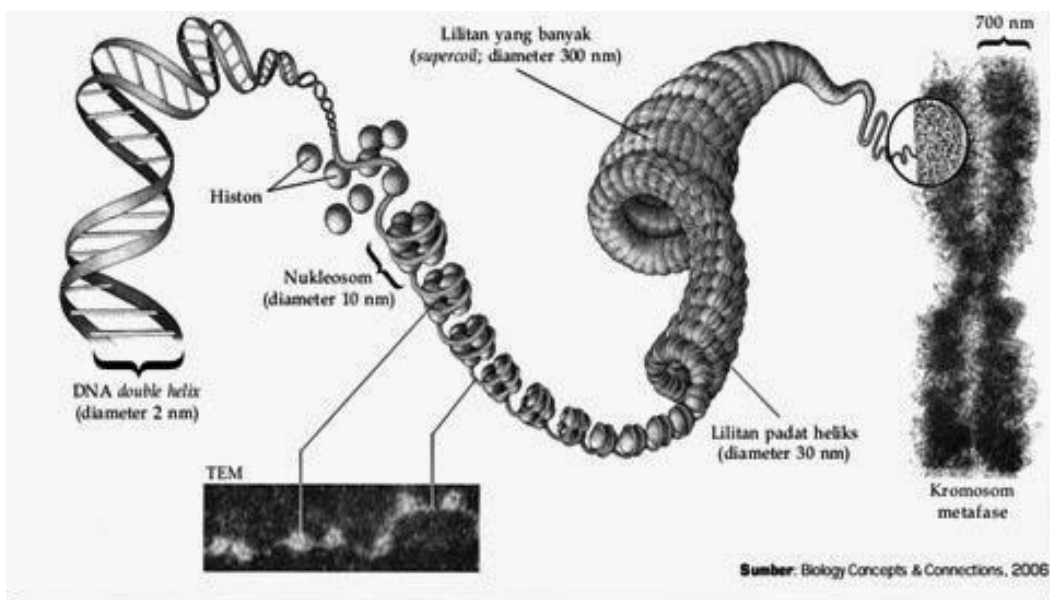
1. Materi Genetika

1. Kromosom, Gen, dan DNA

Kromosom adalah suatu struktur makromolekul yang tersusun dari DNA dan molekul lain di mana informasi genetik tersimpan sel (Gambar 125). Kromosom

Modul Belajar Mandiri

terdiri atas dua bagian, yaitu sentromer yang merupakan pusat kromosom berbentuk bulat dan lengan kromosom (arm) yang mengandung kromonema & gen berjumlah dua buah (sepasang). Sifat-sifat kromosom adalah: (a). Hanya terlihat pada waktu sel membelah. (b). Mempunyai ukuran panjang antara 0,2 – 40 m (mikron). (c). Kromosom pada sel prokariotik hanya memiliki satu kromosom dan tidak terletak di dalam inti sel. (d). Kromosom sel eukariotik, jumlahnya bervariasi menurut jenis organisme dan terdapat di dalam nukleus. (e). Umumnya memiliki susunan kimia yang terdiri dari protein, DNA, dan RNA. (f). Protein terdiri dari histon dan nonhiston. (g). Memiliki beberapa enzim yang terlibat dalam sintesis DNA dan RNA.



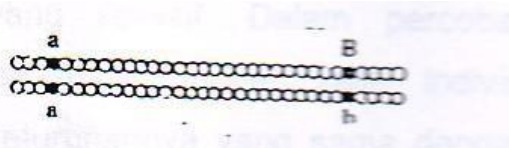
Gambar 53. Hubungan DNA dengan Kromosom
Sumber : Campbell, et al 2006

Gen merupakan unit hereditas suatu organisme hidup, dan tersimpan dalam kedudukan tertentu pada kromosom. Gen ini berupa kode dalam material genetik organisme, yang kita kenal sebagai molekul DNA, atau RNA pada beberapa virus. Ekspresi gen dipengaruhi oleh lingkungan internal atau eksternal seperti perkembangan fisik atau perilaku dari organisme itu. Gen berupa daerah urutan basa nukleotida baik yang mengkode suatu informasi genetik (ekson) dan juga daerah yang tidak mengkode informasi genetik (intron). Hal ini penting untuk pembentukan suatu protein yang fungsinya diperlukan di tingkat sel, jaringan, organ atau organisme secara keseluruhan.

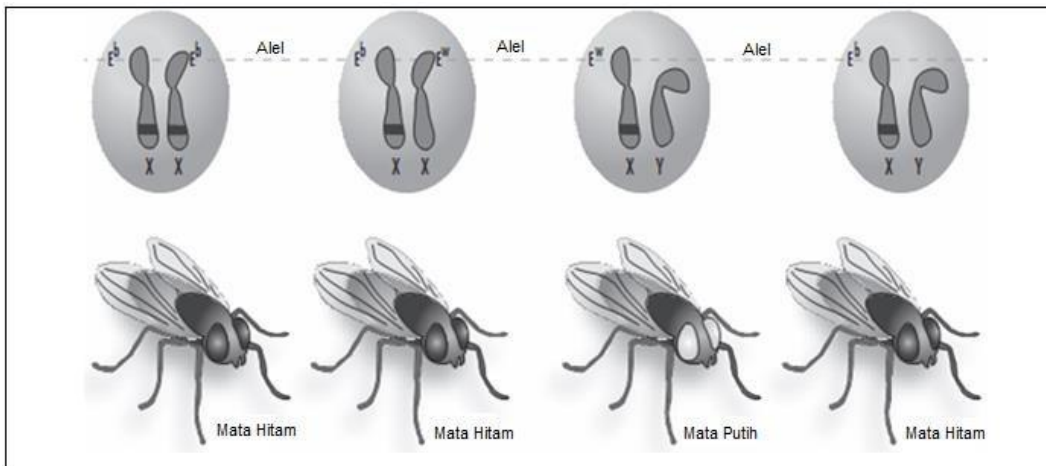
Kromosom secara sederhana dapat diibaratkan dengan untaian manik-manik. Untaian manik-manik diibaratkan kromosom, dengan manik-manik sebagai gen. Untaian manik-manik yang serupa dapat menjadi pasangannya yang homolog (Tabel 1). Gen-gen pada posisi yang sama (lokus) di sepasang kromosom yang homolog tersebut menentukan sifat makhluk hidup.

Gen yang dominan (diberi simbol dengan huruf kapital) selalu muncul sebagai sifat yang nampak. Gen yang resesif (diberi simbol dengan huruf kecil) hanya bisa muncul sebagai sifat yang nampak bila berpasangan dengan gen yang resesif lagi. Jadi, genotip AA atau Aa akan muncul sebagai fenotip A. Sedangkan gen a hanya akan muncul sebagai fenotip a bila genotipnya aa. Organisme yang mempunyai dua gen yang sama pada satu lokus (AA atau aa) disebut homozigot, sedangkan yang mempunyai pasangan gen alternatif (Aa) disebut heterozigot. Gen alternatif (A atau a) disebut alel.

Tabel 3 Beberapa karakteristik pasangan kromosom homolog

<i>Diagram kromosom</i>	<i>Pasangan</i> 	
<i>Genotip</i>	<i>aa</i> <i>Homozigot</i>	<i>Bb</i> <i>Heterozigot</i>
<i>Status gen</i>	<i>Resesif</i>	<i>B = dominan</i> <i>b = resesif</i>
<i>Fenotip</i>	<i>a</i>	<i>B</i>

Sebuah alel adalah salah satu dari dua atau lebih bentuk-bentuk alternatif sebuah gen yang dapat berada pada satu lokus. Sebuah alel adalah salah satu bentuk varian gen pada lokus tertentu, atau lokasi, pada suatu kromosom. Alel berbeda menghasilkan variasi dalam pewarisan sifat seperti warna rambut, warna mata atau golongan darah. Seperti terlihat pada gambar 126 yang menggambarkan adanya varian gen untuk warna mata pada *Drosophila* sp.

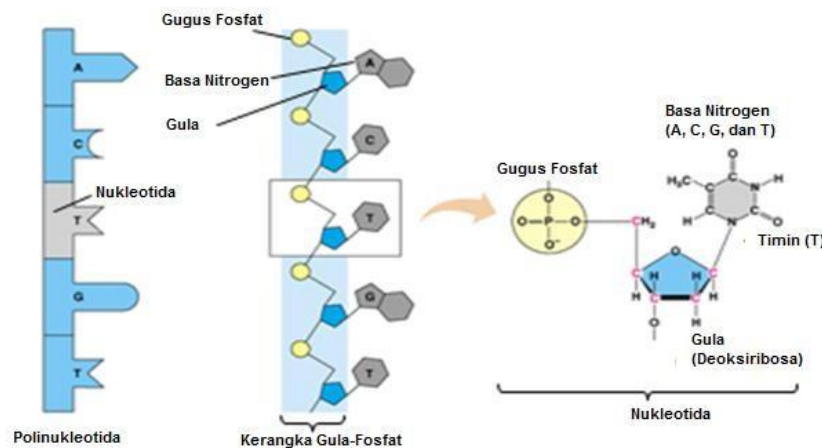


Gambar 54. Alel warna mata pada *Drosophila* sp.
Sumber: Campbell, et al, 2009

2. DNA dan RNA

DNA adalah suatu polimer yang dibangun dari empat jenis monomer yang berbeda yang dinamakan dengan nukleotida. Informasi yang dimiliki gen diwariskan dalam bentuk urutan nukleotida spesifik masing-masing gen. DNA (deoxyribo-nucleic acid, asam deoksiribo-nukleat) merupakan persenyawaan kimia yang paling penting pada makhluk hidup, yang membawa keterangan genetik dari sel khususnya atau dari makhluk hidup dalam keseluruhannya dari satu generasi ke generasi berikutnya. (Suryo, 2004:57). DNA merupakan suatu polimer nukleotida berupa rantai ganda yang berpilin (*double heliks*).

Molekul nukleotida terbentuk dari gula ribosa/deoksiribosa, basa nitrogen, dan gugus fosfat (gambar 127). Basa nitrogen terdiri atas purin (Adenin/A dan Guanin/G) dan Pirimidin (Sitosin/C dan Timin/T). A selalu berpasangan dengan T, C selalu berpasangan dengan G. Nukleotida diibaratkan sebuah tangga dimana: "Anak tangganya" adalah susunan basa nitrogen (A – T dan C – G) dan Kedua "ibutangganya" adalah gula ribose/deoksiribosa. Model DNA pertama kali dibuat pada tahun 1953 oleh James D. Watson dari Amerika Serikat dan Francis Crick dari Inggris, seperti terlihat pada gambar 127 di bawah.



Gambar 55. Nukleotida
Sumber: Campbell, et al, 2009

DNA mempunyai fungsi sebagai berikut: (a) Menyampaikan informasi genetik kepada generasi berikutnya, karena DNA mampu melakukan proses replikasi. (b) sebagai cetakan (template) untuk kode asam amino pada DNA/kodon. (c) Sebagai pengatur seluruh metabolisme sel.

3. Replikasi DNA

Replikasi DNA adalah suatu tahapan penggandaan DNA yang terjadi pada saat sebelum pembelahan sel (interfase tahap sintesis DNA). Replikasi dilakukan dalam upaya membentuk DNA yang sama pada sel hasil pembelahannya. Dalam proses replikasi DNA diperlukan enzim helikase, DNA polimerase, ligase, ATP, GTP, CTP dan TTP. Enzim helikase berfungsi sebagai pembuka rantai ganda heliks. Enzim DNA polimerase akan membentuk DNA baru dari satu rantai tunggal DNA. Enzim DNA ligase berperan dalam melekatkan setiap fragmen Okazaki yang merupakan rantai pasangan semula yang tidak berhubungan menjadi satu rantai yang utuh. Replikasi diawali dengan sintesis RNA primer. Arah replikasi 5'---- 3'

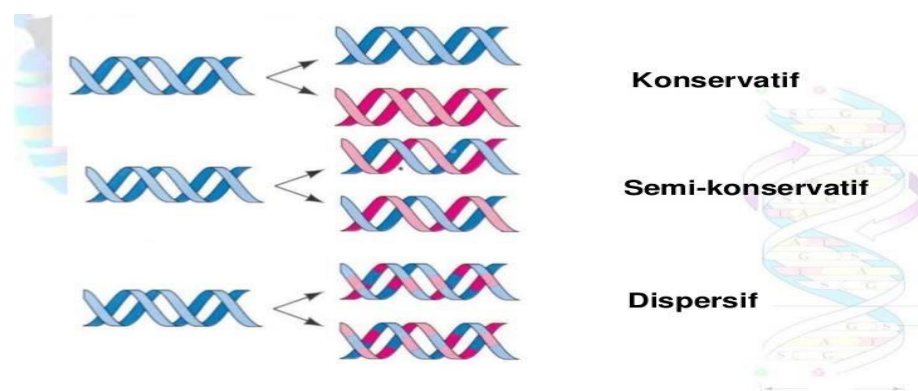
Beberapa model replikasi DNA, yaitu

a. Teori konservatif: Pita DNA rangkap heliks tidak berpisah, langsung menjadi cetakan bagi pita DNA baru. Akhirnya terbentuk dua pita rangkap heliks yang sama seperti asalnya .

b. Teori semi konservatif: Pita DNA rangkap heliks memisahkan diri menjadi dua pita tunggal yang berperan sebagai pola cetakan. Setiap pita lama membentuk pita baru pasangannya, akhirnya terbentuk dua pita rangkap heliks yang sama seperti asalnya.

c. Teori dispersive: Pita DNA heliks rangkap terputus-putus atas beberapa potongan. Setiap potongan berpola sebagai pola cetakan, membentuk DNA baru pasangannya. Akhirnya terbentuk pita rangkap heliks yang sama seperti asalnya.

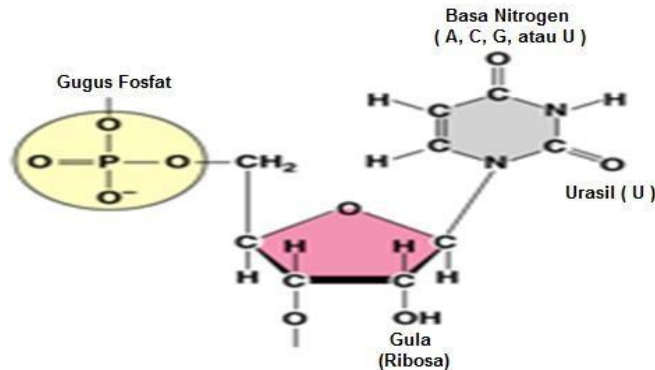
Penjelasan tentang model replikasi tersebut dapat dilihat pada gambar 128 berikut ini.



Gambar 56. Replikasi DNA
Sumber: Campbell et al, 2004

4. RNA

RNA merupakan polinukleotida, namun ukurannya jauh lebih pendek dari polinukleotida penyusun DNA (Gambar 129). RNA hanya terdiri dari satu rantai. Gula pentosa yang menyusun RNA adalah gula ribosa. Basa nitrogen yang menyusun RNA adalah: a. Purin yang terdiri dari adenin (A) dan guanin (G), b. Pirimidin yang terdiri dari sitosin (C) dan urasil (U) RNA dibentuk oleh DNA di dalam inti sel.



Gambar 57. Nukleotida RNA
Sumber : Campbel et al.,2004

a) Macam-Macam RNA

1) RNA messenger (RNA duta) berfungsi membawa informasi genetik dari DNA berupa pesan dari inti sel ke ribosom di sitoplasma. Pesan-pesan ini berupa triplet basa nitrogen yang ada pada RNA duta yang disebut kodon. Kodon pada RNA duta merupakan komplemen dari kodogen, yaitu urutan basa-basa nitrogen/nukleotida pada DNA yang dipakai sebagai pola cetakan. Peristiwa pembentukan RNA duta oleh DNA di dalam inti sel, disebut transkripsi. Contoh:

Kodogen (DNA) = ACG TGG ATA CCT

Kodon (triplet basa RNA d) = UGC ACC UAU GGA

2) RNA transfer (RNA pembawa asam amino dalam bentuk aminoasil tRNA). RNA pembawa berfungsi mengenali kodon dan menerjemahkan menjadi asam amino di ribosom. Penerjemahan kode pada mRNA oleh tRNA dikenal dengan nama translasi. Urutan basa nitrogen pada RNA transfer disebut antikodon. Bentuk RNA transfer seperti daun semanggi dengan 4 ujung yang penting, yaitu: 1) Ujung pengenal kodon yang berupa triplet basa yang disebut antikodon. 2) Ujung perangkai asam amino yang berfungsi mengikat asam amino. 3) Ujung pengenal enzim yang membantu mengikat asam amino. 4) Ujung pengenal ribosom. Contoh: Apabila kodon dalam RNA duta mempunyai

urutan UGC ACC UAU GGA maka antikodon yang sesuai pada RNA transfer adalah ACG UGG AUA CCU.

3) Ribosom RNA (RNAr) berfungsi sebagai tempat pembentukan protein. Ribosom terdiri dari 2 sub unit, yaitu: 1) Sub unit kecil yang berperan dalam mengikat RNA duta. 2) Sub unit besar yang berperan untuk mengikat RNA transfer yang sesuai.

5. Sintesis Protein

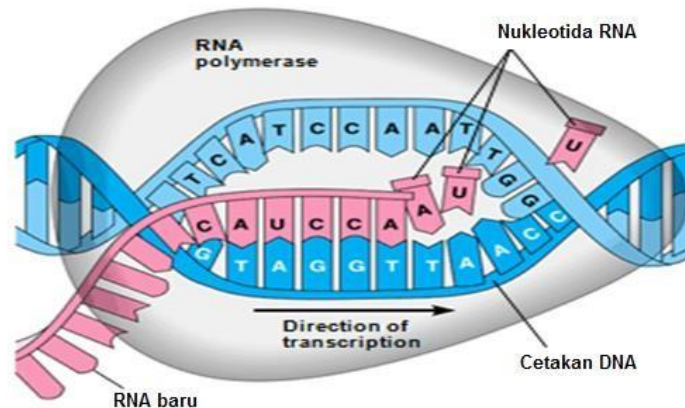
Sintesis protein merupakan suatu proses yang kompleks, termasuk di dalamnya penerjemahan kode-kode pada RNA menjadi polipeptida. Sintesis protein melibatkan DNA, RNA, ribosom, asam amino, dan enzim. Sintesis protein membutuhkan bahan dasar asam amino, dan berlangsung di dalam inti sel dan ribosom (sitoplasma).

Tahap-tahap sintesis protein dibagi menjadi 2 yaitu: Transkripsi dan Translasi

a. Transkripsi

- 1) Berlangsung dalam inti sel.
- 2) Dimulai dengan membukanya rantai DNA heliks ganda membentuk gelembung transkripsi. Dengan demikian RNA polimerase berikatan dengan DNA.
- 3) Pita DNA yang berfungsi sebagai pencetakan RNA disebut pita template atau antisense dan pita DNA yang tidak mencetak RNA disebut dengan pita sense.
- 4) Pita RNA dibentuk sepanjang pita DNA pencetak (template) dengan urutan basa nitrogennya komplementer dengan basa nitrogen yang ada pada pita cetakan DNA.
- 5) Pita RNA yang telah selesai menerima pesan genetik dari pita DNA pencetak segera meninggalkan inti nukleus menuju ke ribosom, tempat sintesis protein dalam sitoplasma. Pita RNA menempatkan diri pada leher ribosom.
- 6) RNA yang ada dalam sitoplasma bersiap-siap untuk berperan dalam proses translasi (sintesis protein).

Proses transkripsi lebih jelas dapat dilihat pada gambar 130 berikut ini.



Gambar 58. Proses Transkripsi
Sumber: Campbell et al., 2009

b. Translasi

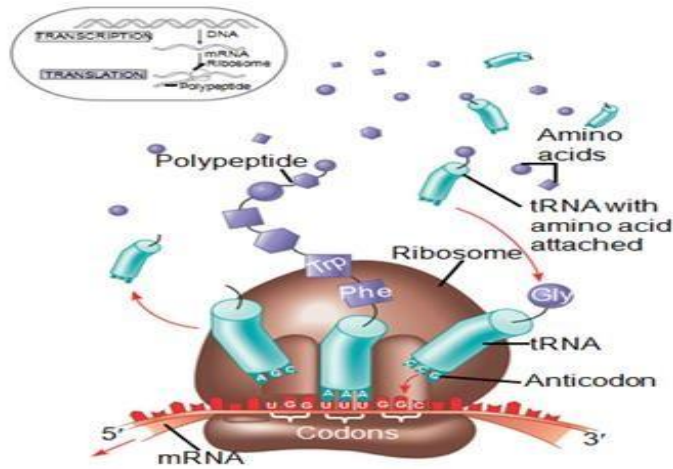
1) RNAd dan RNAt setelah sampai di ribosom selanjutnya tiga basa nitrogen pada antikodon RNAt berpasangan dengan tiga basa nitrogen pada kodon RNAd. Misalnya AUG pada kodon RNAd berpasangan dengan UAC pada antikodon RNAt, sehingga asam amino diikat oleh RNAt adalah metionin. Dengan demikian nama asam amino merupakan terjemahan dari basa-basa nitrogen yang ada pada RNAd.

2) Ribosom dengan RNAd bergerak satu kodon.

3) Sebuah asam amino ditambahkan pada rantai polipeptida.

4) Asam amino yang pertama (metionin) segera lepas dari RNAt kembali ke sitoplasma untuk mengulang fungsinya dengan cara yang sama. RNAt berikutnya datang untuk berpasangan dengan kodon RNAd berikutnya.

Proses keseluruhan ini berkesinambungan sampai terbentuk polipeptida tertentu yang terdiri dari asam amino dengan urutan basa nitrogen tertentu (Gambar 59).



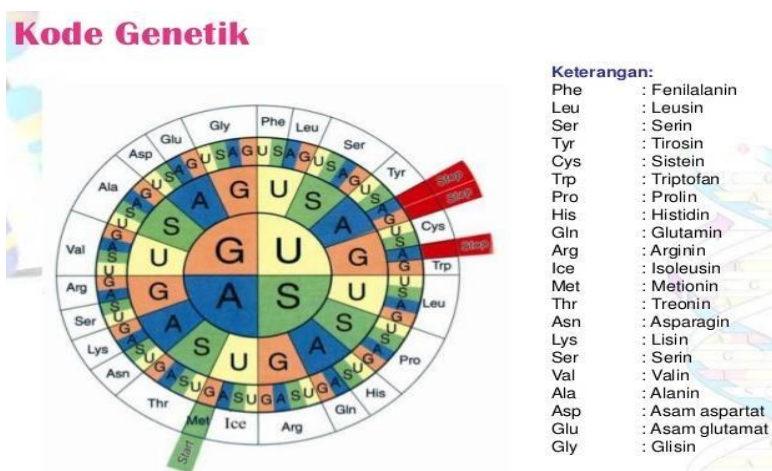
Gambar 59. Proses Translasi
Sumber: Campbell et al., 2009

6. Kode Genetik

Kode genetik, yaitu instruksi berupa kode-kode yang menentukan macam protein yang akan dibuat (Gambar 132). Instruksi melalui kode genetik berupa kodon pada RNA tersebut ditranskripsi dari DNA dengan bantuan RNA polimerase.

Ciri-ciri kodon menurut Nirenberg, dkk (1961), yaitu:

- Terdiri dari triplet, artinya 3 basa membentuk kodon
- Non overlapping, artinya susunan 3 basa pada kodon tidak dibaca ulang sebagai kodon berikutnya (tumpang tindih).
- Degenerate, artinya 1 asam amino mempunyai kodon lebih dari satu.
- Universal, artinya kode yang sama berlaku untuk semua makhluk hidup.



Gambar 60. Kode Genetika
(Sumber: Campbell et all, 2009)

Ciri khas protein ditentukan oleh jumlah asam amino, macam, dan urutan asam amino yang membangunnya. Umumnya terdapat 20 macam asam amino di alam yang akan membentuk protein sebagai kodon yang tersusun dari 4 macam basa nitrogen berjumlah 64. Dengan demikian terdapat kodon-kodon sinonim (degenerate), artinya satu asam amino dikode lebih dari satu kodon.

2. Pewarisan Sifat

1. Hukum Mendel

Johann Mendel lahir tanggal 22 Juli 1822 di kota kecil Heinzendorf di Silesia, Austria. (Sekarang kota itu bernama Hranice wilayah Republik Ceko.) Johann Gregor Mendel adalah orang yang sampai kini dianggap sebagai peletak dasar ilmu keturunan atau genetika. Semasa hidupnya, beliau senang melakukan percobaan di kebunnya untuk menyelidiki bagaimana sifat-sifat tanaman induk diturunkan kepada keturunannya. Hasil percobaannya diumumkan pada tahun 1865, dan sejak tahun itu ilmu tentang keturunan tumbuh dengan teori-teori yang lebih ilmiah.

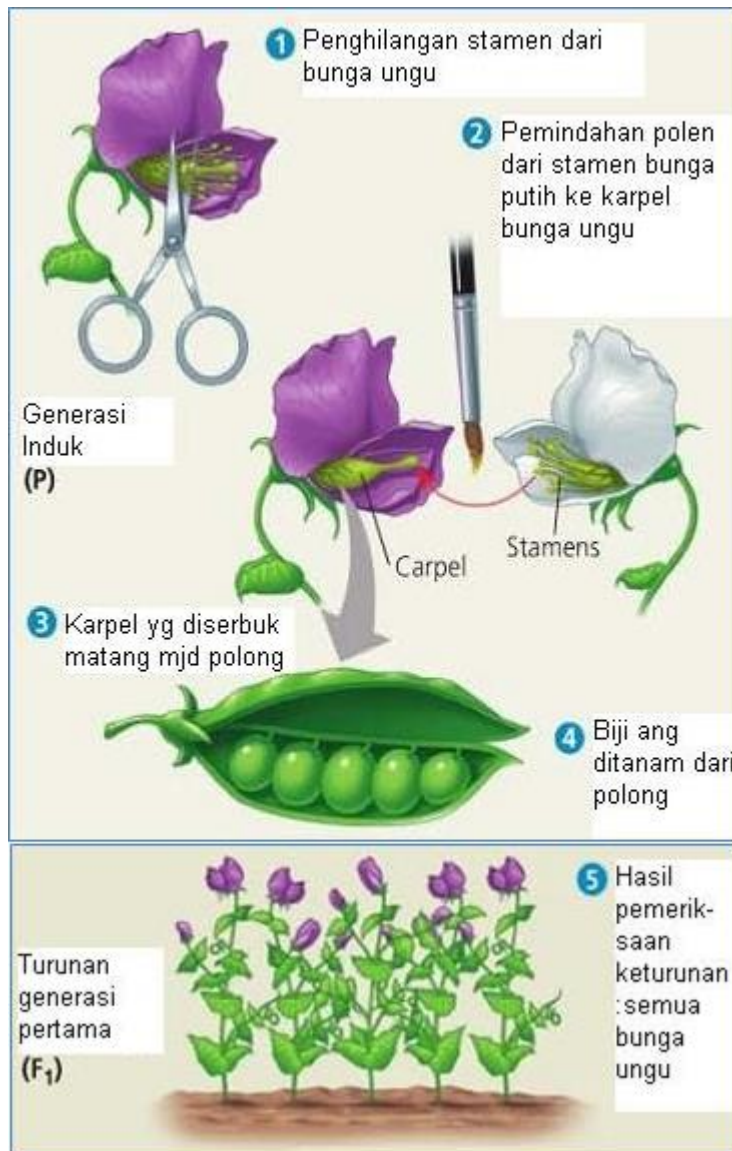


Gambar 61. Gregor Mendel

Eksperimen Mendel dimulai saat dia berada di biara Brunn didorong oleh keingintahuannya tentang suatu ciri tumbuhan diturunkan dari induk

Modul Belajar Mandiri

keturunannya. Jika misteri ini dapat dipecahkan, petani dapat menanam hibrida dengan hasil yang lebih besar. Prosedur Mendel merupakan langkah yang cemerlang dibanding prosedur yang dilakukan waktu itu. Mendel sangat memperhitungkan sifat atau karakter dari keturunan dan keturunan tersebut diteliti sebagai satu kelompok, bukan sejumlah keturunan yang istimewa.

















Gambar 62. Proses Penyilangan
Sumber: Campbell, et al. 2009

Dia juga memisahkan berbagai macam ciri dan meneliti satu jenis ciri saja pada waktu tertentu, tidak memusatkan perhatian pada tumbuhan secara keseluruhan. Dalam eksperimennya, Mendel memilih tumbuhan biasa, kacang polong,

sedangkan para peneliti lain umumnya lebih suka meneliti tumbuhan langka. Seperti pada gambar 4, Mendell melakukan penyilangan terhadap kacang polong. Dari berbagai hasil penelitiannya, Mendell mengidentifikasi tujuh ciri berbeda yang kemudian dia teliti seperti yang ditunjukkan dalam tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 4 Hasil penyilangan yang dilakukan oleh Mendel

Character	Dominant Trait	x	Recessive Trait	F ₂ Generation Dominant:Recessive	Ratio
Flower color	Purple 	x	White 	705:224	3.15:1
Flower position	Axial 	x	Terminal 	651:207	3.14:1
Seed color	Yellow 	x	Green 	6,022:2,001	3.01:1
Seed shape	Round 	x	Wrinkled 	5,474:1,850	2.96:1
Pod shape	Inflated 	x	Constricted 	882:299	2.95:1
Pod color	Green 	x	Yellow 	428:152	2.82:1
Stem length	Tall 	x	Dwarf 	787:277	2.84:1

Mendel menyilangkan tumbuhan tinggi dengan tumbuhan pendek dengan menaruh tepung sari dari yang tinggi pada bunga pohon yang pendek, demikian sebaliknya. Mendel mengharapkan bahwa semua keturunan generasi pertama hasil persilangan itu akan berupa pohon berukuran sedang atau separuh tinggi dan separuh pendek. Namun ternyata, semua keturunan generasi pertama berukuran tinggi.

Rupanya sifat pendek telah hilang sama sekali. Lalu Mendel membiarkan

keturunan generasi pertama itu berkembang biak sendiri menghasilkan keturunan generasi kedua. Kali ini, tiga perempat berupa tumbuhan tinggi dan seperempat tumbuhan pendek. Ciri-ciri yang tadinya hilang muncul kembali. Dia menerapkan prosedur yang sama pada enam ciri lain. Dalam setiap kasus, satu dari ciri-ciri yang berlawanan hilang dalam keturunan generasi pertama dan muncul kembali dalam seperempat keturunan generasi kedua.

Dari percobaan tersebut, Mendell melahirkan hukum mengenai pewarisan sifat yang dikenal dengan Hukum Mendel. Hukum ini terdiri dari dua bagian:

1. Hukum pemisahan (*segregation*) dari Mendel, juga dikenal sebagai **Hukum Pertama Mendel**,
2. Hukum berpasangan secara bebas (*independent assortment*) dari Mendel, juga dikenal sebagai **Hukum Kedua Mendel**.

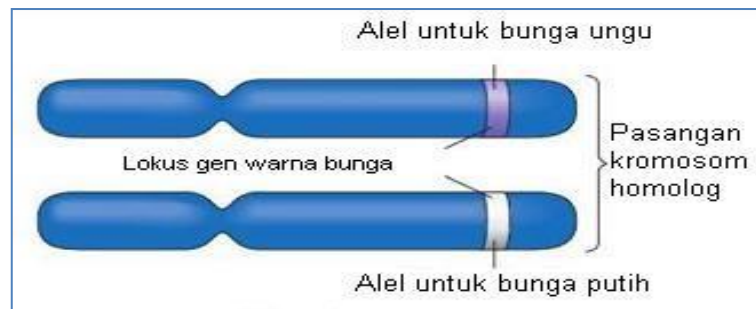
3. Hukum Mendel

a. Hukum Mendel Pertama

Mendel menarik beberapa kesimpulan dari hasil penelitiannya. Dia menyatakan bahwa setiap ciri dikendalikan oleh dua macam informasi, satu dari sel jantan (tepung sari) dan satu dari sel betina (indung telur di dalam bunga). Kedua informasi ini (kelak disebut pembawa sifat keturunan atau gen) menentukan ciri-ciri yang akan muncul pada keturunan. Sekarang, konsep ini disebut Hukum Mendel Pertama yaitu Hukum Segregasi Bebas. Hukum segregasi bebas menyatakan bahwa pada pembentukan gamet, kedua gen yang merupakan pasangan alel itu akan memisah sehingga tiap-tiap gamet menerima satu gen dari alelnya.

Secara garis besar, hukum ini mencakup tiga pokok:

- 1) Gen memiliki bentuk-bentuk alternatif yang mengatur variasi pada karakter yang sama. Ini adalah konsep mengenai alel.
- 2) Setiap individu diploid ($2n$) memiliki sepasang gen, satu dari induk jantan dan satu dari induk betina.
- 3) Jika sepasang gen ini merupakan dua alel yang berbeda, alel dominan akan terekspresikan. Alel resesif yang tidak terekspresikan, tetap akan diwariskan pada gamet yang dibentuk.



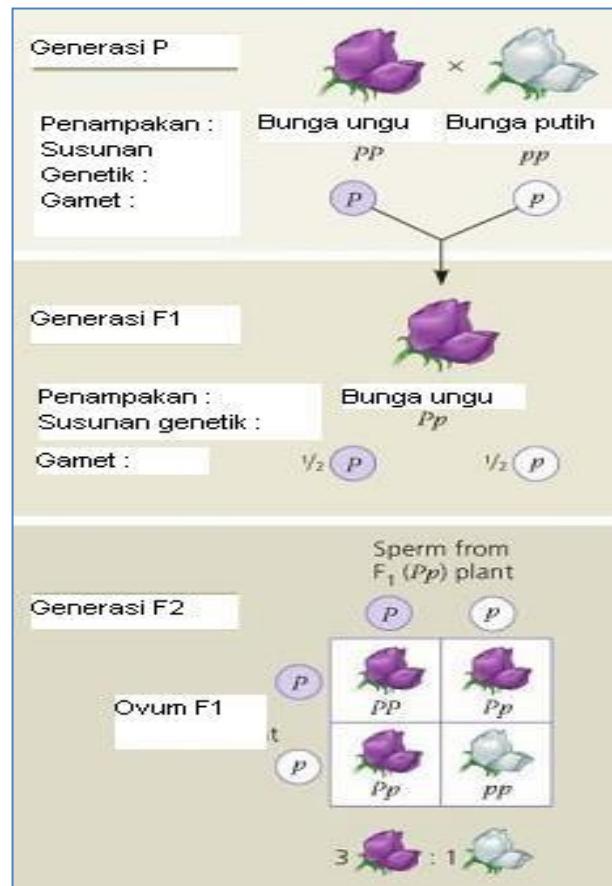
Gambar 63. Alel pada warna bunga.

Alel untuk warna bunga berada pada lokus gen yang sama pada pasangan kromosom homolog.

Untuk setiap ciri yang diteliti oleh Mendel dalam kacang polong, ada satu ciri yang dominan sedangkan lainnya resesif. Induk galur murni dengan ciri dominan mempunyai sepasang gen dominan (PP) dan dapat memberi hanya satu gen dominan (P) kepada keturunannya. Induk galur murni dengan ciri yang resesif mempunyai sepasang gen resesif (pp) dan dapat memberi hanya satu gen resesif (p) kepada keturunannya. Maka keturunan generasi pertama menerima satu gen dominan dan satu gen resesif (Pp) dan menunjukkan ciri-ciri gen dominan. Bila keturunan ini berkembang biak sendiri menghasilkan keturunan generasi kedua, sel-sel jantan dan betina masing-masing dapat mengandung satu gen dominan (P) atau gen resesif (p). Oleh karenanya, ada empat kombinasi yang mungkin: PP, Pp, pP dan pp. Tiga kombinasi yang pertama menghasilkan tumbuhan dengan sifat dominan, sedangkan kombinasi terakhir menghasilkan satu tumbuhan dengan sifat resesif.

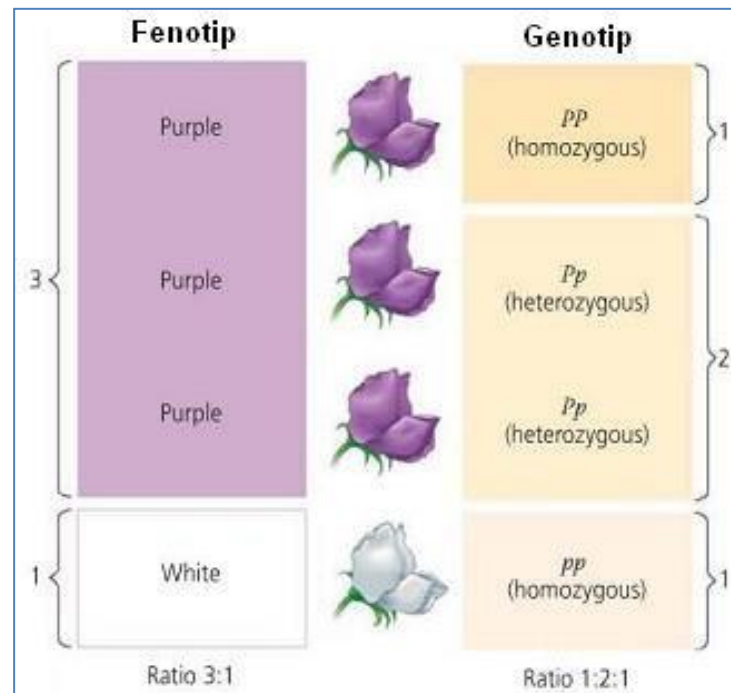
Percobaan Mendel yang dipaparkan adalah satu contoh persilangan monohybrid (gambar 136). Hasil dari percobaan ini menunjukkan sifat warna ungu dominan terhadap sifat warna putih. Oleh karena itu, simbol sifat ini dilambangkan dengan P (huruf pertama dari purple) untuk yang dominan dan p untuk yang resesif. Dalam percobaan ini, Mendel menggunakan individu dari galur murni, yaitu individu yang selalu menurunkan sifat kepada keturunannya yang sama dengan sifat induknya. Sifat ini dimungkinkan jika individu itu homozigot. Ketika pembentukan gamet (sel kelamin), kromosom terpisah dari pasangannya, sehingga tiap gamet hanya memiliki setengah dari jumlah kromosom yang

dimiliki individu.



Gambar 64. Persilangan Monohybrid
Sumber : Campbell, et al. 2009

Dengan demikian setiap gamet memperoleh gen separuh dari jumlah yang dimiliki individu. Jadi, setiap gamet memiliki satu lambang, yaitu P atau p. Oleh karena itu genotip semua keturunan pertama (F1) adalah Pp sehingga sifatnya yang nampak (terekspresikan) adalah warna ungu. Untuk memperoleh keturunan kedua (F2), dilakukan perkawinan sesama keturunan pertama (F1). Genotip dari semua keturunan pertama adalah Pp, sehingga genotip pada masing-masing gamet (♂ dan ♀) adalah P dan p. Gamet ini akan menghasilkan keturunan kedua (F2) dengan genotip PP (25%), Pp (50%), dan pp (25%) dan fenotip F2 adalah warna bunga ungu (75%) dan putih (25%) seperti yang terlihat pada gambar 137 berikut ini.



Gambar 65. Rasio Genotip dan Fenotip pada Persilangan Monohibrid
Sumber : Campbell, et al. 2009

b. Hukum Mendel Kedua

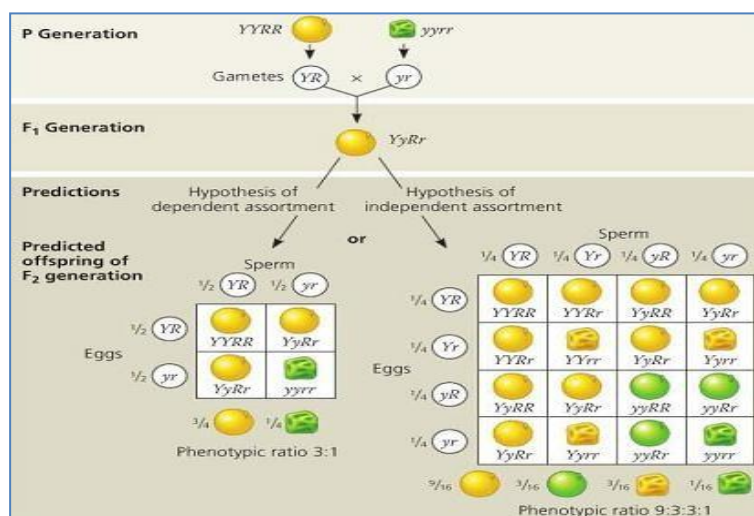
Kemudian Mendel meneliti dua ciri sekaligus, yakni bentuk biji (bulat atau keriput) dan warna biji (kuning atau hijau). Dia menyilang tumbuhan yang selalu menunjukkan ciri-ciri dominan (bentuk bundar dan warna kuning) dengan tumbuhan berciri terpendam (bentuk keriput dan warna hijau). Sekali lagi, ciri terpendam tidak muncul dalam keturunan generasi pertama. Jadi, semua tumbuhan generasi pertama mempunyai benih kuning bulat. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa ada 16 kombinasi gen pada keturunan ke dua (F₂). Dari 16 kombinasi ini, bulat kuning ada 9, bulat hijau ada 3, kisut kuning ada 3, dan kisut hijau ada 1. Dengan demikian perbandingan kuning : bulat hijau : kisut kuning : kisut hijau adalah 9 : 3 : 3 : 1. Perbandingan ini akan terpenuhi pada pembastaran dihibrid jika dua sifat tanda beda dalam keadaan dominan penuh dan kedua gen tersebut tidak terpaut satu sama lain.

Kacang polong yang semuanya bulat dan kuning pada turunan pertama menunjukkan bahwa sifat bulat dominan terhadap kisut dan kuning dominan

terhadap hijau. Jadi kacang polong yang berbiji bulat kuning dapat dilambangkan dengan YYRR dan yang kisut hijau dengan yyrr.

Mendel mengecek hasil ini dengan kombinasi dua ciri lain. Perbandingan yang sama muncul lagi. Perbandingan 9 : 3 : 3 : 1 menunjukkan bahwa kedua ciri tidak saling tergantung, sebab perbandingan 3 : 1 untuk satu ciri bertahan dalam setiap subkelompok ciri yang lain, dan sebaliknya. Dalam pembentukan gamet, gen-gen membentuk kombinasi secara bebas. Hal ini menunjukkan bahwa sepasang gen tidak dipengaruhi oleh pasangan gen lainnya. Peristiwa ini biasa disebut hukum Mendel II atau hukum berpasangan secara bebas.

Hukum kedua Mendel menyatakan bahwa bila dua individu mempunyai dua pasang atau lebih sifat, maka diturunkannya sepasang sifat secara bebas, tidak bergantung pada pasangan sifat yang lain. Dengan kata lain, alel dengan gen sifat yang berbeda tidak saling mempengaruhi. Hal ini menjelaskan bahwa gen yang menentukan seperti tinggi tanaman dengan warna bunga suatu tanaman, tidak saling mempengaruhi. Eksperimen Mendel (gambar 138) menunjukkan bahwa ketika tanaman induk membentuk sel-sel reproduksi jantan dan betina, semua kombinasi bahan genetik dapat muncul dalam keturunannya, dan selalu dalam proporsi yang sama dalam setiap generasi. Informasi genetik selalu ada meskipun ciri tertentu tidak tampak di dalam beberapa generasi karena didominasi oleh gen yang lebih kuat. Dalam generasi kemudian, bila ciri dominan tidak ada, ciri resesif itu akan muncul lagi.



Gambar 66. Persilangan Dhibri
Sumber: Campbell, et al. 2009

1. Polihybrid

Polihybrid adalah persilangan dua individu yang sejenis dengan tiga sifat beda atau lebih. Apakah prinsip-prinsip Mendel juga berlaku pada polihybrid? Pada dasarnya polihybrid sama dengan dihibrid. Sebagai contoh, persilangan individu dengan tiga sifat beda, yang dinyatakan dengan AABbCC dominan terhadap aabbcc. Keturunan F1 memiliki genotip yang sama yaitu AaBbCc. Kemungkinan kombinasi gen pada gamet-gamet yang dihasilkannya adalah: ABC, ABc, Abc, abc, aBC, abC, AbC, abc. Jadi diperoleh 8 macam kombinasi gen pada gamet-gamet. Dengan demikian, jika gamet-gamet ini mengadakan persilangan di antara sesamanya maka akan dihasilkan 82 kombinasi gen pada F2, yaitu 64 macam kombinasi.

Berapa macam kombinasi gen pada gamet-gamet yang dihasilkan F1, dan berapa jumlah kombinasi gen yang terjadi pada F2 jika terjadi persilangan antara sesama F1 secara matematik dapat kita ramalkan sebagai berikut. Jumlah sifat beda dinyatakan dengan angka pangkat dari bilangan pokok 2. Misalnya, macam kombinasi gen pada gamet-gamet yang dihasilkan F1 pada 3 sifat beda adalah 23 yaitu 8 macam kombinasi gen. Dengan demikian kombinasi gen pada F2 hasil persilangan antara sesama F1 adalah 82 yaitu 64 kombinasi. Tabel 2 di bawah ini menunjukkan kemungkinan kombinasi gen yang terjadi pada gamet-gamet yang dihasilkan F1 dan kombinasi gen (genotip) serta fenotip pada F2'

Tabel 5 Hubungan antara jumlah sifat beda dengan jumlah kombinasi gen pada gamet yang dihasilkan F₁, genotip dan fenotip F₂

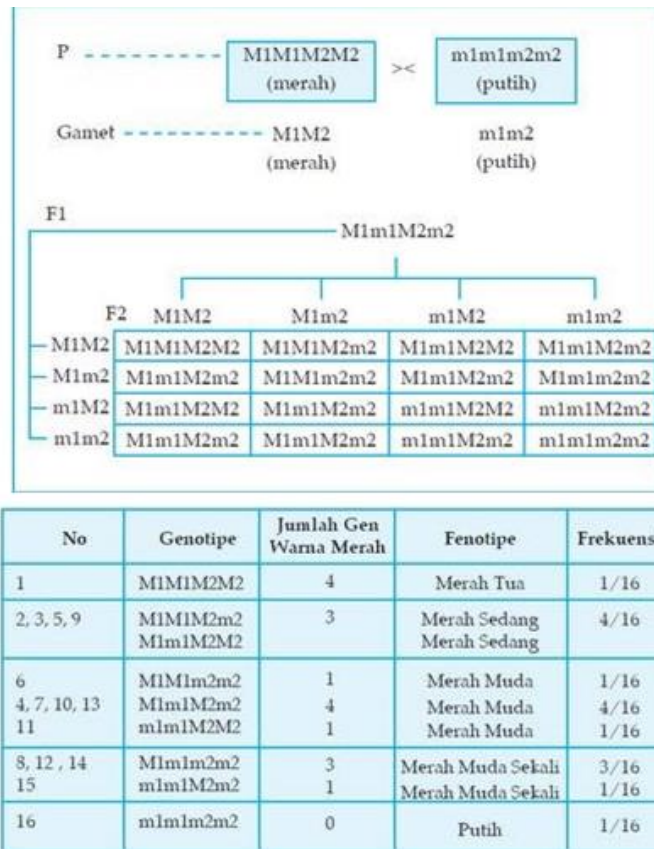
Jumlah sifat beda	Jumlah kombinasi gen pada gamet F ₁	Kemungkinan terjadinya genotif F ₂	Kemungkinan terjadinya fenotip F ₂	Pemisahan fenotip
1	$2^1 = 2$	$3^1 = 3$	2	3 : 1
2	$2^2 = 4$	$3^2 = 9$	4	
3	$2^3 = 8$	$3^3 = 27$	8	9 : 3 : 3 : 1
4	$2^4 = 16$	$3^4 = 81$	16	27 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 1
				81 : 27 : 27 : 27 : 27 : 9 : 9
N	2^n	3^n	2^n	: 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 3 : 1

a. Polimeri

Sifat yang muncul pada pembastaran heterozigot dengan sifat beda yang berdiri sendiri-sendiri tetapi mempengaruhi karakter dan bagian organ tubuh yang sama dari suatu organisme disebut polimeri.

Pada salah satu percobaannya, Nelson Ehle, menyilangkan gandum berbiji merah dengan gandum berbiji putih, fenotipe F1 semua berbiji merah tetapi tidak semerah biji induknya (Gambar 139). Pada kasus ini, seolah-olah terjadi peristiwa dominan tidak penuh, sedangkan pada F2 diperoleh keturunan dengan ratio fenotipe 15 merah dan 1 putih adalah berasal dari penggabungan $(9+3+3):1$, berwarna merah ada 4 variasi yaitu merah tua, merah sedang, merah muda, dan merah muda sekali, sedangkan berwarna putih hanya ada 1 variasi, maka percobaan ini dikatakan bahwa pembastaran tersebut adalah dihibrida dan dua pasang alel yang berlainan tadi sama-sama mempengaruhi sifat yang sama yaitu warna bunga.

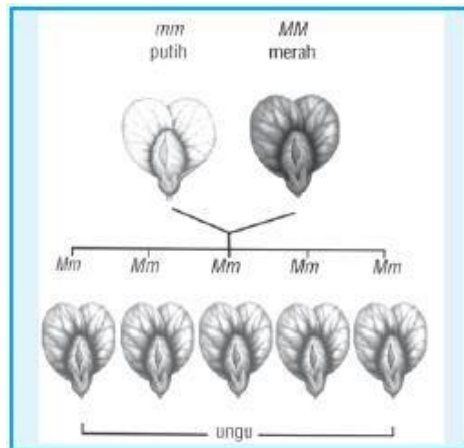
Apabila gen yang menimbulkan pigmen merah diberi simbol M1 dan M2, alel yang mengakibatkan tidak terbentuknya warna diberi simbol m1 dan m2, maka dapat digambarkan dalam diagram persilangan sebagai berikut. Perhatikan peristiwa polimeri pada persilangan antara gandum merah dan gandum putih



Gambar 67. Persilangan Polimeri

b. Kriptomeri

Kriptomeri adalah gen dominan yang seolah-olah tersembunyi apabila berdiri sendiri-sendiri dan pengaruhnya baru tampak apabila bersama-sama dengan gen dominan lainnya. Correns pernah menyilangkan tumbuhan *Linaria maroccana* berbunga merah galur murni dengan yang berbunga putih juga galur murni (Gambar 140). Diperoleh F1 semua berbunga ungu, sedangkan F2 terdiri atas tanaman *Linaria maroccana* berbunga ungu : merah : putih = 9 : 3 : 4.



Gambar 68. Kriptomeri

Berdasarkan penyelidikan terhadap plasma sel bunga *Linaria*, ternyata warna merah disebabkan oleh adanya pigmen antosianin dalam lingkungan plasma sel yang bersifat asam, sedangkan dalam lingkungan basa akan memberikan warna ungu. Tetapi apabila dalam plasma sel tidak terdapat antosianin, dalam lingkungan asam atau basa tetap akan membentuk warna putih.

Apabila:

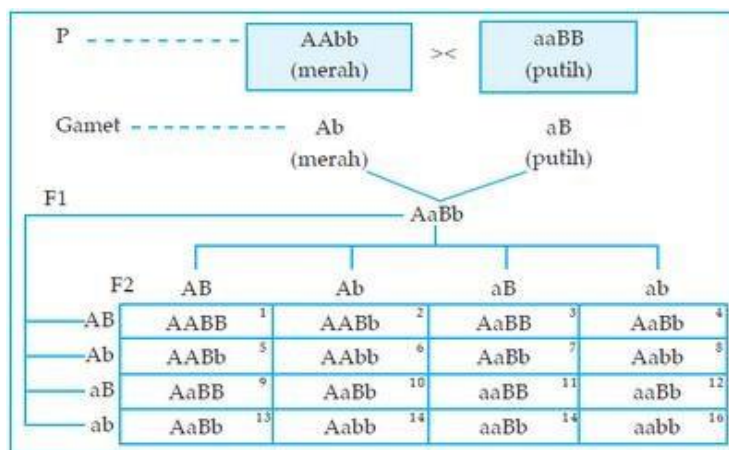
A = ada bahan dasar pigmen antosianin,

a = tidak ada bahan dasar pigmen antosianin,

B = reaksi plasma sel bersifat basa, dan b = reaksi plasma sel bersifat asam.

b = reaksi plasma sel bersifat asam

Gen A dominan terhadap a, dan gen B dominan terhadap b, sehingga diagram persilangannya dapat digambarkan, seperti pada diagram berikut. Perhatikan diagram peristiwa kriptomeri pada *Linaria maroccana* yang menghasilkan kombinasi ungu : merah : putih = 9 : 3 : 4.



Individu genotipe F2 mempunyai:

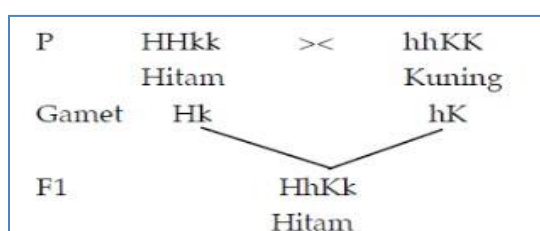
- 1) A.B (antosianin dalam lingkungan basa) warna bunganya ungu sebanyak 9 kombinasi.
- 2) A.bb (antosianin dalam lingkungan asam) warna bunganya merah sebanyak 3 kombinasi.
- 3) aaB. dan aa bb (tidak mengandung antosianin) warna bunganya putih sebanyak 4 kombinasi.

c. Epistasis dan Hipostasis

Epistasis dan hipostasis adalah salah satu bentuk interaksi antara gen. Pada peristiwa ini suatu gen akan menutupi gen lain yang bukan alelnya. Gen yang menutup gen lainnya disebut epistasis dan gen yang tertutup itu disebut hipostasis.

Peristiwa ini terjadi baik pada tumbuhan, hewan, maupun manusia. Pada tumbuhan, peristiwa epistasis dan hipostasis dijumpai pada warna kulit gandum dan warna kulit labu squash, sedangkan pada hewan dapat dijumpai bulu mencit. Pada manusia, peristiwa tersebut juga dapat dijumpai misalnya pada warna mata. Nelson Ehle mengadakan percobaan persilangan dengan objek tanaman gandum. Gandum berkulit biji hitam disilangkan dengan gandum berkulit putih kuning. Hasilnya (F1) 100% berkulit biji hitam. Pada F2 diharapkan akan dihasilkan keturunan dengan fenotipe 75% hitam dan 25% kuning, tetapi ternyata tidak demikian, hasil yang diperoleh mempunyai perbandingan sebagai berikut 12 hitam : 3 kuning : 1 putih. Persilangan ini mirip prinsip Mendel yaitu (9 + 3) : 3 : 1.

Setelah dianalisis, ternyata gen yang menimbulkan pigmentasi hitam dan kuning berdiri sendiri-sendiri dan keduanya merupakan faktor dominan terhadap faktor putih. Jadi, gen H (hitam) dominan terhadap h (putih) gen K (kuning) dominan terhadap k (putih). Perhatikan diagram persilangan antara gandum berkulit biji hitam HHkk dengan gandum berkulit biji kuning hhKK berikut!



Modul Belajar Mandiri

Genotipe F1 Hhkk fenotipenya adalah hitam. Ini menunjukkan bahwa faktor H menutup faktor K, faktor H disebut epistasis dan faktor K disebut hipostasis. Jika F1 mengadakan meiosis akan menghasilkan gamet Hk, Hk, hK, dan hk, sehingga kemungkinan kombinasi F2 adalah seperti diagram berikut.

Peristiwa hipostasis dan epistasis menghasilkan kombinasi yaitu hitam : kuning : putih = 12 : 3 : 1.

	HK	Hk	hK	hk
HK	HHKK ¹	HHKk ²	HhKK ³	HhKk ⁴
Hk	HHKk ⁵	HHkk ⁶	HhKk ⁷	Hhkk ⁸
hK	HhKK ⁹	HhKk ¹⁰	hhKK ¹¹	hhKk ¹²
hk	HhKk ¹³	Hhkk ¹⁴	hhKk ¹⁴	hhkk ¹⁶

Keterangan:

Semua kombinasi yang mengandung H, fenotipenya adalah hitam. Kombinasi yang mengandung faktor dominan K hanya menampilkan warna kuning jika bersama faktor H. Kemungkinan kombinasi 1/16 adalah kombinasi dua faktor resesif dari kedua pasangan alel hhkk. Individu ini tidak mengandung faktor dominan dan menampilkan warna putih. Ini adalah jenis homozigot baru yang hanya mungkin timbul dari persilangan dihibrid.

d. Komplementer

Salah satu tipe interaksi gen-gen pada organisme adalah saling mendukung munculnya suatu fenotipe atau sifat. W. Bateson dan R.C. Punnet yang bekerja pada bunga *Lathyrus adoratus* menemukan kenyataan ini.

Mereka melakukan persilangan sesama bunga putih dan menghasilkan keturunan F2 bunga berwarna ungu seluruhnya. Pada persilangan bunga-bunga berwarna ungu F2, ternyata dihasilkan bunga dengan warna putih dalam jumlah yang banyak dan berbeda dengan perkiraan sebelumnya, baik hukum Mendel atau sifat kriptomeri.

Penelitian lebih lanjut yang dilakukan oleh keduanya mengungkapkan ada dua gen yang berinteraksi memengaruhi warna bunga, yakni gen yang mengontrol

munculnya bahan pigmen (C) dan gen yang mengaktifkan bahan tersebut (P). Jika keduanya tidak hadir bersamaan, tentu tidak saling melengkapi antara sifat satu dengan yang lainnya dan menghasilkan bunga dengan warna putih (tidak berpigmen). Apabila tidak ada bahan pigmen, tentu tidak akan muncul warna, meskipun ada bahan pengaktif pigmennya.

Begitupun sebaliknya, apabila tidak ada pengaktif pigmen maka pigmen yang telah ada tidak akan dimunculkan dan tetap menghasilkan bunga tanpa pigmen (berwarna putih). Persilangan yang dilakukan oleh Bateson dan Punnet dapat diamati pada diagram berikut ini.

Sifat yang dihasilkan oleh interaksi gen yang saling melengkapi dan bekerja sama ini dinamakan dengan komplementer. Ketidakhadiran sifat dominan pada suatu pasangan gen tidak akan memunculkan sifat fenotipe dan hanya akan muncul apabila hadir bersama - sama dalam pasangan gen dominannya.

Contoh: Perkawinan pria bisu tuli dengan wanita bisa tulis.

P1	♀ rrBB	X	♂ RRbb
	bisu tuli		bisu tuli
G	rB		Rb
F1	RrBb		
	Normal		
Gamet	RB, Rb, rB, rb		

♀\♂	RB	Rb	rB	rb
RB	RRBB normal	RRBb normal	RrBB normal	RrBb normal
Rb	RRBb normal	RRbb bisu tuli	RrBb normal	Rrbb bisu tuli
rB	RrBB normal	RrBb normal	rrBB bisu tuli	rrBb bisu tuli
rb	RrBb normal	Rrbb bisu tuli	rrBb bisu tuli	rrbb bisu tuli

Perbandingan fenotip F₂: normal : bisu tuli = 9 : 7

D. Rangkuman

Setiap individu mempunyai sifat yang beragam. Sifat ini diturunkan dari induk ke keturunannya melalui perkawinan/persilangan. Sifat ini dibentuk oleh faktor pembawa sifat keturunan yang disebut gen. Gen terletak dalam inti sel, yaitu pada kromosom. Gen baru ditemukan oleh Crick dan Watson pada tahun 1953. Gen, kromosom dan DNA merupakan materi genetik, yang berkaitan dengan proses pewarisan sifat.

Sintesis protein merupakan suatu proses yang kompleks, termasuk di dalamnya penerjemahan kode-kode pada RNA menjadi polipeptida. Sintesis protein melibatkan DNA, RNA, ribosom, asam amino, dan enzim. Sintesis protein terdiri dari dua tahap yaitu transkripsi dan translasi.

Mendel melakukan persilangan dua individu dengan satu sifat beda (monohibrid), yaitu kacang polong berbiji bulat (BB) dengan kacang polong berbiji kisut (bb). Biji bulat atau kisut yang tampak pada biji kacang polong disebut fenotip, sedangkan susunan gennya disebut genotip (misalnya BB dan bb). Individu yang mempunyai fenotip sama, belum tentu mempunyai genotip sama, tetapi individu yang mempunyai genotip sama dapat dipastikan mempunyai fenotip yang sama. Persilangan dua individu tidak terbatas dengan satu sifat beda (monohibrid), tetapi dapat juga persilangan dengan dua sifat beda (dihibrid), tiga sifat beda (trihibrid), empat sifat beda (tetrahibrid) atau banyak sifat beda (polihibrid).