

Ida Herlina • Riana Yani • Eva Latifah Hanum
Widi Purwianingsih • Dian Peniasiani • Musarofah



BIOLOGI 3

Kelas XII SMA dan MA



Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional

Ida Herlina • Riana Yani • Eva Latifah Hanum
Widi Purwianingsih • Dian Peniasiani • Musarofah

BIOLOGI 3

SMA dan MA Kelas XII



Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
dilindungi Undang-undang

B I O L O G I 3
SMA dan MA Kelas XII

Penulis : **Ida Herlina**
Riana Yani
Eva Latifah Hanum
Widi Purwianingsih
Dian Peniasiani
Musarofah

Penelaah : **Djamhur Winatasasmita**

Editor : **Pipih Latifah**

Desain Sampul : **Gyun Slamet**

Ilustrator : **Rochman Suryana**

Perwajahan : **Pepen S.**

Ukuran Buku : **17,5 x 25 cm**

574.07
BIO Biologi 3 : Kelas XII SMA dan MA / penulis, Ida Herlina... [et al] ;
editor, Pipih Latifah . — Jakarta : Pusat Perbukuan,
Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
vi, 290 hlm. : ilus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 281
Indeks
ISBN 978-979-068-831-5 (nomor jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-842-1

I. Biologi-Studi dan Pengajaran I. Pipih Latifah
II. Ida Herlina

**Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit PT. Remaja Rosdakarya**

**Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2009**

Diperbanyak oleh

KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan

KATA PENGANTAR

Ilmu pengetahuan, baik ilmu pengetahuan alam maupun ilmu pengetahuan sosial serta teknologi, akhir-akhir ini berkembang sangat pesat dan masih terus akan berkembang. Hal ini menuntut Biologi sebagai ilmu dasar dan ilmu murni serta sebagai salah satu bidang IPA untuk dapat berperan dan mengikuti perkembangan tersebut.

Salah satu tujuan pembelajaran Biologi di SMA adalah mengembangkan kemampuan berpikir analitis untuk memecahkan konsep-konsep Biologi dikaitkan dengan contoh-contoh yang ada di lingkungan sekitar yang berhubungan dengan kehidupan sehari-hari. Untuk mengembangkan keterampilan proses dalam memperoleh konsep-konsep Biologi dan menumbuhkan nilai dan sikap ilmiah, kami sajikan beberapa kegiatan, eksperimen maupun noneksperimen. Selain itu, buku ini dikembangkan dengan pendekatan deduktif dan pada bagian-bagian yang dianggap perlu, penulis lakukan pendekatan induktif. Pada bagian awal setiap bab terdapat peta konsep untuk memudahkan siswa mengetahui materi yang akan dibahas pada bab tersebut, dilengkapi pula dengan rangkuman dan kata kunci yang memuat kata-kata yang perlu dipahami. Selain itu, pada setiap akhir bab, akhir semester, dan akhir tahun dilengkapi evaluasi yang sesuai dengan tiga ranah evaluasi, yaitu kognitif, afektif, dan psikomotorik.

Harapan penulis semoga buku ini akan sangat bermanfaat, baik untuk guru maupun untuk para siswa. Akhir kata, kami ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendorong dan membantu terwujudnya buku ini. Saran dan koreksi untuk peningkatan mutu buku ini sangat kami harapkan.

Bandung, Juni 2007

Penulis

DAFTAR ISI

KATA SAMBUTAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v

BAB I	
Percobaan Pertumbuhan pada Tumbuhan	1
A. Perencanaan Percobaan	3
B. Pelaksanaan Percobaan	5
C. Penyampaian Hasil Percobaan	10
D. Pertumbuhan dan Perkembangan	11
Rangkuman	27
Evaluasi Akhir Bab	28

BAB II	
Metabolisme	33
A. Komponen-Komponen Utama dalam Metabolisme	35
B. Proses Katabolisme Karbohidrat	40
C. Proses Anabolisme Karbohidrat	48
D. Keterkaitan Proses Katabolisme dan Anabolisme	55
E. Keterkaitan Metabolisme Karbohidrat, Lemak, dan Protein	56
F. Teknologi yang Terkait dengan Metabolisme	58
Rangkuman	64
Evaluasi Akhir Bab	65

Bab III	
Hereditas	67
A. DNA, Gen, dan Kromosom	69
B. Peranan DNA dan RNA dalam Pembentukan Kode Genetik	87

C. Kaitan Mitosis dan Meiosis dengan Hreditas	92
D. Prinsip Hereditas dan Mekanisme Pewarisan Sifat	103
E. Mutasi	155
Rangkuman	173
Evaluasi Akhir Bab	176
Evaluasi Akhir Semester	181

Bab IV	
Evolusi Makhluk Hidup	191

A. Pemahaman tentang Teori Evolusi Biologi	193
B. Informasi Ilmiah tentang Evolusi Makhluk Tertentu	217
C. Tanggapan terhadap Teori Evolusi Pasca-Darwin	218
Rangkuman	223
Evaluasi Akhir Bab	225

Bab V	
Bioteknologi	229

A. Arti dan Prinsip Dasar Bioteknologi	231
B. Bioteknologi Konvensional dan Modern	233
C. Jenis-Jenis bioteknologi	234
D. Produk-Produk Bioteknologi	237
E. Dampak Bioteknologi terhadap Sains, Lingkungan, Teknologi, dan Masyarakat	256
Rangkuman	262
Evaluasi Akhir Bab	263
Evaluasi Akhir Tahun	267
Glosarium	275
Daftar Pustaka	281
Indeks	283

Bab I

Percobaan Pertumbuhan pada Tumbuhan



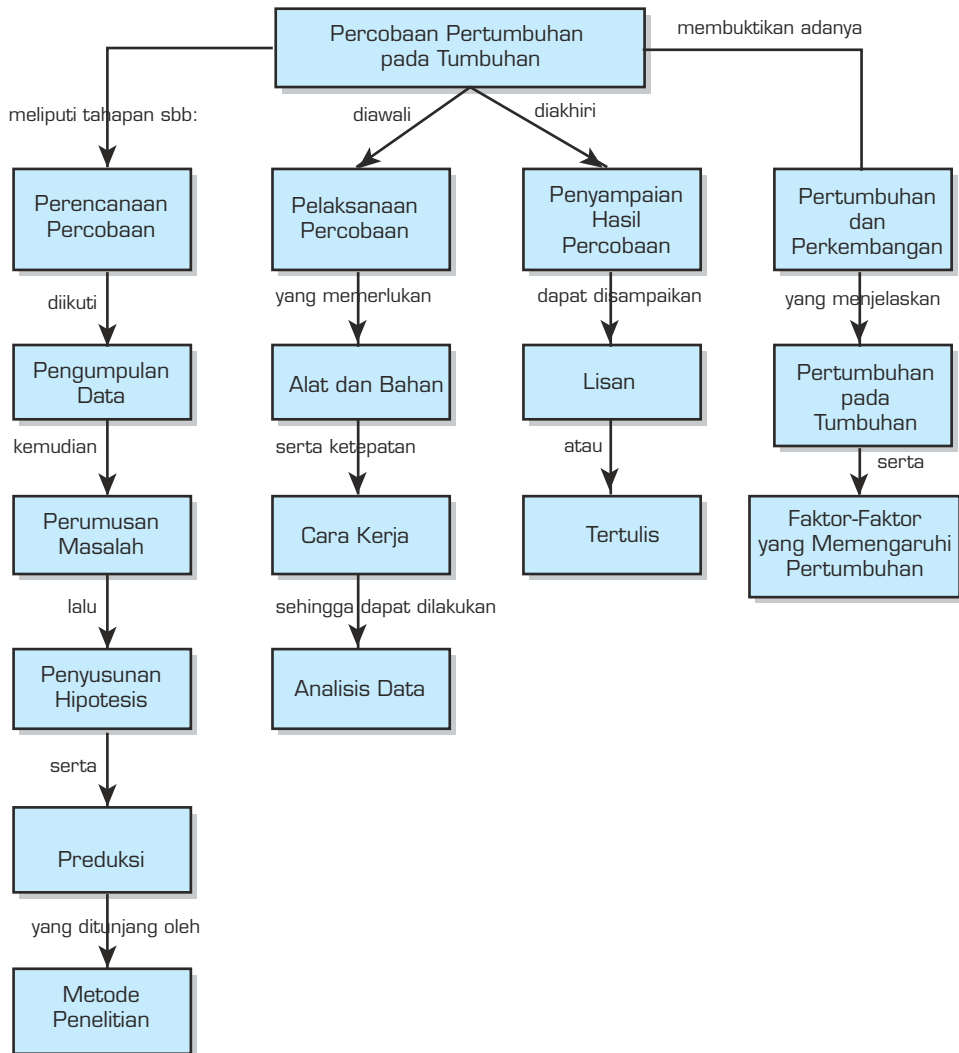
Sumber: *Biologi Jilid 2*, Campbell

TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, siswa dapat:

1. mengidentifikasi faktor luar yang memengaruhi pertumbuhan tumbuhan;
2. merencanakan serta melaksanakan percobaan pertumbuhan pada tumbuhan;
3. merencanakan argumentasi teori-teori pertumbuhan tanaman;
4. menentukan variabel bebas dan variabel terikat;
5. menentukan parameter pengukuran pertumbuhan suatu jenis tanaman;
6. mengomunikasikan hasil percobaan;
7. menjelaskan pengertian pertumbuhan dan perkembangan;
8. menjelaskan faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan pada tumbuhan.

PETA KONSEP



Di kelas X kamu telah belajar melaksanakan penelitian ilmiah, dimulai dari merencanakan penelitian, melaksanakan penelitian, dan cara mengomunikasikannya. Selain itu, dipelajari pula bagaimana mengumpulkan dan menyusun data untuk selanjutnya mengolah data tersebut sehingga diperoleh kesimpulan yang lengkap.

Pada kesempatan ini, kamu akan mempelajari sekaligus melakukan percobaan tentang pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan melalui kegiatan nyata di lapangan, sehingga kamu dapat mengetahui pengaruh faktor luar terhadap pertumbuhan tumbuhan.

A. Perencanaan Percobaan

Sebelum melaksanakan percobaan atau penelitian harus dibuat perencanaan yang isinya meliputi hal-hal berikut.

1. Menentukan tema dan rumusan masalah serta variabel yang diteliti.
2. Menyusun hipotesis secara deduktif dari teori yang sudah ada.
3. Menetapkan metode dan instrumen penelitian.
4. Menentukan sampel.
5. Menentukan teknis analisis data atau statistik.

Langkah-langkah tersebut dilakukan sebelum melaksanakan percobaan atau penelitian guna memperoleh data empiris dan apa yang dilakukan di lapangan disesuaikan dengan apa yang telah direncanakan. Data yang berasal dari lapangan masih merupakan informasi atau data kasar. Informasi atau data kasar ini masih harus diolah atau dianalisis agar dapat menjawab permasalahan.

Tema percobaan yang kamu pelajari adalah pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Langkah selanjutnya kamu mengumpulkan informasi tentang faktor-faktor luar yang dapat memengaruhi pertumbuhan, merumuskan masalah, dan menyusun hipotesis serta prediksi.

1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data/informasi dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu melalui studi kepustakaan, observasi, dan lainnya. Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan tersebut dinamakan *variabel bebas*, sedangkan pertumbuhan tumbuhannya dinamakan *variabel terikat*. Variabel bebas dalam percobaan kamu sekarang berdasarkan studi kepustakaan, di antaranya cahaya, suhu, kelembapan, air, dan nutrisi, sedangkan pertumbuhan yang ditunjukkan dengan panjang, lebar, atau berat merupakan variabel terikat. Tugas kamu sekarang menemukan hubungan antara kedua variabel tersebut,

misalnya “Pengaruh Cahaya terhadap Pertumbuhan Tumbuhan”. Dengan demikian, kamu harus mencari jawaban dari pengaruh salah satu variabel (cahaya) terhadap pertumbuhan tumbuhan.

2. Perumusan Masalah

Jika kamu telah dapat mengidentifikasi dan memahami variabel bebas dan variabel terikat langkah selanjutnya adalah merumuskan masalah. Dari beberapa variabel bebas yang kamu ketahui berdasarkan pengamatan/observasi di lapangan dan atau buku pustaka, kamu dapat memilih salah satu. Misalnya, dari hasil observasi, pertumbuhan rumput pada lahan yang teduh karena rindangnya kanopi jauh lebih sedikit dibandingkan dengan pertumbuhan rumput pada lahan yang banyak mendapatkan cahaya matahari, rumusan masalah dapat disusun sebagai berikut: *“jika kurang cahaya, maka pertumbuhan tumbuhan akan terhambat”*.

3. Penyusunan Hipotesis

Setelah merumuskan masalah, langkah selanjutnya adalah menyusun hipotesis atau jawaban sementara dari masalah yang telah kamu rumuskan. Bagaimana menyusun hipotesis? Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam penyusunan hipotesis, antara lain:

- disusun dalam kalimat pernyataan;
- ada keterkaitan antara dua variabel atau lebih;
- dilandasi dengan hasil studi kepustakaan yang mendalam.

Hipotesis dibedakan menjadi dua, yaitu hipotesis nol dan hipotesis alternatif. Hipotesis nol, yaitu hipotesis yang landasan teoretisnya mengarah pada kesimpulan tidak ada pengaruh dan tidak ada hubungan. Hipotesis alternatif, yaitu apabila dari landasan teoretis mengarah pada kesimpulan ada pengaruh atau ada hubungan.

Berikut ini contoh hipotesis untuk percobaan pengaruh cahaya terhadap pertumbuhan tumbuhan.

- Cahaya matahari memengaruhi pertumbuhan biji kacang hijau.
- Cahaya matahari menghambat pertumbuhan biji kacang hijau.

4. Prediksi

Sebelum melangkah ke metode penelitian, sebaiknya penyusunan hipotesis ini disertai dengan prediksi sehingga kita bisa memperkirakan hasil penelitian/percobaan yang akan kita lakukan.

5. Perencanaan Eksperimen

Pada tahap merencanakan eksperimen, kamu perlu merancang teknik pelaksanaan yang meliputi hal-hal berikut.

- a. Menentukan jenis tumbuhan yang akan diteliti.
- b. Jumlah biji.
- c. Lamanya percobaan.
- d. Tempat percobaan.
- e. Alat-alat yang diperlukan.
- f. Cara kerja percobaan, termasuk rancangan perlakuan.
- g. Data yang akan diambil dari percobaan tersebut, sekaligus cara menganalisis data tersebut.

Rancangan perlakuan pada percobaan ini adalah memisahkan dua kelompok biji kacang hijau untuk ditumbuhkan di dua tempat yang berbeda, yaitu:

- a. di tempat terang dengan intensitas cahaya matahari normal (kelompok kontrol);
- b. di tempat gelap, tidak terkena cahaya matahari (kelompok eksperimen/ perlakuan).

Selain cahaya, kondisi lainnya untuk kedua kelompok tersebut harus sama. Data pengamatan dari kedua kelompok percobaan tersebut berupa panjang kecambah/pertambahan panjang kecambah yang diamati setiap hari selama percobaan berlangsung.

B. Pelaksanaan Percobaan

Pada tahap ini, kamu melakukan percobaan sesuai dengan rencana/ rancangan yang telah disusun, yaitu dengan judul percobaan: **“Pengaruh Cahaya Matahari terhadap Pertumbuhan Biji Kacang Hijau”**.

1. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang diperlukan dalam percobaan tersebut adalah sebagai berikut.

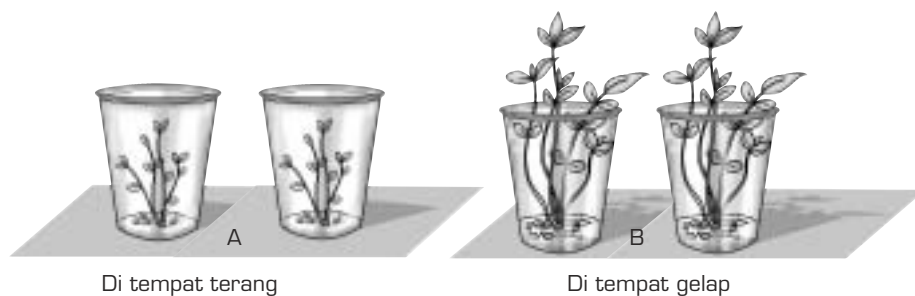
- a. 4 gelas plastik bekas air mineral/gelas kimia 20 cc.
- b. 4 gumpal kapas dengan berat yang sama (2 gram).
- c. Kertas label.
- d. Penggaris.
- e. Pipet tetes.
- f. 20 butir kacang hijau dengan ukuran sama.

- g. Air bersih.
- h. Gelas ukur.
- i. Spidol permanen.

2. Cara Kerja

Dalam melaksanakan percobaan, ikuti langkah-langkah atau urutan cara kerja berikut ini.

- a. Rendamlah biji kacang hijau dengan air bersih selama 1 jam.
- b. Sediakan 4 gelas bekas air mineral/gelas kimia.
- c. Masukkan segumpal kapas yang telah dibasahi dengan 10 ml air bersih ke dalam setiap gelas.
- d. Beri label A untuk 2 gelas dan label B untuk yang dua gelas lagi.
- e. Letakkan 5 butir biji kacang hijau pada setiap gelas.
- f. Tempatkan gelas A di tempat terang dan gelas B di tempat gelap.
- g. Sirami biji-biji tersebut setiap hari dengan volume air yang sama, 25 tetes setiap gelas secara merata.
- h. Amati dan catat pertumbuhan (pertambahan panjangnya) setiap hari, usahakan pada waktu yang sama setiap pagi atau setiap sore. Perhatikan Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Pertumbuhan kacang hijau berdasarkan hasil percobaan

3. Mencatat Kondisi Lingkungan

Mencatat kondisi lingkungan percobaan merupakan hal yang penting karena kondisi lingkungan dapat memengaruhi hasil percobaan sehingga jika ada peneliti lain yang melakukan percobaan yang sama dan hasilnya berbeda, kita dapat melihat kondisi lingkungan pada saat percobaan. Makin banyak faktor lingkungan yang tercatat akan memudahkan dalam menginterpretasikan hasil pengamatan.

Pada percobaan yang kamu lakukan, kondisi lingkungan yang berbeda hanya faktor cahaya, kondisi lingkungan yang perlu diketahui adalah suhu dan kelembapan.

4. Mengumpulkan dan Menganalisis Data

Informasi tentang panjang kecambah, jumlah biji yang berkecambah, dan kondisi lingkungan yang diperoleh pada waktu percobaan disebut data. Apabila data sudah terkumpul, langkah berikutnya adalah mengolah dan menganalisis data agar data mempunyai arti untuk menjawab pertanyaan dalam penelitian atau untuk menjawab hipotesis.

Ada dua jenis data, yaitu data kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif tidak memerlukan perhitungan matematis sebab data tersebut sudah memiliki makna untuk menafsirkan hasil penelitian dalam percobaan yang kamu lakukan, misalnya kapan mulai tumbuh akar; kapan kotiledon menyusut (kondisi kotiledon); kapan tumbuh daun pertama. Data kuantitatif merupakan data memerihal, belum bermakna, maka perlu pengolahan dan analisis, antara lain dengan statistik. Data kuantitatif dalam percobaan ini adalah ukuran tinggi kecambah.

Data yang telah terkumpul perlu disajikan dengan baik agar mudah dipahami dan dianalisis. Salah satu caranya adalah dengan mengelompokkan dan menyajikannya dalam bentuk tabel dan grafik. Berikut ini contoh tabel hasil pengamatan, yaitu penambahan tinggi kecambah kelompok A dan kelompok B.

GELAS A

Hari ke-	Biji kacang hijau ke-										Rata-Rata
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0
2	-	-	-	0,1	0,5	-	-	0,5	0,1	0,1	0,3
3	0,5	0,6	0,5	0,6	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,7
4	1	0,8	0,9	0,8	2	0,9	2	0,9	1,5	1,5	1,2
5	1	0,8	1,5	1	2,5	1	3	1	2,5	1,5	1,6
6	2	1	1,8	1,9	5,5	2	6,5	2,5	7	4	3,4
Mean	0,75	0,53	0,78	0,73	1,75	0,78	2,05	0,95	1,98	1,33	
Median	0,75	0,7	0,7	0,7	1,5	0,85	1,4	0,85	1,15	1,2	
Modus	1	0,8								1,5	

GELAS B

Hari ke-	Biji kacang hijau ke-										Rata-rata
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	1	0,6	0,54
3	1,5	1,2	1	1	1	1	1	0,8	1	1	11,05
4	1,8	4,5	3,5	4,5	3	3	1	3	3,5	3,5	3,13
5	9	4,7	9	9,5	7	7	7,5	8	3,8	7	7,25
6	14,5	5	14	15	12	12,5	14	13	4	13,5	11,75
Mean	4,53	2,65	4,63	5,08	3,92	4	4	4,23	2,22	4,26	
Median	1,65	2,85	2,25	2,75	2	2	1	1,9	2,25	2,25	
Modus							1		1		

Pada tabel pengamatan yang kamu susun, terdapat kolom rata-rata, kamu dapat menganalisis kedua kelompok data tersebut dengan membandingkan nilai rata-rata tinggi kecambah. Kelompok mana yang mempunyai nilai rata-rata panjang pertumbuhan kecambah lebih tinggi. Hubungan data tersebut dengan tempat perlakuan; di tempat terang, atau di tempat gelap. Dengan demikian, kamu dapat mengetahui pengaruh cahaya matahari terhadap pertumbuhan biji kacang hijau, apakah mempercepat atau memperlambat.

Selain tabel data kuantitatif berupa perubahan tinggi kecambah, kamu perlu membuat tabel data kualitatif berupa perubahan kondisi biji kacang hijau, mulai dari menanam sampai tampak ada pertumbuhan selama waktu percobaan, seperti tampak pada tabel berikut.

GELAS A

Hari ke-	Biji kacang hijau ke-									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
2	BT	BT	BT	T	T	BT	BT	T	T	T
3	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

4	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
5	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
6	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

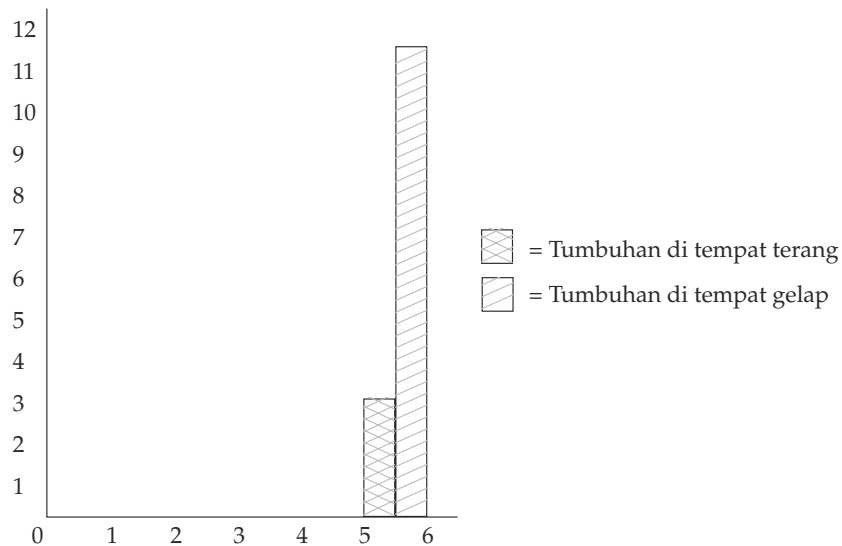
Keterangan
 BT = Belum tumbuh
 T = Tumbuh

GELAS B

Hari ke-	Biji kacang hijau ke-									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
2	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
3	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
4	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
5	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
6	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

Keterangan
 BT = Belum tumbuh
 T = Tumbuh

Perhatikan pula grafik pertumbuhan kacang hijau di tempat terang dan di tempat gelap.



Grafik pertumbuhan biji kacang hijau

C. Penyampaian Hasil Percobaan

Langkah terakhir dalam penelitian ilmiah adalah mengomunikasikan hasil percobaan, agar hasil penelitian bermanfaat untuk orang lain. Cara mengomunikasikan hasil percobaan dapat berupa lisan melalui diskusi di kelas ataupun secara tertulis berupa laporan.

1. Secara Lisan

Apabila mengomunikasikan hasil percobaan tersebut melalui diskusi kelas atau lingkungan terbatas lainnya, kamu harus menguasai dengan baik seluruh rangkaian percobaan dan dapat kamu tuliskan dalam bentuk abstraksi. Abstraksi berisi judul penelitian, latar belakang, tujuan penelitian, perlakuan yang dilakukan, parameter yang diamati, dan hasil percobaan yang ditulis secara ringkas dan padat.

2. Secara Tertulis

Hasil penelitian perlu pula dikomunikasikan secara tertulis dalam bentuk laporan penelitian agar hasil penelitian bermanfaat bagi orang lain. Format laporan penelitian ada beberapa macam, salah satu di antaranya sebagai berikut.

Halaman Judul

Halaman Pengesahan

Kata Pengantar

Daftar Isi

Abstrak

Bab I Pendahuluan

- A. Latar belakang
- B. Rumusan masalah
- C. Pembatasan masalah
- D. Hipotesis dan Prediksi

Bab II Kajian Teori

Bab III Metodologi Penelitian

- A. Alat dan bahan
- B. Rancangan penelitian

Bab IV Hasil penelitian dan Pembahasan

- A. Hasil
- B. Pembahasan

Bab V Kesimpulan dan Saran

A. Kesimpulan

B. Saran

Daftar Pustaka

Lampiran (jika ada)

Tugas 1.1

Setelah kamu mempelajari dan mencoba penelitian tentang pengaruh cahaya terhadap pertumbuhan, lakukan penelitian berikutnya secara berkelompok dengan variabel berbeda, seperti: (1) Temperatur; (2) Pupuk; dan (3) Polutan.

Carilah informasi yang lengkap di perpustakaan sekolah.

Buat laporannya dan presentasikan di kelasmu.

Setelah kamu melakukan percobaan pertumbuhan pada tumbuhan terutama mengenai pengaruh faktor luar terhadap pertumbuhan tumbuhan serta telah dapat mengomunikasikan hasil percobaan tersebut, selanjutnya dalam buku ini akan dibahas tentang teori pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan secara lebih detail.

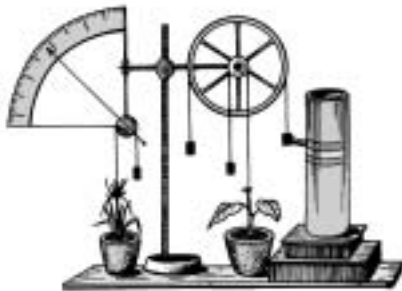
D. Pertumbuhan dan Perkembangan

Salah satu ciri fisiologis makhluk hidup adalah mengalami pertumbuhan dan perkembangan. Proses pertumbuhan ditandai dengan dua ciri dasar, yaitu sebagai berikut.

1. Kenaikan volume yang irreversible (tidak dapat kembali seperti asalnya) disertai dengan pertumbuhan substansi dan diferensiasi.
2. Kenaikan jumlah sel sebagai hasil kegiatan sel meristem.

Pertumbuhan dapat diukur dan dinyatakan secara kuantitatif dalam bentuk kurva, dengan menggunakan *auksanometer*, perhatikan Gambar 1.2. Dengan alat tersebut kita dapat mengukur kecepatan pertumbuhan berbagai macam tumbuhan.

Perkembangan adalah suatu proses menuju tingkat kedewasaan, yang ditandai dengan adanya peningkatan kualitas sebagaimana layaknya makhluk hidup dewasa. Berbeda dengan pertumbuhan, perkembangan tidak dapat dinyatakan dengan ukuran.



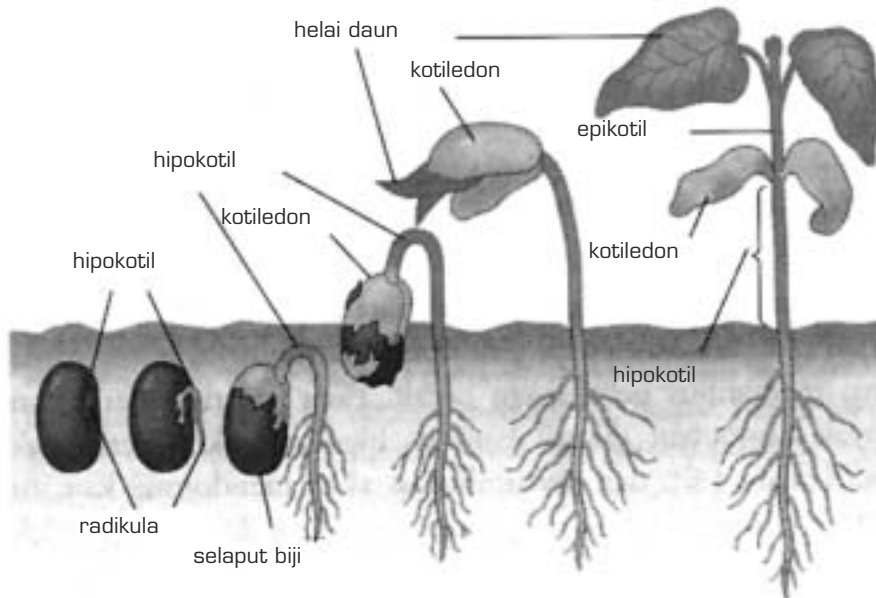
Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 1.2 Auksanometer

1. Pertumbuhan pada Tumbuhan

Pertumbuhan memanjang pada kecambah awalnya berjalan lambat, kemudian memasuki periode panjang dan tumbuh cepat serta akhirnya menurun lagi atau berhenti ketika mendekati dewasa, perhatikan Gambar 1.3.

Jika tinggi dan berat tumbuhan menahun digambarkan berdasarkan umurnya, akan dihasilkan kurva pertumbuhan yang berbentuk S. Keadaan ini merupakan salah satu ciri yang juga dijumpai pada pertumbuhan hewan.



Sumber: *Biologi jilid 2*, Campbell

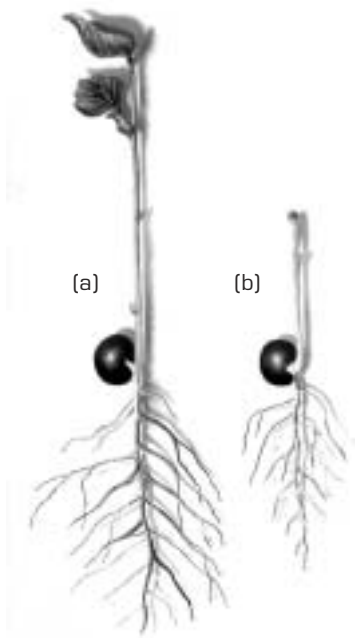
Gambar 1.3 Perkembangan biji

Kurva pertumbuhan tumbuhan menahun dan tumbuhan semusim berbeda. Tumbuhan semusim terus-menerus tumbuh, sedangkan tumbuhan menahun berhenti tumbuh setelah matang (dewasa).

a. Pertumbuhan Akar

Bagian tumbuhan di atas permukaan tanah tumbuh dan meluas selama masa hidupnya, demikian pula bagian akar serta cabang-cabangnya jauh menembus tanah. Titik tumbuh pada ujung akar terdiri atas jaringan meristem yang sel-selnya aktif membelah. Daerah (zona) meristem dilindungi oleh tudung akar atau *kaliptra*.

Di belakang zona meristem terdapat sel-sel hasil pembelahan meristem yang mengalami pertumbuhan memanjang, disebut juga *zona perpanjangan*. Sel-sel yang telah memanjang sepenuhnya (matang) berdiferensiasi membentuk struktur-struktur khusus.



Sumber: *Biology jilid 2, Campbell*

Gambar 1.4

(a) Setelah mengalami pemanjangan
(b) Awal pertumbuhan akar kecambah

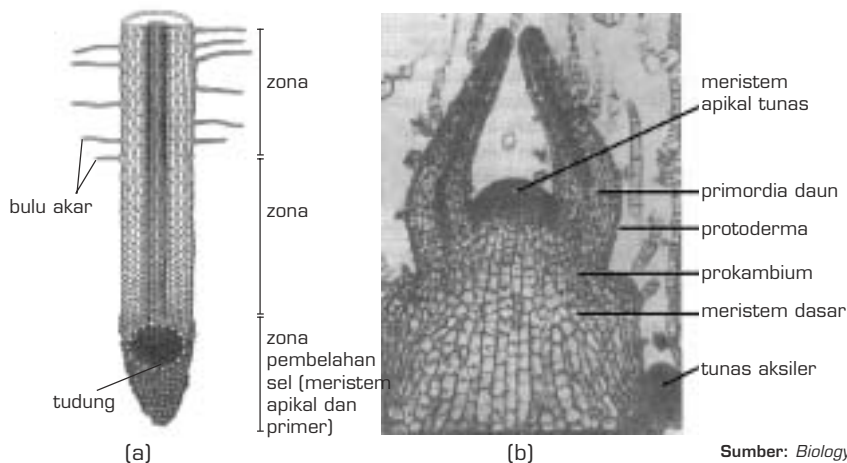
Bagian zona pemanjangan pada akar dapat dilihat pada pengamatan pertumbuhan kecambah yang akarnya kita tandai dengan tinta cina dalam ukuran yang sama, kemudian membiarkannya beberapa hari sebelum diamati kembali. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 1.4.

1) Tudung Akar

Ujung akar ditutupi oleh tudung akar yang terdiri atas sel-sel parenkim yang tidak berdiferensiasi. Sel-sel tersebut menyekresikan lendir yang berfungsi untuk membasahi permukaan tudung akar sehingga memudahkan ujung akar menembus tanah pada waktu sel-sel akar tersebut memanjang. Jika sel-sel tudung akar aus atau rusak akan digantikan oleh sel-sel baru yang berasal dari meristem apikal yang berada di bagian belakang.

2) Zona Meristematis

Zona meristematis tersusun atas kumpulan sel-sel kecil yang teratur dengan bentuk yang relatif sama atau seragam. Karena kemampuannya membelah diri tak terbatas, maka dinamakan sel-sel meristematis (embrional). Sel-sel meristematis berbeda dengan sel dewasa (matang) dalam beberapa hal terutama ukurannya. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 1.5.



Sumber: *Biology, Barrett*

Gambar 1.5 Daerah titik tumbuh dengan bagian-bagiannya (a) pada akar (b) pada batang

3) *Zona Pemanjangan*

Sel-sel yang terletak di belakang zona meristematis segera menjadi besar dan bagian akar tersebut menjadi zona pemanjangan. Sel-sel pada bagian tersebut sebagian besar membesar dan memanjang. Hal ini menyebabkan vakuola bertambah besar. Pembesaran vakuola tersebut menekan sitoplasma ke arah dinding sel dan membentuk lapisan seperti garis tipis. Perubahan pada sitoplasma dialami pula oleh inti, akhirnya inti memipih dan melekat pada dinding sel, tetapi masih terendam sitoplasma.

Pada zona meristematis bentuk sel-selnya serupa, sedangkan pada zona pemanjangan kelompok sel-selnya membentuk jaringan khusus, dan pada bagian akar yang matang (dewasa) mulai tampak sel-sel yang berbeda ukuran ataupun bentuknya. Bahkan akan tampak jelas bilamana sel-sel yang sama telah matang berdiferensiasi menjadi bagian tengah (stele) dikelilingi bagian yang bentuk dan ukurannya berbeda (korteks) serta lapisan terluar yang terdiri atas selapis sel yang tipis (epidermis).

4) *Zona Pematangan*

Perbedaan bentuk dan ukuran pada zona pematangan menjadi lebih jelas. Pemanjangan yang penuh (maksimum) merupakan ciri bahwa sel-sel tersebut telah matang atau dewasa.

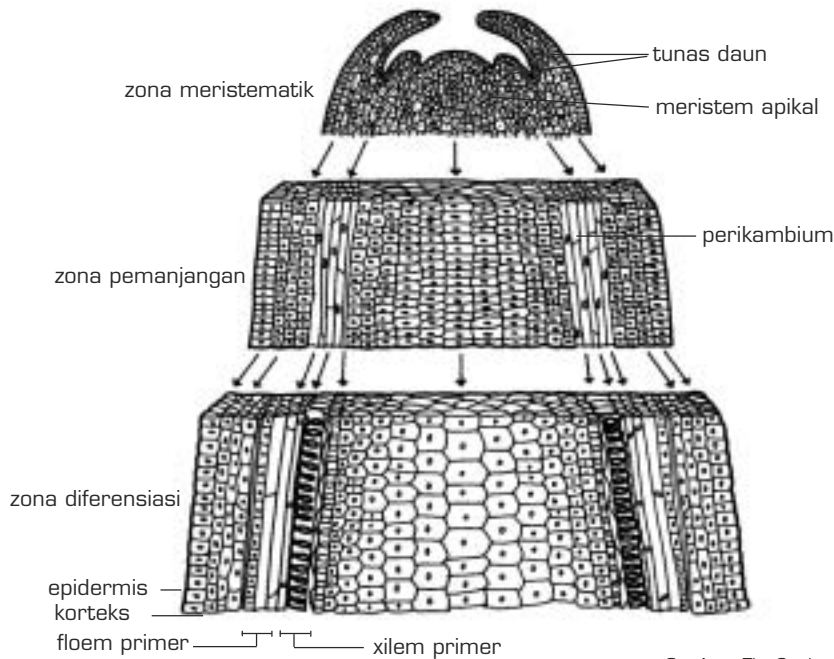
Biasanya dinding sel yang matang mengalami penebalan karena penumpukan substansi di sebelah dalam dinding tersebut. Pada jaringan yang berbeda, jenis dan jumlah substansi yang menumpuk berbeda pula sehingga menyebabkan perbedaan struktur.

b. **Pertumbuhan Batang**

Seperti halnya akar, pada ujung batang terdapat pula titik tumbuh. Titik tumbuh batang pada umumnya tidak mempunyai pelindung yang khusus, tetapi balutan bakal daunnya berfungsi sebagai pelindung. Pada ujung batang terdapat tiga daerah pertumbuhan perkembangan seperti pada ujung akar. Gambar 1.6 menunjukkan bagian-bagian batang menurut irisan memanjang, terdiri atas zona meristem, zona memanjang, dan zona pematangan (diferensiasi).

Pada zona meristem terdapat meristem apikal (titik tumbuh) dan bakal daun. Permukaan bawah daun lebih cepat tumbuh dibandingkan dengan bagian permukaan atas sehingga daun muda melengkung di atas titik tumbuh.

Pada zona pemanjangan sel-sel tumbuh memanjang dan membesar serta mulai tampak bakal jaringan pembuluh. Pada daerah diferensiasi terdapat bermacam-macam jaringan, tetapi pada dasarnya batang memiliki lapisan-lapisan jaringan yang sama dengan akar, yaitu epidermis, korteks, dan silinder pusat (stele). Pertumbuhan pada batang dibagi menjadi dua, yaitu *pertumbuhan primer* dan *pertumbuhan sekunder*.



Sumber: *The Study of Biology*, Baker

Gambar 1.6 Penampang membujur ujung batang dengan berbagai zona pertumbuhan

INFO BIOLOGI

Pertumbuhan

Pohon Albizzia termasuk keluarga tanaman polong-polongan yang dapat tumbuh cepat. Pertumbuhan tercepat pada jenis *Albizzia falcata*, salah satunya tumbuh mencapai 10,74 meter dalam waktu 13 bulan.

Apabila pertumbuhanmu seperti pohon ini kamu akan setinggi gedung 30 lantai saat kamu berumur 10 tahun.

Sumber: *Ilmu Pengetahuan Tumbuhan*

1) *Pertumbuhan Primer*

Titik tumbuh pada ujung akar dan ujung batang telah terbentuk sejak tumbuhan masih embrio. Oleh karena itu, titik tumbuh tersebut dinamakan *titik tumbuh primer*. Pertumbuhan yang disebabkan oleh aktivitas titik tumbuh primer disebut *pertumbuhan primer*.

2) *Pertumbuhan Sekunder*

Pertumbuhan sekunder merupakan lanjutan pertumbuhan primer. Pertumbuhan yang ditimbulkan titik tumbuh sekunder disebut pertumbuhan sekunder. Pertumbuhan ini hanya terdapat pada tumbuhan dikotil dan gimnospemae.

Aktivitas kambium menghasilkan jaringan baru yang menyebabkan akar dan batang tumbuh membesar. Oleh karena itu, kambium memegang peranan utama dalam proses pertumbuhan sekunder. Kambium yang memengaruhi pertumbuhan sekunder terdiri atas kambium primer dan kambium sekunder.

a) Kambium Primer

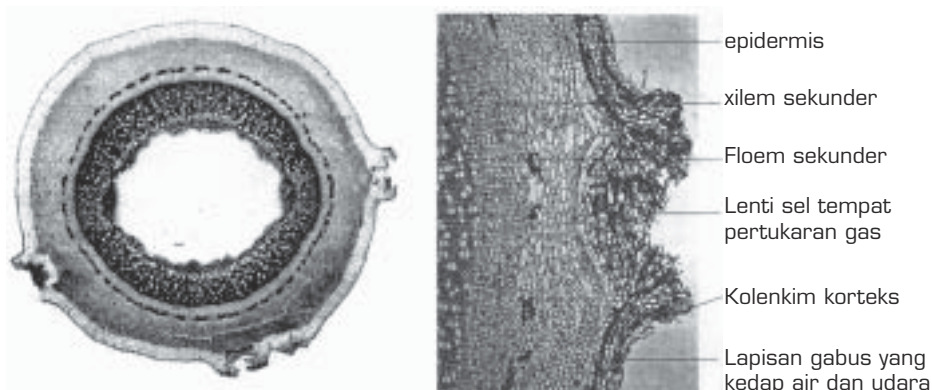
Kambium primer terdiri atas kambium fasikuler dan kambium interfasikuler yang bersangkutan antara yang satu dan yang lain sehingga membentuk suatu lingkaran.

Aktivitas kambium pada akar dan batang menghasilkan unsur-unsur kayu (xilem) ke arah dalam dan menghasilkan kulit kayu (floem) ke arah luar. Aktivitas kambium ke dalam jauh lebih besar daripada aktivitas ke luar sehingga bagian kayu jauh lebih tebal daripada bagian kulit kayu. Kambium juga menghasilkan sel-sel hidup yang berderet-deret menurut arah jari-jari dari bagian kayu sampai kulit dan disebut *jari-jari empulur*.

b) Kambium Sekunder (Kambium Gabus)

Pembentukan jaringan ke arah dalam oleh kambium lebih cepat daripada pertumbuhan jaringan ke arah luar. Hal ini menyebabkan jaringan-jaringan sebelah luar pecah-pecah dan rusak. Akibat kerusakan tersebut, di bawah epidermis terbentuk kambium gabus atau felogen yang bersifat meristematis.

Jaringan felogen membentuk floem ke arah luar dan membentuk feloderm ke arah dalam. Floem terdiri atas sel-sel mati, sedangkan feloderm terdiri atas sel-sel hidup. Pembentukan felerm dan feloderm, yang merupakan jaringan gabus, bersifat impermeabel terhadap air dan udara sehingga menyebabkan pertukaran gas melalui epidermis batang terhambat. Oleh karena itu, di tempat-tempat tertentu pada epidermis terdapat celah yang dinamakan *lenti sel* (perhatikan Gambar 1.7).



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 1.7 Penampang melintang batang tua dan lentisel

Pertumbuhan sekunder tidak berlangsung terus-menerus sepanjang tahun. Pada musim hujan, ketika air dan zat makanan cukup, terjadi pertumbuhan pesat, sedangkan pada musim kemarau pertumbuhan tersebut terhenti. Pertumbuhan jaringan sekunder selama satu masa tumbuh, yaitu dari musim kemarau ke musim kemarau lagi, tampak seperti lingkaran konsentris lingkaran tahun.

Tumbuhan monokotil tidak memiliki kambium. Oleh karena itu, tidak terjadi pertumbuhan sekunder. Batang monokotil setelah mencapai ukuran tertentu tidak akan bertambah besar lagi.

2. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Pertumbuhan

Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan, yaitu hereditas dan nutrisi. Berikut ini akan kamu pelajari tentang hereditas dan nutrisi.

a. Hereditas

Sel dikatakan unit hereditas karena di dalamnya terdapat kromosom dan gen yang bertanggung jawab dalam pewarisan sifat keturunan atau hereditas melalui pembiakan. Gen menumbuhkan jaringan dan organ yang akhirnya membina karakter makhluk hidup.

Dalam pertumbuhan tumbuhan, sel-sel membiak dengan membelah diri, menjadi besar, berdiferensiasi sesuai dengan pola hereditas dan menghasilkan sejumlah besar variasi sel yang terorganisasi dalam jaringan dan organ. Di samping itu, gen berperan pula dalam penyusunan enzim-enzim dan hormon tumbuh yang mengatur dan mengendalikan pertumbuhan.

b. Nutrisi

Nutrisi atau zat makanan berupa unsur-unsur atau senyawa kimia lainnya diperlukan tumbuhan sebagai sumber energi dan sumber materi untuk sintesis berbagai komponen sel yang diperlukan selama pertumbuhan. Unsur-unsur tersebut sebagian diperoleh dari dalam tanah yang diserap melalui bulu-bulu akar.

Unsur-unsur yang diperlukan oleh tumbuhan dalam jumlah relatif besar disebut unsur makro, yaitu C, O, H, N, S, P, K, Ca, dan Mg. Unsur-unsur yang diperlukan tumbuhan dalam jumlah sedikit disebut unsur mikro, yaitu Fe, Cl, Cu, Mn, Zn, Mo, Bo, dan Ni, sedangkan unsur-unsur yang diperlukan tumbuhan dalam jumlah sangat sedikit oleh tumbuhan tertentu disebut unsur tumbuhan. Hal ini berdasarkan pada hasil percobaan dari W. Pfeffer, Julius sach, dan W. Knop.

Jika kebutuhan salah satu unsur tersebut tidak terpenuhi, proses metabolisme tubuh tumbuhan akan terhambat, dan hal tersebut akan memengaruhi pertumbuhan seperti pada Gambar 1.8.



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 1.8 1-2-3-4-5-7-8-9-10 = Tanaman yang kekurangan salah satu unsur hara
6 = Tanaman dengan nutrisi lengkap terpenuhi

Setiap unsur yang dibutuhkan tumbuhan memiliki peranan dan menimbulkan gejala tertentu apabila terjadi kekurangan atau kelebihan. Berikut ini beberapa unsur yang dibutuhkan tumbuhan beserta fungsinya, dan gejala yang timbul apabila kekurangan unsur tersebut.

- a. Nitrogen (N) merupakan komponen struktural protein, asam nukleat, hormon, dan enzim. Gejala kekurangan N, yaitu pertumbuhan terhambat (tumbuhan menjadi kerdil), serta daun menjadi pucat dan kuning.
- b. Kalium (K) berfungsi untuk mengatur keseimbangan ion di dalam sel serta merupakan kofaktor enzim dan berperan di dalam metabolisme karbohidrat. Gejala kekurangan kalium, yaitu perubahan karbohidrat terhambat dan daun berwarna kuning.
- c. Fosfor (P) merupakan penyusun fosfolipid asam nukleat dan ATP (adenosin triposfat). Gejala kekurangan P, yaitu pertumbuhan terhambat dan daun berwarna hijau tua serta ada bagian yang mati.
- d. Sulfur (S) merupakan komponen asam amino, sistein, metionin, dan beberapa vitamin. Gejala kekurangan S, yaitu daun menjadi kuning.
- e. Magnesium (Mg) merupakan penyusun klorofil dan kofaktor beberapa enzim. Gejala kekurangan Mg, yaitu klorosis, daun menguning dan kering mulai dari ujung.

- f. Kalsium (Ca) berfungsi untuk mempertahankan permeabilitas membran plasma dan menyusun asam pekat dalam lamela tengah (middle lamela). Gejala kekurangan Ca, yaitu pertumbuhan terhambat karena lamela tengah tidak terbentuk sehingga pembelahan sel terganggu.
- g. Besi (Fe) berperan dalam pembentukan klorofil dan merupakan bagian terpenting dari enzim sitokrom, peroksidase, dan katalase. Gejala kekurangan Fe, yaitu klorosis, helai daun menguning.
- h. Boron (B) belum diketahui fungsinya secara jelas, diduga berperan dalam transpor glukosa. Gejala kekurangan B, yaitu ujung-ujung batang mengering dan rusak.
- i. Mangan (Mn) merupakan kofaktor enzim pernapasan, fotosintesis, dan metabolisme nitrogen. Gejala kekurangan Mn, yaitu daun berwarna pucat (klorosis).
- j. Seng (Zn) berperan dalam sintesis asam amino serta merupakan aktivator enzim dehidrogenase. Gejala kekurangan Zn, yaitu pertumbuhan terhambat.
- k. Tembaga (Cu) berperan dalam transfer elektron di dalam kloroplas dan merupakan bagian dari enzim reaksi oksidasi-reduksi. Gejala kekurangan Cu, yaitu daun-daunan berguguran dan ujung daun menjadi kisut.
- l. Molibdenum (Mo) merupakan bagian dari enzim pereduksi nitrat dan fiksasi nitrogen. Gejala kekurangan Mo, yaitu pertumbuhan terhambat.

Pengetahuan tentang berbagai nutrisi yang dibutuhkan tumbuhan dimanfaatkan oleh para petani untuk bercocok tanam secara hidroponik, seperti pada Gambar 1.9. Hidroponik merupakan pengembangan teknik bercocok tanam dengan air yang mengandung nutrisi tertentu sebagai medium tanam. Banyak industri pertanian yang berkembang pesat berawal dari hidroponik.



Gambar 1.9
Bercocok tanam dengan teknik hidroponik.

Sumber: *The Study of Biology*, Baker

Tugas 1.2

Cobalah menanam sayuran secara hidroponik, seperti tomat, terong atau cabai, dengan meminta bimbingan Dinas Pertanian setempat. Lakukan secara berkelompok, lalu buatlah laporannya.

c. Hormon

Pada tumbuhan, tidak dikenal adanya kelenjar serta sistem sirkulasi seperti pada hewan, tetapi tumbuhan memiliki kemampuan menyusun suatu senyawa organik yang didistribusikan dari suatu bagian tertentu dan memberikan reaksi fisiologis pada bagian lain. Senyawa tersebut dinamakan *fitohormon* (hormon tumbuhan) yang berfungsi sebagai zat pengatur. Oleh karena itu, para ahli botani menyebutnya substansi regulator pertumbuhan. Dewasa ini dikenal beberapa fitohormon, yaitu auksin, giberelin, sitokinin, dan etilen.

1) Auksin

Auksin merupakan hormon pertumbuhan yang sangat penting. Auksin ditemukan oleh F.W. Went pada tahun 1928. Senyawa tersebut didapatkan pada ujung koleoptil kecambah *Avena Sativa* sejenis gandum. Selain di ujung koleoptil, auksin dihasilkan juga pada ujung batang, tunas puncak daun muda, dan buah yang sedang tumbuh. Auksin berfungsi untuk memacu perpanjangan sel di daerah belakang meristem.

Auksin beredar ke seluruh tubuh tumbuhan dari pusat pembentukan, yaitu di ujung koleoptil, menuju ke arah basipetal, yaitu akar. Berdasarkan eksperimen dapat ditunjukkan bahwa walaupun batang diletakkan terbalik, yaitu ujung batang berada di bawah, auksin tetap akan dialirkan menuju akar yang dalam keadaan tersebut berada di atas.

Dari hasil penelitian dapat diketahui ada beberapa macam auksin, di antaranya:

- a) Auksin a – terdapat pula pada urine hewan dan manusia.
- b) Auksin b – terdapat pada minyak kecambah jagung.

Beberapa auksin dibuat secara sintesis, yaitu Asam Indole Asetat, Asam Indole Butirat, dan Asam Naftalen Asetat. Heteroauksin dikenal juga dengan nama Asam Indole Asetat.

Secara ringkas fungsi auksin adalah sebagai berikut.

- a) Merangsang pembelahan, perpanjangan, dan diferensiasi sel-sel pada daerah titik tumbuh.
- b) Menghambat pembentukan tunas.
- c) Merangsang pembentukan bunga dan buah.

Hubungan Auksin dengan Beberapa Proses Fisiologi

Secara fisiologis fitohormon berpengaruh terhadap berbagai proses, di antaranya proses pengembangan sel, fototropisme, geotropisme, pertumbuhan akar, partenokarpi, peluruhan, dan apikal dominan.

(1) Proses pengembangan sel

Heteroauksin yang dihasilkan di bagian ujung memengaruhi sintesis enzim tertentu yang kelak akan diteruskan menuju dinding sel dan menyebabkan dinding sel menjadi elastis. Dengan adanya sifat elastis tersebut, dinding sel mudah merenggang dan dapat tumbuh memanjang.

(2) Fototropisme

Fototropisme adalah peristiwa pergerakan tumbuhan ke arah datangnya cahaya. Hal ini terjadi karena bagian yang tidak mendapat cahaya akan bertambah panjang dan lebih cepat.

Cholodny dan *Went* menerangkan bahwa cahaya menyebabkan terjadinya pemindahan auksin secara lateral dari bagian yang terkena cahaya menuju bagian yang tidak terkena cahaya. Dengan demikian, jumlah auksin yang ada di bagian gelap akan lebih banyak daripada di bagian terang. Hal ini menyebabkan bagian batang yang tidak terkena cahaya akan bertambah panjang lebih cepat, akibatnya batang membelok ke arah cahaya.

(3) Geotropisme

Geotropisme adalah pengaruh gravitasi bumi terhadap pertumbuhan yang terdiri atas:

- (a) Geotropisme positif, yaitu gerak akar yang mengarah ke pusat bumi.
- (b) Geotropisme negatif, yaitu gerak batang yang menjauhi pusat bumi.

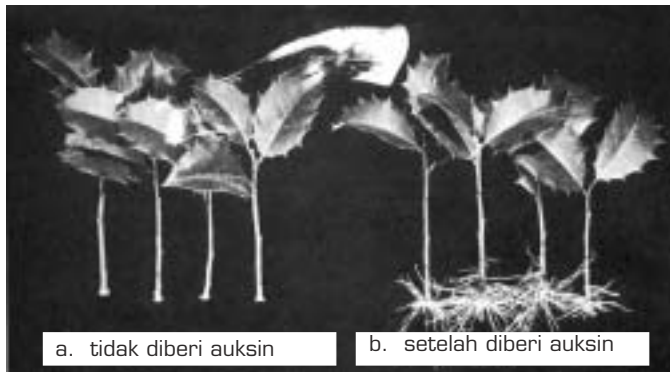
Untuk memahami hubungan geotropisme dan auksin perlu diingat adanya dua aspek penting mendasar, yaitu sebagai berikut.

- (a) Jumlah auksin yang relatif besar pada batang akan menyebabkan batang tumbuh lebih cepat, sebaliknya dengan jumlah auksin relatif kecil pada akar akan terhambat pertumbuhannya.
- (b) Selain gerak penyebaran auksin yang basipetal, adanya gravitasi juga turut berpengaruh, hal ini dapat diterangkan melalui percobaan sebagai berikut. Jika suatu tumbuhan dalam pot diletakkan mendatar, auksin lebih banyak di bagian bawah dibandingkan dengan bagian atas. Jumlah auksin yang lebih banyak di sisi sebelah bawah akan memberikan pengaruh yang berbeda pada akar dan batang. Pada batang menyebabkan sisi sebelah bawah tumbuh panjang lebih cepat, akibatnya batang akan tumbuh ke atas menjauhi pusat bumi. Sebaliknya pada akar, jumlah auksin yang lebih banyak pada sisi sebelah bawah akan menghambat pertumbuhan bagian tersebut sehingga sisi atas tumbuh lebih cepat dibandingkan sisi bawah akibat akar tumbuh menuju pusat bumi.

(4) Auksin dan pembentukan akar

Dari pengalaman sehari-hari dapat diketahui adanya tanaman yang dapat dibiakkan secara vegetatif dengan stek. Pemakaian berbagai macam fitohormon pada stek daun, batang, dan akar dapat merangsang pertumbuhan akar, seperti auksin asam Indole Butirat, dan asam Naftalena Asetat.

Pengetahuan pemakaian berbagai macam fitohormon dalam merangsang pertumbuhan akar dimanfaatkan para petani untuk membiakkan secara vegetatif agar keturunannya tetap memiliki ciri-ciri yang diinginkan seperti induknya dan tumbuh cepat, seperti yang tampak pada Gambar 1.10.



Gambar 1.10
Pengaruh auksin pada pembentukan akar

Sumber: *The Study of Biologi*, Baker

(5) Partenokarpi

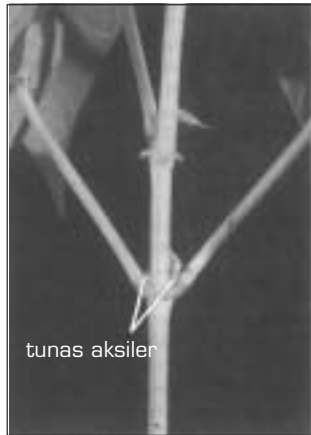
Partenokarpi adalah pembentukan buah tanpa terjadi pembuahan sehingga menghasilkan buah tanpa biji, seperti yang terjadi pada buah pisang, anggur tak berbiji, dan jeruk tak berbiji.

Buah partenokarpi dapat dihasilkan secara buatan dengan cara pemberian auksin pada putiknya. Untuk itu digunakan asam Indole Butirat, giberelin, dan sitokinin. Pengetahuan tersebut di atas dimanfaatkan para petani untuk menghasilkan buah-buahan tanpa biji seperti yang telah kita nikmati dewasa ini. Menurut penelitian Muir (1924), kandungan auksin pada ovarium yang mengalami pembuahan meningkat dan menyebabkan pembengkakan dinding ovarium. Pembengkakan ini disebabkan oleh auksin yang berasal dari serbuk sari atau auksin yang disintesis pada bakal buah sebagai hasil rangsangan serbuk sari. Pemberian auksin pada bunga merupakan suplai auksin tanpa adanya serbuk sari.

(6) Apikal dominan

Apikal dominan merupakan suatu gejala bahwa selama pucuk batang (tunas terminal) masih ada, pertumbuhan tunas samping (tunas lateral) akan terhambat. Kalau tunas terminal dihilangkan, tunas ketiak daun akan segera tumbuh. Pengaruh tunas pucuk (terminal) yang menekan tunas lateral disebut

apikal dominan. Dalam percobaan, jika tunas terminal yang dipotong diganti dengan potongan agar-agar yang mengandung auksin, tidak terjadi pertumbuhan tunas lateral, jika potongan agar-agar tadi diambil, pertumbuhan tunas lateral akan terbentuk, seperti terlihat pada Gambar 1.11.



Gambar 1.11

- a. Auksin dari tunas apikal menghambat pertumbuhan tunas
- b. Pembuangan tunas apikal dari tumbuhan yang sama memungkinkan tumbuhnya cabang lateral

Sumber: *Biologi jilid 2*, Campbell

(7) Peluruhan

Peluruhan merupakan suatu proses alami yang terjadi pada bagian tumbuhan, seperti pada daun, buah, dan bunga. Peluruhan akan berlangsung karena terbentuknya suatu lapisan melintang yang sel-sel parenkimnya terpisah karena proses penuaan. Lapisan tersebut dinamakan lapisan peluruh pada tangkai daun, bunga, dan buah. Jika helai daun dipotong, tangkai daun akan meluruh karena hilangnya persediaan auksin pada daun. Akan tetapi, jika tangkai daun tersebut diberi auksin, peluruhan dapat terhambat.

2) Giberelin



Sumber: *Biologi Jilid 2*, Campbell

Gambar 1.12 Pengaruh giberelin pada anggur tak berbiji

Giberelin ditemukan oleh F. Kurasawa (1926) yang diperoleh dari jenis jamur *Gibberella Fujikuroi*, parasit pada tanaman padi. *Gibberella* ini berpengaruh pada pembelahan dan pemanjangan sel tumbuhan. Dari percobaan di University of Michigan, kubis yang tingginya biasanya hanya 3 dm, setelah diberi giberelin tingginya dapat mencapai 3,5 m. Selain itu, giberelin juga mempercepat pertumbuhan buah-buahan seperti tampak pada Gambar 1.12 sehingga waktu panen dapat dipercepat sampai hampir 50%.

Sebelum giberelin dapat diisolasi, jamur *Gibberella* dikultur dalam medium cair, maka cairan akan mengandung sekresi dari jamur tersebut. Sekarang telah diketahui bahwa giberelin terdapat pada berbagai bagian jenis tumbuhan sebagai regulator pertumbuhan.

INFO BIOLOGI

Sayuran Raksasa dari Jepang

Seorang petani Jepang dapat mengembangkan lobak dengan memanfaatkan hormon giberelin hingga panjangnya mencapai 1,2 m dengan bobot 20 kg.

Sumber: Pustaka Alam Life

3) *Sitokinin*

Pada tahun 1950, F. Skoog dan C.O Miller menemukan regulator pertumbuhan yang disebut *sitokinin*. Pada tumbuhan, sitokinin merangsang pembelahan sel (sitokinesis) yang banyak berpengaruh pada pertumbuhan akar dan tunas. Sitokinin diperoleh dari ragi, santan kelapa, ekstrak buah apel, dan dari materi tumbuhan lain. Penelitian terakhir menunjukkan bahwa sitokinin berperan dalam pengontrolan hampir semua fase pertumbuhan, bekerja sama dengan auksin. Sitokinin yang telah lama dikenal adalah *kinetin* dan *zeatin*.

4) *Etilen*

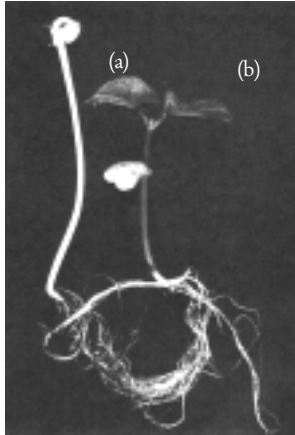
Etilen merupakan regulator pertumbuhan pada tumbuhan yang memengaruhi pematangan buah-buahan. Sebuah apel matang yang disimpan bersama apel yang belum matang akan mempercepat pematangan apel lainnya.

Dewasa ini pengetahuan tersebut telah dimanfaatkan secara komersial, yaitu untuk melunakkan buah-buahan yang masih keras. Hormon lain yang terdapat pada tumbuhan, yaitu kalin dan florigen.

1. *Kalin*, berfungsi mengatur pembentukan organ tumbuhan. Misalnya, *rizokalin* mengatur pembentukan akar, *kaulokalin* mengatur pembentukan batang, *fitokalin* mengatur pembentukan daun.
2. *Florigen* berfungsi mengatur pertumbuhan bunga.

d. Cahaya

Cahaya mutlak diperlukan sebagai sumber energi terbesar bagi makhluk hidup. Tumbuhan hijau memanfaatkan cahaya secara langsung dalam proses fotosintesis dan secara tidak langsung energinya dibutuhkan oleh hewan dan manusia.



Sumber: *Biologi Jilid 2, Campbell*

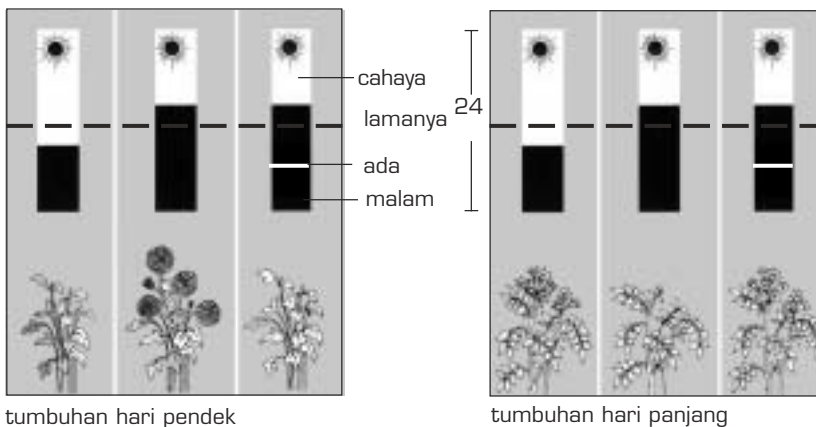
Gambar 1.13 Pertumbuhan kecambah kacang hijau berumur 7 hari
a. di tempat gelap b. di tempat terang

Umumnya cahaya merupakan faktor yang menghambat pertumbuhan karena cahaya dapat menyebabkan translokasi hormon (regulator pertumbuhan). Hal ini dapat dibuktikan dengan menempatkan dua pot kecambah, yang satu disimpan di tempat yang gelap dan yang satunya lagi disimpan di tempat yang terang atau banyak cahaya. Perhatikan Gambar 1.13, dalam beberapa hari kecambah di tempat gelap lebih cepat tumbuh dengan ruas-ruas yang panjang, tetapi keadaannya lemah. Pertumbuhan yang cepat di tempat gelap ini disebut *etiolasi*.

Fotoperiodisme

Lamanya penyinaran juga memengaruhi pertumbuhan. Di daerah subtropik, beberapa jenis tanaman termasuk tumbuhan hari panjang. Bunga mekar pada akhir musim panas, yaitu setelah tumbuhan mendapat penyinaran lebih dari 12 jam. Pertumbuhan vegetatif dan generatif suatu tumbuhan sangat dipengaruhi oleh lamanya penyinaran. Tanggapan suatu tumbuhan terhadap panjang pendeknya hari disebut *fotoperiodisme*. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 1.14.

Cahaya juga merangsang pertumbuhan bunga. Ada tumbuhan yang berbunga pada hari pendek (lamanya penyinaran matahari lebih pendek daripada waktu malam). Ada pula tumbuhan yang berbunga pada hari panjang (lamanya penyinaran matahari lebih panjang daripada waktu malam). Hal ini berkaitan dengan aktivitas hormon fitokrom pada tumbuhan.



Sumber: *Biologi Jilid 2, Campbell*

tumbuhan hari pendek

tumbuhan hari panjang

Gambar 1.14 Tumbuhan hari pendek berbunga jika malam lebih panjang daripada waktu siang. Tumbuhan hari panjang berbunga jika siang lebih panjang daripada waktu malam.

Sebagai contoh tanaman kol (*Brassica Sp*) di Indonesia tidak pernah berbunga. Akan tetapi, jika diberi cahaya dalam waktu yang lebih lama secara periodik, tanaman kol dapat tumbuh memanjang dan berbunga. Beberapa tumbuhan hari panjang dapat berbunga jika diberi Giberelin atau sitokinin.

e. Suhu

Dengan percobaan dan pemeliharaan pertumbuhan dalam berbagai suhu, dapat diketahui pengaruh suhu terhadap proses tumbuh, perhatikan Gambar 1.15. Umumnya tumbuhan tidak tumbuh di bawah suhu 0°C dan di atas 40°C . Suhu yang dikehendaki atau yang baik bagi pertumbuhan adalah $20^{\circ}\text{C} - 37^{\circ}\text{C}$.

Untuk tumbuh normal pada habitatnya, makhluk hidup memiliki kisaran suhu tertentu, yaitu sebagai berikut.



Sumber: *The Study of Biology*, Baker

Gambar 1.15 Pengaruh suhu pada *Bowallia*

- 1) Suhu minimum adalah suhu terendah. Pada suhu ini tumbuhan masih dapat tumbuh. Suhu minimum untuk tumbuhan di daerah tropis adalah 10°C , sedangkan di daerah subtropis 5°C .
- 2) Suhu maksimum adalah suhu tertinggi. Pada suhu ini tumbuhan masih dapat tumbuh.
- 3) Suhu optimum adalah suhu yang paling sesuai bagi pertumbuhan tumbuhan.

Apabila suhu lingkungan suatu tumbuhan di bawah suhu minimum, segala aktivitas fisiologi tubuhnya akan terhenti, dan ini disebut masa tidur (Dormansi), keadaan ini terjadi pada beberapa tumbuhan pada musim dingin di negara-negara yang memiliki 4 musim.

f. Kelembapan

Kelembapan udara dan tanah sangat berpengaruh dalam proses pertumbuhan. Kelembapan udara memengaruhi proses penguapan air yang berkaitan dengan penyerapan unsur hara. Jika kelembapan udara rendah, penguapan akan besar sehingga penyerapan unsur hara pun makin banyak. Hal ini dapat memacu pertumbuhan.

Kelembapan tanah bergantung pada kandungan organik di dalamnya. Makin tinggi kandungan bahan organik dalam tanah, makin banyak pula jumlah air yang dapat diikat. Hal tersebut dapat mengurangi kepadatan struktur tanah sehingga porositas dan sirkulasi menjadi lebih baik. Hal ini penting karena sel-sel akar tanaman memerlukan oksigen untuk respirasi sel yang energinya diperlukan untuk proses transpor aktif dalam penyerapan unsur hara tanaman. Beberapa tumbuhan yang berkembang biak secara generatif, memerlukan kelembapan lebih rendah sehingga tumbuhan tersebut berbunga pada awal musim kemarau.

Rangkuman

1. Langkah-langkah dalam melaksanakan percobaan, yaitu mengumpulkan data, merumuskan masalah, menyusun hipotesis, prediksi, dan merencanakan eksperimen.
2. Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan dinamakan variabel bebas, sedangkan pertumbuhan tumbuhannya dinamakan variabel terikat.
3. Cara mengomunikasikan hasil percobaan dapat secara lisan melalui diskusi ataupun secara tertulis berupa laporan.
4. Tumbuh adalah perubahan volume yang ireversibel disertai dengan penambahan substansi maupun jumlah sel. Pertumbuhan dapat diukur dengan menggunakan auksanometer.
5. Pada ujung akar dan ujung batang terdapat titik tumbuh yang tersusun atas jaringan meristem dan sel-selnya aktif membelah.
6. Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan, yaitu hereditas, nutrisi, hormon, cahaya, suhu, dan kelembapan.
7. Dewasa ini dikenal beberapa fitohormon, yaitu auksin, giberelin, sitokinin, dan etilen.

Kata Kunci

auksanometer
auksin
etilen
etiolasi
fotoperiodisme

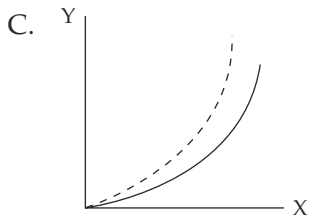
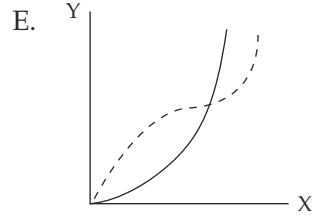
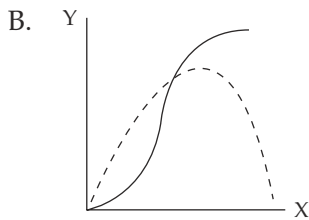
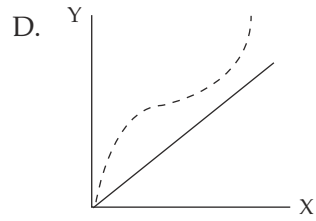
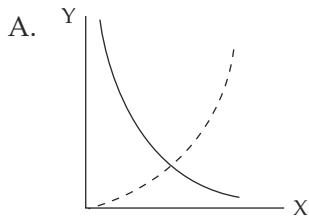
giberelin
meristem
pertumbuhan primer
pertumbuhan sekunder

Evaluasi Akhir Bab

A. Pilih jawaban yang paling tepat.

- Bertambah besarnya batang dan akar tumbuhan disebabkan oleh
 - bertambah besarnya sel dalam jaringan
 - bertambah banyaknya sel dalam jaringan
 - bertambah besar dan tebalnya dinding sel
 - bertambah besar dan banyaknya sel jaringan
- Kaidah penyusunan laporan karya tulis ilmiah adalah
 - hipotesis merupakan bagian bab I
 - kajian teori merupakan bagian bab II
 - rancangan penelitian merupakan bagian bab I
 - pembahasan merupakan bagian bab III
 - kesimpulan merupakan bagian bab IV
- Dari hasil percobaan penanaman biji kacang, yang termasuk data kualitatif adalah
 - mulai tumbuhnya akar
 - tumbuhnya daun pertama
 - kotiledon mulai menyusut
 - ada tidaknya cahaya matahari
 - tinggi kecambah
- Di bawah ini hal-hal yang memengaruhi pertumbuhan.
 - cahaya
 - suhu
 - kelembapan
 - kadar O_2
 - jenis bijiDari hal-hal tersebut, yang termasuk variabel bebas adalah
 - 1 – 2 – 3 – 4
 - 1 – 2 – 3 – 5
 - 2 – 3 – 4 – 5
 - 1 – 2 – 4 – 5
 - 1 – 3 – 4 – 5
- Suatu kecambah mengalami etiolasi, artinya kecambah tersebut mengalami
 - pembesaran tubuh yang tidak normal
 - pertumbuhan terlalu cepat di tempat gelap
 - pertumbuhan lambat di tempat gelap
 - pertumbuhan lambat karena ada cahaya
 - perkembangan terlalu cepat di tempat gelap

6. Grafik yang menunjukkan perbandingan pertumbuhan antara kecambah di tempat terang dan di tempat gelap adalah



Keterangan:
 y = pertumbuhan kecambah
 x = waktu
 - - - - = tempat gelap
 ——— = tempat terang

7. Tiga faktor penting yang memengaruhi perkecambahan biji adalah

- A. air, udara, dan tanah
- B. tanah, udara, dan suhu
- C. tanah, air, dan suhu
- D. cahaya, suhu, dan kelembapan
- E. air, udara, dan suhu

8. Hormon pada tumbuhan berfungsi untuk merangsang pembentukan organ-organ tubuh di antaranya hormon:

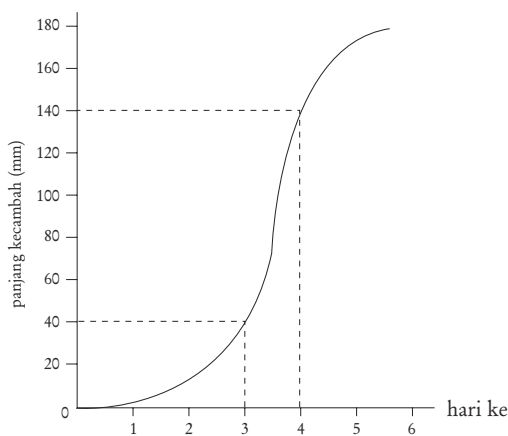
- | | | |
|--------------|---------------|--------------|
| 1. autokalin | 3. kaulokalin | 5. auksin |
| 2. rizokalin | 4. fitokalin | 6. traumalin |

Hormon yang berfungsi untuk merangsang pembentukan bunga, akar, dan daun adalah

- | | |
|----------|----------|
| A. 1-2-3 | D. 3-4-5 |
| B. 1-2-4 | E. 2-3-5 |
| C. 4-5-6 | |

9. Para petani, saat ini sudah dapat menghasilkan buah-buahan tanpa biji. Hal ini atas pengetahuan dari fungsi hormon
- A. auksin
B. etilen
C. sitokinin
D. giberelin
E. traumalin
10. Auksin dapat bekerja sebagai zat yang dapat mempercepat pertumbuhan apabila berada dalam keadaan
- A. tidak terkena sinar matahari
B. tidak dipengaruhi sinar
C. sinar cukup terang
D. udara lembap
E. suhu udara tinggi

11.



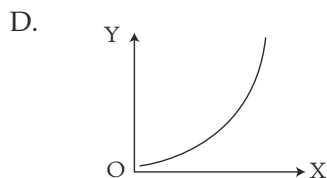
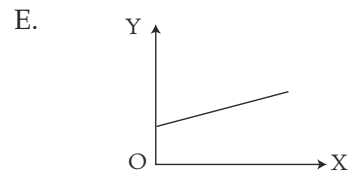
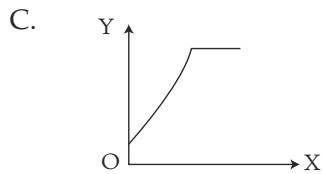
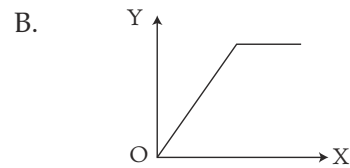
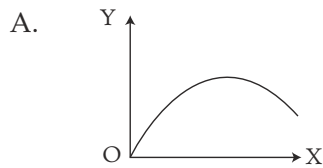
Perhatikan grafik pertumbuhan kecambah di samping ini.

- Berdasarkan grafik tersebut, kecepatan pertumbuhan yang paling besar pada hari ke
- A. 0 – 1
B. 1 – 2
C. 2 – 3
D. 3 – 4
E. 4 – 5
12. Ciri tumbuhan telah dewasa salah satunya adalah
- A. berbunga dan berbuah
B. tumbuhnya tunas pada ketiak daun
C. batangnya bertambah besar
D. kulit batang terlihat retak-retak
E. tumbuhnya akar cabang
13. Pada pertumbuhan akar, zona yang sel-selnya mengalami diferensiasi adalah
- A. tudung akar
B. meristem
C. elongasi
D. pematangan
E. meristem dan elongasi

14. Hormon tumbuhan yang memengaruhi pematangan buah adalah
- sitokinin
 - auksin
 - etilen
 - hetero auksin
 - asam absisat
15. Berikut ini tabel hasil pengamatan pertumbuhan selama 10 hari.

Pertumbuhan Kecambah										
Hari ke-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Panjang (mm)	0,0	0,5	1	4	4,5	5,5	6,0	6,2	7,1	7,2

Berdasarkan tabel di atas, grafik di bawah ini yang menunjukkan hubungan panjang kecambah dengan lama pengamatan adalah



Keterangan:
Sumbu X = waktu/hari
Sumbu Y = panjang kecambah

B. Jawab pertanyaan berikut ini dengan benar.

1. Pada pertumbuhan akar kecambah, tunjukkan bagian manakah yang lebih cepat tumbuh. Mengapa demikian? Jelaskan.
2. Tuliskan 3 daerah pertumbuhan pada batang, daerah manakah yang pertumbuhannya lebih cepat.
3. Jelaskan perbedaan pertumbuhan dan perkembangan.
4. Pertumbuhan dipengaruhi oleh 3 faktor, baik faktor luar maupun faktor dari dalam. Sebutkan faktor-faktor tersebut.
5. Jelaskan pengaruh cahaya terhadap pertumbuhan tumbuhan.

Bab II

Metabolisme



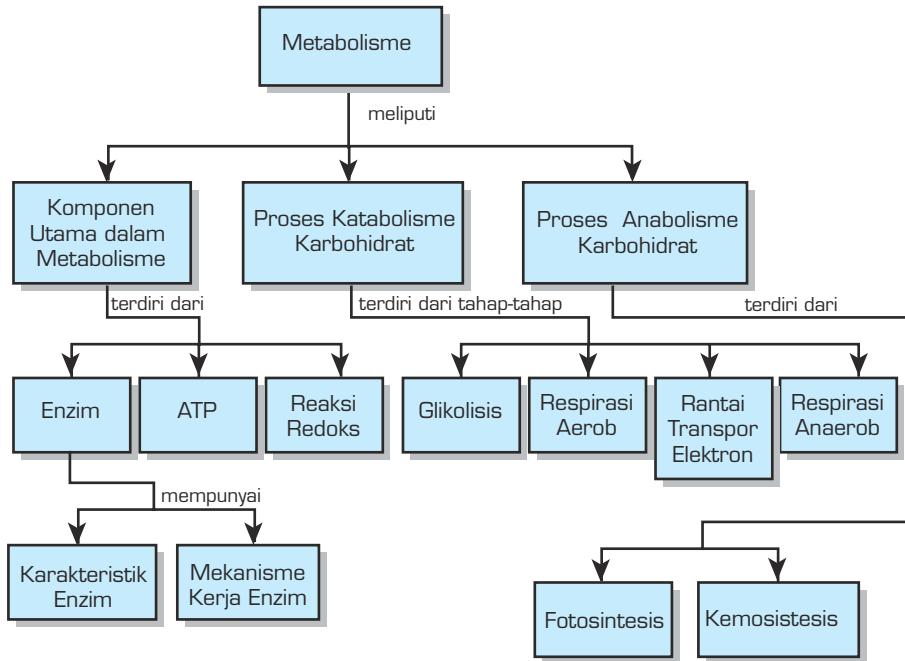
Sumber: *Biology*, Printice-Hall

TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, siswa dapat:

1. menjelaskan pengertian metabolisme dan mendeskripsikan fungsi enzim dalam proses metabolisme;
2. menguraikan proses-proses katabolisme dan anabolisme karbohidrat;
3. mengaitkan proses metabolisme karbohidrat dengan metabolisme lemak dan metabolisme protein;
4. mengumpulkan informasi teknologi yang berkaitan dengan metabolisme makanan.

PETA KONSEP



Kamu pasti sudah tahu bahwa salah satu kebutuhan utama makhluk hidup adalah makanan. Makanan merupakan bahan utama yang kita butuhkan untuk menghasilkan energi guna melaksanakan semua aktivitas hidup. Bagaimana dan di mana makanan dapat diubah menjadi suatu bentuk energi yang siap pakai sehingga suatu aktivitas dapat terjadi? Kamu pasti sudah menduga bahwa perubahan makanan menjadi energi, tentu terjadi dalam sel sebagai suatu satuan fungsional dan struktural terkecil yang menyusun tubuh makhluk hidup. Pada bab ini kita akan membahas tentang bagaimana proses perubahan suatu zat makanan menjadi suatu bentuk energi siap pakai melalui reaksi katabolisme dan bagaimana makhluk hidup, khususnya tumbuhan membentuk suatu zat asal menjadi zat makanan yang siap dimanfaatkan melalui reaksi anabolisme.

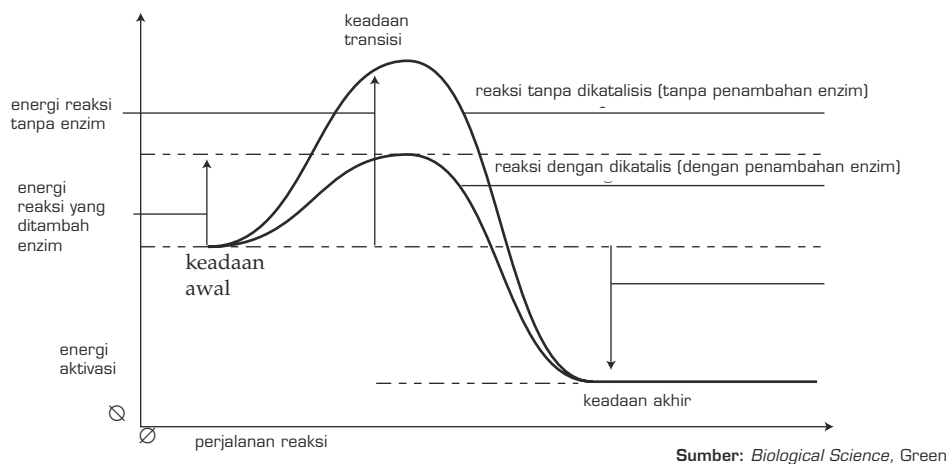
Sel sebagai satuan fungsional dan struktural terkecil dalam tubuh makhluk hidup, dapat diibaratkan sebagai suatu mesin kimia. Sebagaimana suatu mesin kimia, untuk mempertahankan kelangsungan hidup mesin tersebut, sel mengonsumsi bahan bakar berupa makanan (terutama glukosa) dan membebaskan hasil berupa energi dan zat sisa berupa karbon dioksida dan air. Energi yang dihasilkan sel dari bahan makanan digunakan untuk melakukan kerja, yaitu bergerak, memperbaiki bagian yang rusak, menyusun bagian tubuh, dan aktivitas lainnya. Proses perubahan zat makanan menjadi energi yang siap digunakan, harus melalui suatu rangkaian reaksi kimia yang tidak sederhana. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, reaksi kimia ini terjadi pada sel yang merupakan materi hidup sehingga reaksinya adalah reaksi *biokimia*. Seluruh proses atau reaksi biokimia dalam sel untuk memperoleh dan menggunakan energi guna melaksanakan aktivitas serta untuk menjaga kelangsungan hidupnya disebut *metabolisme*. Metabolisme terdiri atas reaksi pemecahan makanan menjadi energi atau katabolisme dan reaksi pembentukan zat makanan atau anabolisme. Untuk mengetahui konsep-konsep penting yang akan dipelajari dalam bab ini, kamu dapat melihat bagan konsep pada halaman sebelumnya.

A. Komponen-Komponen Utama Metabolisme

Seperti telah disinggung pada bagian pendahuluan, untuk berlangsungnya suatu proses metabolisme, dibutuhkan komponen-komponen penunjang. Tanpa komponen-komponen tersebut, peristiwa metabolisme tidak dapat berjalan dengan lancar. Di bawah ini akan dibahas komponen penunjang yang penting dalam metabolisme meliputi enzim, ATP, serta reaksi oksidasi dan reduksi.

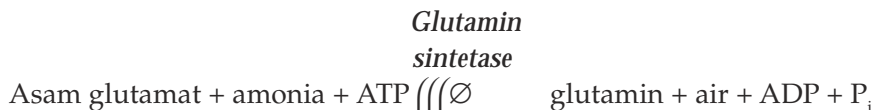
1. Enzim

Reaksi-reaksi dalam metabolisme adalah suatu peristiwa perubahan dari suatu bentuk ke bentuk lain. Untuk terjadinya perubahan dibutuhkan penyediaan energi untuk mengaktifkan reaksi yang disebut energi aktivasi. Setiap reaksi membutuhkan energi tersebut. Dalam suatu reaksi biokimia tanpa enzim, energi aktivasi yang dibutuhkan jauh lebih besar dibandingkan reaksi biokimia dengan bantuan enzim. Dengan kata lain, enzim dapat menurunkan energi aktivasi yang berarti kebutuhan energi menjadi berkurang dan reaksi menjadi lebih efisien. Jadi, dapat dikatakan bahwa enzim adalah suatu biokatalisator (katalis kehidupan). Perhatikan Gambar 2.1.

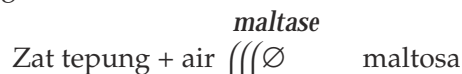


Gambar 2.1 Hubungan antara energi aktivasi dan kerja enzim sebagai katalis reaksi

Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa enzim adalah suatu katalis biologis yang sangat penting dalam suatu reaksi biokimia karena tanpa adanya enzim, reaksi tersebut akan berlangsung sangat lambat dan membutuhkan energi aktivasi yang tinggi dan kelangsungan hidup sel menjadi terganggu. Enzim dapat bekerja dalam reaksi pembentukan maupun penguraian. Contoh enzim yang bekerja dalam reaksi pembentukan adalah glutamin sintetase dengan reaksi sebagai berikut.



Contoh enzim yang bekerja dalam reaksi penguraian adalah maltase dengan reaksi sebagai berikut:



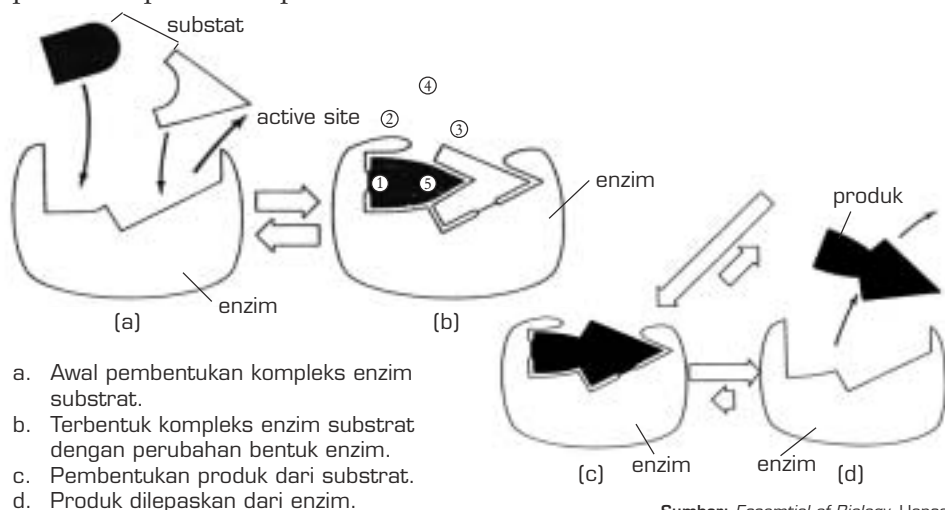
Karakteristik dan Mekanisme Kerja Enzim

Enzim adalah suatu senyawa yang terdiri atas dua bagian (enzim lengkap / holoenzim), yaitu *bagian protein* dan *bagian bukan protein*. Bagian protein disebut apoenzim dan bagian bukan protein disebut gugus prostetik. Gugus prostetik yang berasal dari molekul anorganik (misalnya besi, tembaga, atau seng) disebut kofaktor, sedangkan gugus prostetik yang berasal dari senyawa organik kompleks disebut koenzim (misalnya NADH, FADH, koenzim A).

Dalam sel hidup dapat terkandung beratus-ratus enzim untuk mengatalisis reaksi-reaksi yang berlainan. Sifat utama enzim adalah bersifat sangat spesifik, yaitu hanya dapat mengatalisis suatu reaksi tertentu, misalnya enzim sukrase hanya dapat mengatalisis reaksi perubahan dari sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Bahan tempat enzim bekerja disebut *substrat*, sedangkan hasil reaksinya disebut *produk*.

Spesifitas enzim berhubungan dengan strukturnya. Pada permukaan molekul enzim terdapat suatu area kecil yang disebut tapak aktif (*active site*) yang merupakan tempat terikatnya substrat dengan molekul enzim. Bentuk *active site* menentukan substrat yang dapat bereaksi dengan enzim tersebut untuk membentuk suatu produk. Kesesuaian antara permukaan substrat dan *active site* seperti kecocokan antara kunci dan anak kuncinya.

Sifat lain enzim adalah tidak ikut dalam reaksi. Berarti enzim hanya memproses substrat menjadi suatu produk tanpa ikut mengalami perubahan dalam reaksi tersebut sehingga enzim dapat digunakan kembali untuk mengatalisis reaksi yang sama pada kesempatan berikutnya. Jadi, secara umum enzim mempunyai sifat bekerja pada substrat tertentu, bekerja pada suhu tertentu, tidak ikut bereaksi, dan bekerja pada pH tertentu. Mekanisme kerja enzim dalam mengatalisis reaksi kimia suatu substrat menjadi suatu produk dapat dilihat pada Gambar 2.2.



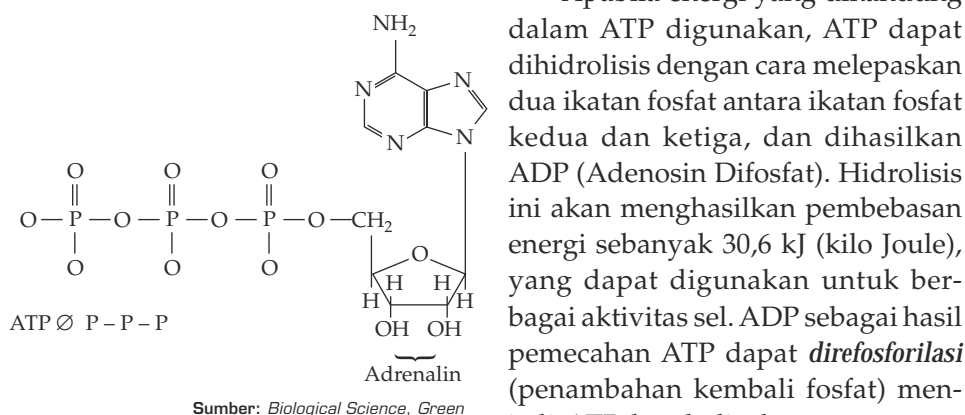
Sumber: *Essential of Biology*, Hopson

Gambar 2.2 Mekanisme kerja enzim dalam mengatalisis reaksi kimia suatu substrat menjadi produk

Dalam melakukan aktivitasnya, kecepatan reaksi enzim dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi konsentrasi enzim, konsentrasi substrat, temperatur dan pH.

2. ATP (Adenosin Trifosfat)

ATP adalah molekul koenzim yang tersusun dari ikatan adenin purin yang terikat pada gula yang mengandung 5 atom C, yaitu ribose dan tiga gugus fosfat (lihat Gambar 2.3). Seperti telah disinggung sebelumnya, energi yang dihasilkan dalam suatu reaksi metabolisme disimpan dalam bentuk ATP dan energi dalam bentuk ini sewaktu-waktu siap digunakan. Dengan demikian, ATP adalah sumber energi instan di dalam sel. Ketika sel membutuhkan energi, ATP dapat segera dipecahkan melalui proses hidrolisis (reaksi dengan air). Energi dalam bentuk ATP bersifat mobil dan dapat ditranpor serta digunakan di seluruh bagian sel. Karena perannya dalam menyimpan energi, ATP sering disebut sebagai penyimpan energi universal.



Gambar 2.3 Struktur molekul ATP

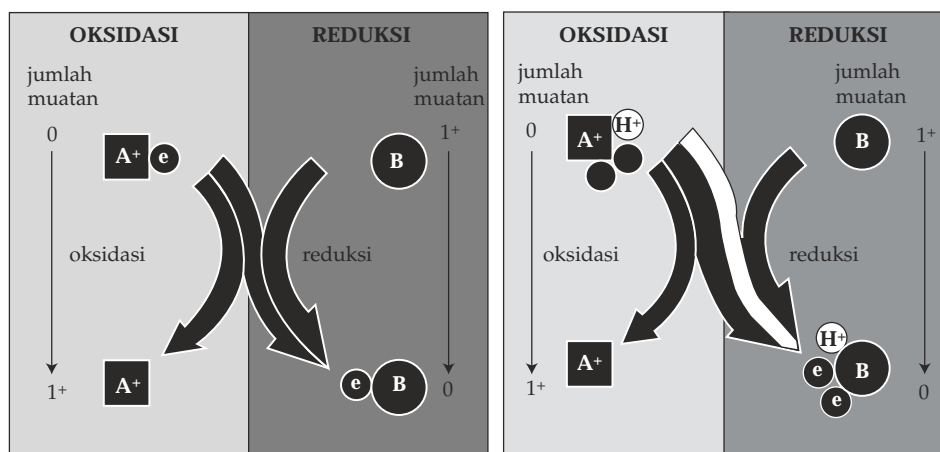
Apabila energi yang dikandung dalam ATP digunakan, ATP dapat dihidrolisis dengan cara melepaskan dua ikatan fosfat antara ikatan fosfat kedua dan ketiga, dan dihasilkan ADP (Adenosin Difosfat). Hidrolisis ini akan menghasilkan pembebasan energi sebanyak 30,6 kJ (kilo Joule), yang dapat digunakan untuk berbagai aktivitas sel. ADP sebagai hasil pemecahan ATP dapat *direfosforilasi* (penambahan kembali fosfat) menjadi ATP kembali, dengan menambahkan 1 gugus fosfat dan energi sebesar 30,6 kJ.

Karena semua energi kimia dalam sel disimpan dalam bentuk ATP, proses mengonsumsi energi yang dibutuhkan sel hanya berlangsung dalam suatu sistem, yaitu dengan mengambil sumber energi dari ATP. Hal ini bagi sel sangatlah efisien.

3. Reaksi Oksidasi Reduksi

Secara sederhana bagaimana energi dari makanan/nutrisi tersimpan dalam ATP dan tidak terbuang sebagai suatu panas? Suatu reaksi metabolik kunci dalam sel melibatkan reaksi oksidasi dan reduksi. Dalam reaksi tersebut terjadi suatu aliran elektron dari satu molekul ke molekul lain yang berfungsi sebagai suatu arus energi dalam sel.

Sel memperoleh sebagian besar energinya dengan mengoksidasi molekul makanan selama proses respirasi. Oksidasi adalah pelepasan suatu elektron dari satu atom atau satu senyawa, sedangkan reduksi adalah reaksi penambahan elektron. Oksidasi juga bisa berarti penambahan oksigen dan reduksi adalah pelepasan oksigen. Kedua reaksi ini selalu terjadi secara simultan/bersamaan, yaitu ketika elektron dipindahkan dari molekul yang bersifat sebagai donor (pemberi) elektron ke molekul lain yang bertindak sebagai akseptor (penerima) elektron. Dengan melepaskan elektronnya, donor elektron akan menjadi molekul yang teroksidasi dan dengan menerima elektron, akseptor elektron akan menjadi molekul yang tereduksi. Reaksi simultan antara oksidasi dan reduksi disebut reaksi redoks (Gambar 2.4). Dalam metabolisme sel, reaksi redoks inilah yang paling banyak terjadi.



Sumber: *Essential of Biology*, Hopson

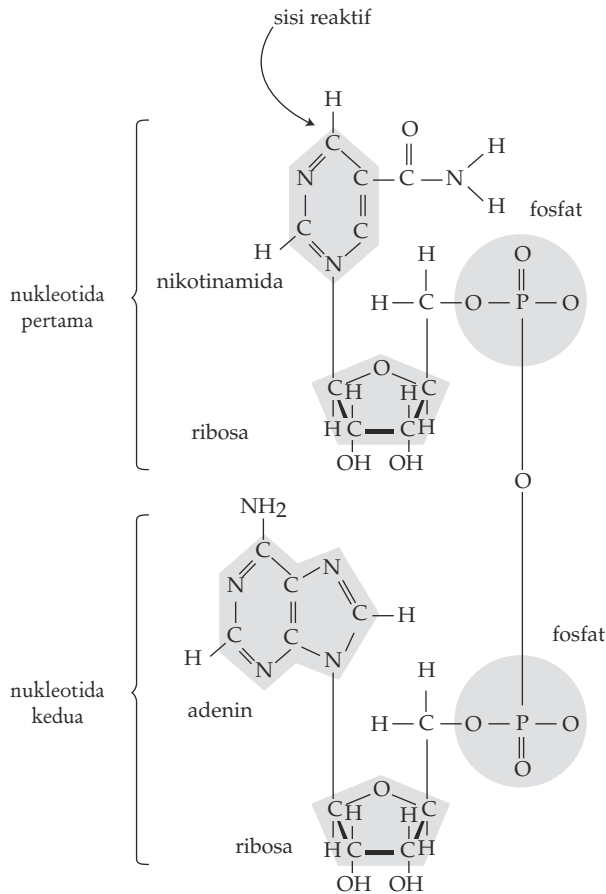
a. Pemindahan suatu elektron

b. Suatu atom H dapat dipindahkan bersama elektron

Gambar 2.4 Reaksi redoks

Kebanyakan reaksi oksidasi-reduksi dalam sel terjadi dengan pemindahan elektron dalam bentuk atom hidrogen. Atom hidrogen mengandung satu proton (H^+) dan satu elektron (e^-). Seperti halnya transfer elektron, transfer atom hidrogen juga terjadi dalam reaksi yang berpasangan.

Dalam reaksi oksidasi reduksi yang terjadi dalam metabolisme, ada dua koenzim penting yang bertindak sebagai pembawa elektron. Koenzim tersebut adalah NAD (nikotinamid adenin dinukleotida) dan FAD (flavin adenin dinukleotida). Keduanya mempunyai struktur yang analog (Gambar 2.5a). Pada saat NAD direduksi menjadi NADH (Gambar 2.5b), dua elektron dan satu proton akan ditambahkan ke dalam molekulnya. Elektron-elektron tersebut selanjutnya dapat dipindah-pindahkan selama satu seri reaksi berantai yang menghasilkan banyak energi untuk pembentukan ATP.



Sumber: *Essential of Biology*, Hopson

Gambar 2.5 Struktur molekul NAD

B. Proses Katabolisme Karbohidrat

Pada bagian terdahulu, telah dibahas bahwa guna memperoleh energi, bahan bakar yang tersedia dalam sel harus mengalami suatu proses pemecahan/penguraian. Proses pemecahan bahan bakar menjadi energi yang siap digunakan kita sebut *katabolisme*, dan secara umum dikenal dengan proses *respirasi*. Respirasi secara umum dapat didefinisikan sebagai proses pembebasan energi kimia melalui reaksi oksidasi (penambahan oksigen) suatu molekul organik. Dari peristiwa ini akan dihasilkan energi dalam bentuk ATP serta CO_2 , dan air (H_2O) sebagai hasil sisa. Jika molekul organik tersebut adalah karbohidrat berupa glukosa, secara sederhana respirasi sel dapat ditulis dengan persamaan reaksi seperti di bawah ini:



Karena terjadi di dalam sel, proses ini selanjutnya disebut respirasi sel. Hal ini untuk membedakan dengan proses respirasi eksternal yang merupakan pertukaran gas yang terjadi pada organ pernapasan. Jika proses respirasi sel terjadi dalam kondisi ada oksigen, disebut *respirasi aerob*, sebaliknya tanpa oksigen, disebut *respirasi anaerob*.

Dalam respirasi sel, molekul organik (misalnya karbohidrat atau lemak) dipecahkan ikatan demi ikatannya melalui suatu seri reaksi yang dikontrol oleh enzim. Setiap pemecahan ikatan membebaskan sejumlah kecil energi yang kemudian diikat dalam bentuk molekul kimia ATP.

Jika dalam respirasi sel, molekul yang digunakan sebagai substrat untuk dioksidasi adalah gula berupa glukosa, prosesnya terdiri atas tiga tahapan, yaitu *glikolisis*, *dekarboksilasi oksidatif (siklus Krebs/siklus asam sitrat)* dan *fosforilasi oksidatif (rantai transpor elektron/rantai respiratori)*. Pada dasarnya ketiga tahapan ini merupakan suatu rangkaian reaksi yang mengubah senyawa C_6 menjadi C_3 (glikolisis), mengubah C_3 menjadi C_2 (dekarboksilasi oksidatif), dan mengubah C_2 menjadi C_1 pada siklus Krebs. Pada tiap tingkat dilepaskan energi berupa ATP dan hidrogen. Hidrogen yang berenergi bergabung dengan akseptor hidrogen untuk dibawa ke rantai transpor elektron agar energinya dilepaskan dan hidrogen dipertemukan dengan O_2 menjadi H_2O .

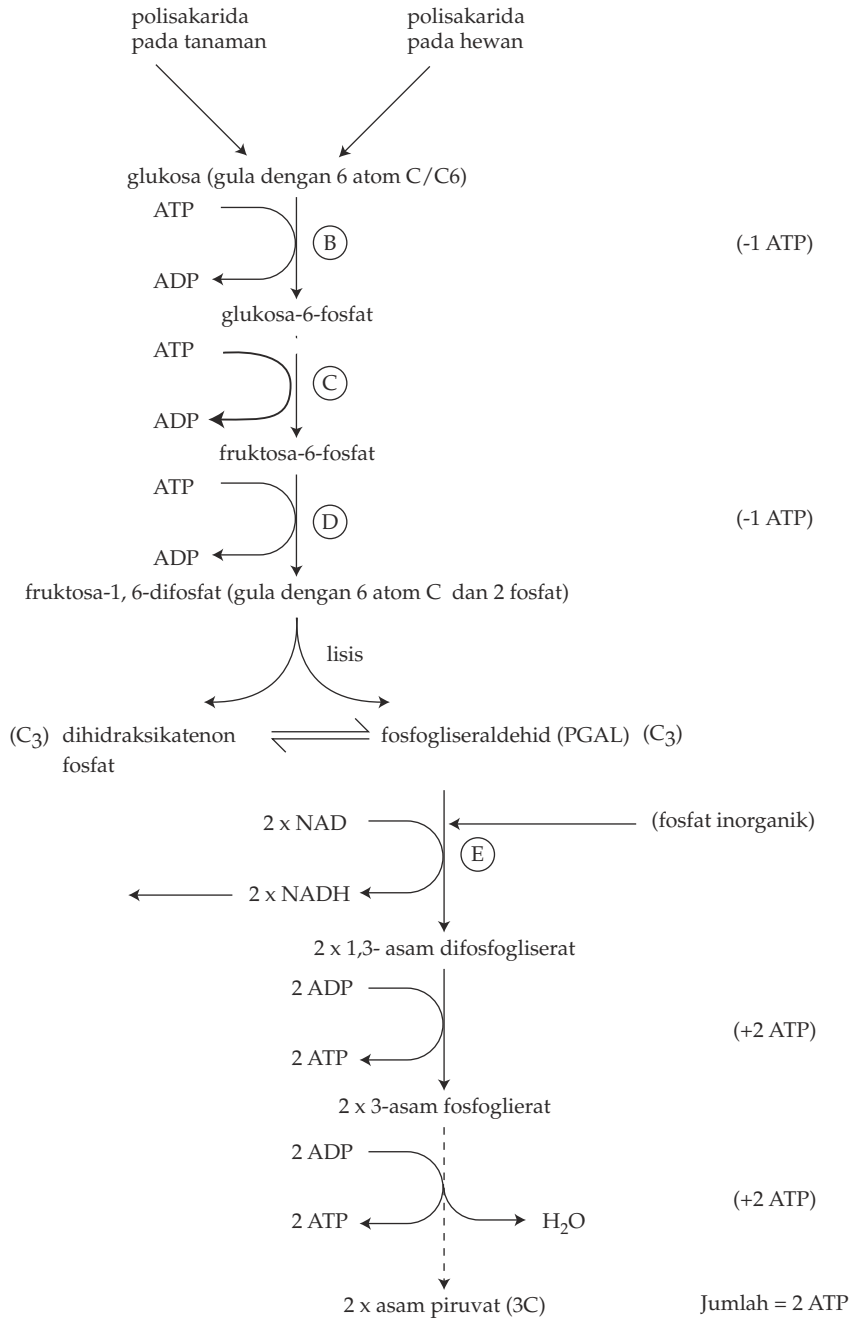
1. Glikolisis

Glikolisis adalah fase pertama dari suatu tahapan reaksi yang terjadi dalam respirasi sel, ketika sel memecahkan molekul glukosa yang mengandung 6 atom C menjadi 2 molekul asam piruvat yang mengandung 3 atom C. Glikolisis terjadi dalam sitoplasma sel dan bukan dalam mitokondria serta tidak membutuhkan oksigen.

Proses glikolisis dapat dibagi menjadi dua tahapan besar, yaitu pertama perubahan *glukosa* menjadi *fruktosa 1,6-difosfat* (gula yang mengandung 6 C dan 2 fosfat). Kedua adalah pemecahan *fruktosa 1,6-difosfat* menjadi gula dengan 3 atom C, yaitu *asam piruvat*. Secara keseluruhan reaksinya dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Dari kedua tahap reaksi tersebut dua molekul ATP digunakan untuk reaksi fosforilasi, pada tahap pertama (selama perubahan dari glukosa menjadi fruktosa 1,6-difosfat), dan 4 ATP dihasilkan dari reaksi kedua. Jadi, *hasil bersih* ATP dari glikolisis adalah $4 - 2 = 2$ ATP.

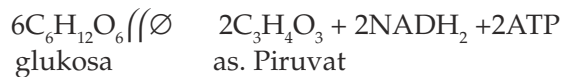
Selain terjadi penambahan gugus fosfat, selama glikolisis juga terjadi reaksi dehidrogenasi (pelepasan atom H), atom H yang dilepaskan ditangkap oleh akseptor hidrogen, yaitu koenzim NAD. Molekul NAD yang menangkap hidrogen menjadi molekul yang tereduksi, yaitu $NADH_2$. Pembahasan tentang NAD dan $NADH_2$ akan dilakukan pada penjelasan berikutnya.



Gambar 2.6 Tahapan reaksi glikolisis

Sumber: *Biological Science*, Green

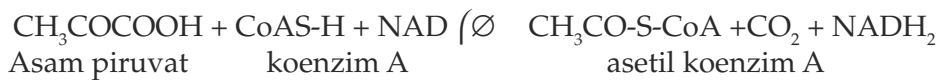
Secara sederhana reaksi glikolisis dapat dituliskan sebagai berikut.



Nasib akhir asam piruvat bergantung pada tersedia tidaknya oksigen dalam sel. Jika tersedia oksigen, asam piruvat akan masuk ke dalam mitokondria dan akan dioksidasi menjadi karbon dioksida dan air (respirasi aerob). Jika sebaliknya (tidak tersedia oksigen dalam sel), asam piruvat akan diubah menjadi *etanol* atau *asam laktat* (respirasi anaerob).

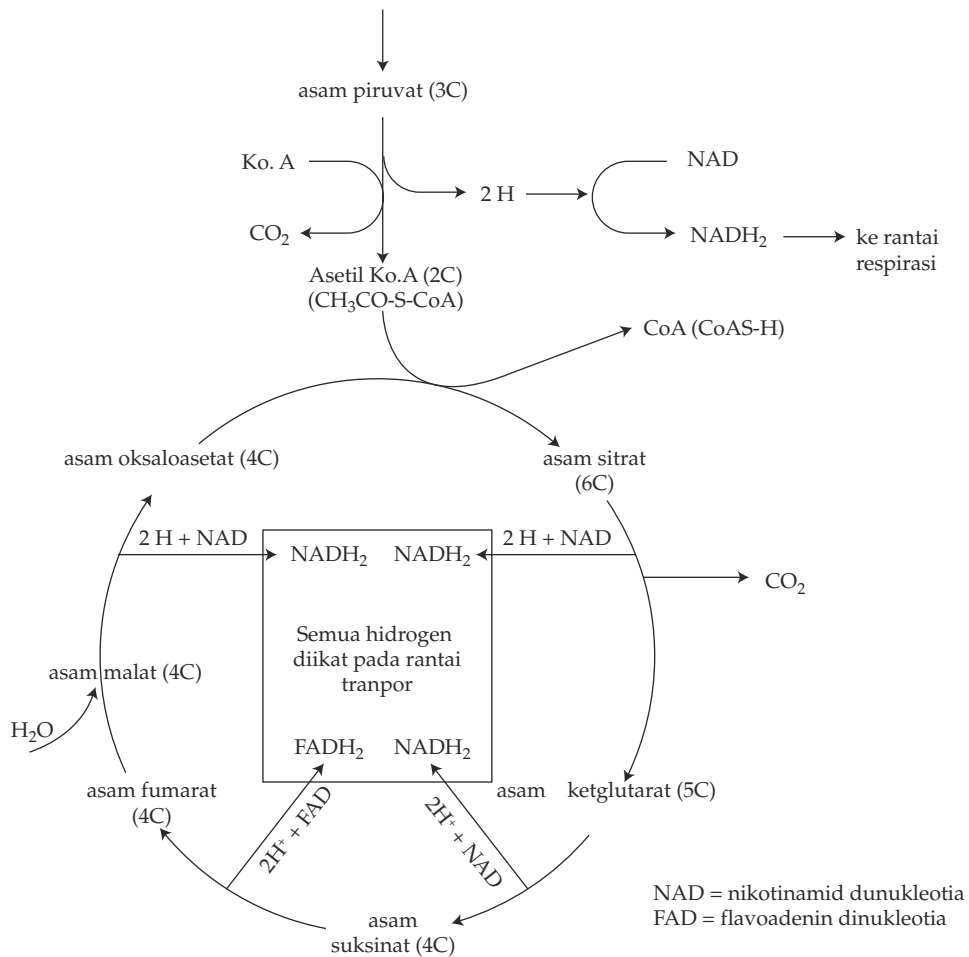
2. Respirasi Aerob

Respirasi aerob melibatkan dua tahapan reaksi. *Pertama*, jika oksigen yang akan digunakan cukup tersedia, molekul asam piruvat akan masuk ke dalam mitokondria. Di dalam mitokondria, asam piruvat mengalami *dekarboksilasi oksidatif*, yaitu pelepasan CO₂ dan reaksi oksidasi dengan melepaskan hidrogen (dehidrogenasi). Selama proses tersebut, asam piruvat digabungkan dengan suatu substansi yang disebut *koenzim A* (sering ditulis sebagai *CoAS-H*) untuk membentuk *asetil koenzim A (acetyl CoA)*. Sejumlah energi dilepaskan untuk membentuk ikatan kaya energi dalam molekul asetil koenzim A. Secara ringkas reaksi dekarboksilasi oksidatif dapat ditulis:



NADH₂ yang dibentuk sebagai hasil pembentukan asetil koenzim A dikumpulkan dan diikat ke dalam rantai respirasi dalam mitokondria.

Fase *Kedua* respirasi aerob adalah *siklus Krebs* (berdasarkan nama penemunya yaitu Sir Hans Krebs). Gugus asetil (2C) dari asetil koenzim A selanjutnya akan masuk ke siklus Krebs melalui reaksi hidrolisis (penambahan air), dengan melepaskan koenzim A. Gugus asetil tadi kemudian akan bergabung dengan asam oksaloasetat (mengandung 4 atom C) membentuk asam sitrat (6C). Reaksi tersebut membutuhkan energi dan energinya diambil dari ikatan kaya energi dari asetil koenzim A. Suatu siklus reaksi akan berlangsung jika gugus asetil yang berasal dari asetil CoA didehidrogenasi untuk membebaskan 4 atom hidrogen dan didekarboksilasi. Selama proses selanjutnya oksigen diambil dari air dan oksigen tersebut digunakan untuk mengoksidasi dua atom C menjadi CO₂. Peristiwa ini dinamakan *dekarboksilasi oksidatif*. Pada akhir siklus, asam oksaloasetat terbentuk kembali dan berikatan dengan molekul asetil Co A yang lain dan siklus berlangsung lagi. *Satu molekul ATP, 4 pasang atom H dan 2 molekul CO₂* akan dibebaskan dalam setiap oksidasi 1 molekul asetil CoA. Atom H yang dilepaskan selanjutnya ditangkap oleh NAD dan FAD dan akan masuk ke rantai transpor elektron. Karena selama oksidasi molekul glukosa dihasilkan dua molekul asetil CoA, siklus Krebs harus berlangsung dua kali. Oleh karena itu, *hasil bersih dari oksidasi satu glukosa adalah 2 ATP, 4 CO₂ dan 8 pasang atom H* yang akan masuk ke rantai transpor elektron. Secara ringkas siklus Krebs dapat dilihat pada Gambar 2.7.

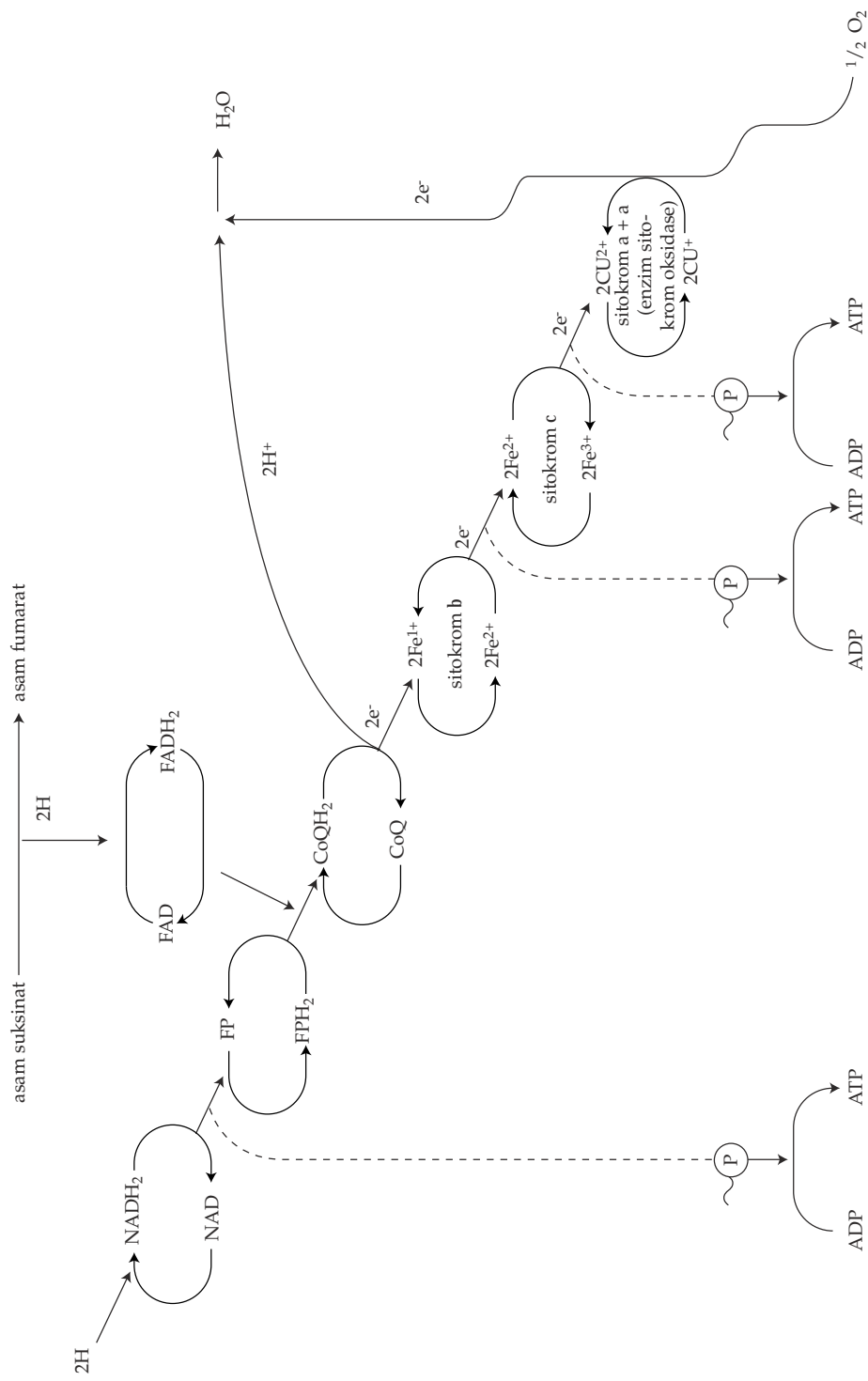


Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

Gambar 2.7 Diagram ringkas siklus krebs

3. Rantai Transpor Elektron

Pasangan-pasangan atom H yang dibebaskan selama siklus Krebs, ditangkap oleh koenzim NAD dan FAD dan selanjutnya menjadi NADH_2 dan FADH_2 yang selanjutnya akan masuk ke rantai transpor elektron. Molekul-molekul tersebut kemudian mengalami rangkaian reaksi redoks yang terjadi secara berantai dengan melibatkan beberapa zat perantara untuk menghasilkan ATP dan air. Rantai transpor elektron terjadi dalam mitokondria. Zat-zat perantara yang terlibat dalam rantai transpor elektron meliputi *flavoprotein*, *koenzim Q & a* serta sejumlah *sitokrom* (sitokrom b, sitokrom c, dan sitokrom a dan a_3). Dalam rangkaian reaksi tersebut, semua zat antara berfungsi sebagai pembawa hidrogen/pembawa elektron dan disebut hidrogen atau *elektron carriers*. Perhatikan Gambar 2.8.

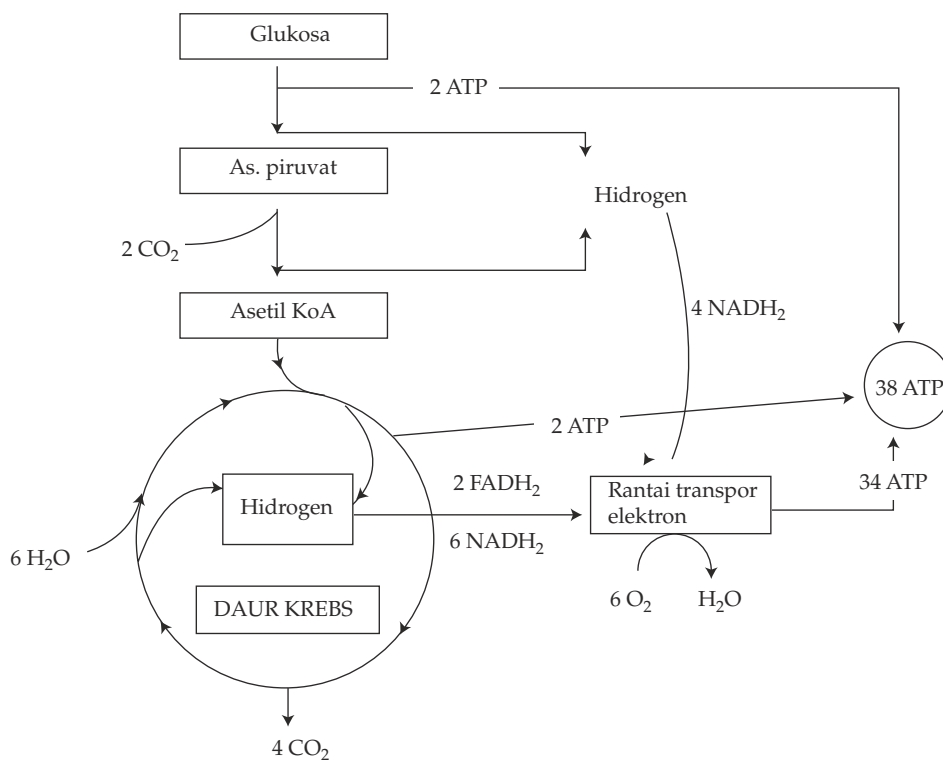


Gambar 2.8 Diagram rantai transpor elektron

Sumber: *Biological Science*, Green

Dari bagan reaksi pada Gambar 2.8 dapat disimpulkan bahwa dari 1 molekul NADH_2 yang masuk pada transfer elektron dihasilkan 3 molekul ATP dan dari 1 molekul FADH_2 dihasilkan 2 molekul ATP. Selama oksidasi 1 molekul glukosa terjadi 10 NADH_2 (2 dari glikolisis, 2 dari dekarboksilasi oksidatif dan 6 dari siklus Krebs) dan 2 FADH_2 (dari siklus Krebs). Jadi, secara keseluruhan ATP yang dihasilkan dari rantai transpor elektron adalah $10 \times 3 = 30$ dan $2 \times 2 = 4$ sehingga jumlahnya adalah 34 ATP. Hasil bersih ATP selama respirasi aerob adalah $34 + 2$ ATP (glikolisis) + 2 ATP (siklus Krebs) = 38 ATP.

Coba kamu telusuri kembali penjumlahan ATP untuk reaksi-reaksi tersebut, guna melatih kemampuan kamu dalam menghitung dan lebih memahami dari mana saja ATP tersebut dihasilkan. Untuk memperjelas hubungan antara reaksi-reaksi yang terjadi selama respirasi sel secara aerob dan perolehan energi (ATP) yang dihasilkan, dapat dilihat pada Gambar 2.9.



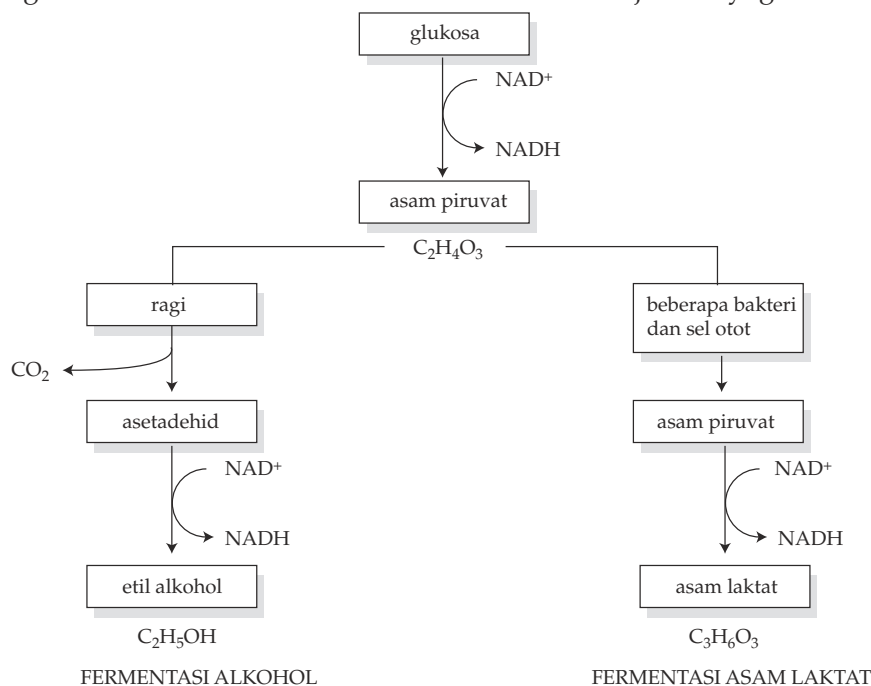
Gambar 2.9 Hubungan antara glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron dalam menghasilkan ATP.

4. Respirasi Anaerob

Tidak semua organisme melakukan respirasi secara aerob. Beberapa mikroorganisme, misalnya bakteri mendapatkan energinya (ATP) dengan

melakukan respirasi anaerob. Hal ini karena beberapa bakteri akan mati jika berada dalam kondisi ada oksigen. Organisme semacam ini disebut *anaerob obligat*. Sebagai contoh, misalnya bakteri *Clostridium botulinum* dan *C. tetani*.

Organisme lain, misalnya ragi atau cacing pita, dapat hidup baik dalam kondisi ada oksigen atau tanpa oksigen. Organisme semacam ini disebut *anaerob fakultatif*. Beberapa macam sel, seperti sel otot yang kekurangan oksigen juga dapat melakukan respirasi secara anaerob. Jika pada respirasi aerob H yang dibebaskan dari glikolisis diikat oleh akseptor hidrogen berupa oksigen untuk menghasilkan air, maka pada respirasi anaerob karena oksigen tidak ada, harus ada akseptor hidrogen lain yang menggantikannya. Dalam keadaan ini asam piruvat bertindak sebagai akseptor dan akan direduksi, sedangkan NADH akan dioksidasi untuk selanjutnya dihasilkan *asam laktat*. Karena asam laktat dihasilkan sebagai hasil akhir dari respirasi anaerob ini, jalur metabolisme ini sering disebut *fermentasi asam laktat*. Fermentasi asam laktat sering terjadi pada otot yang kekurangan oksigen dan penimbunan asam laktat sering menimbulkan rasa lelah atau pegal-pegal. Akan tetapi keadaan ini lama-kelamaan akan berkurang, karena asam laktat perlahan-lahan dibawa oleh darah ke hati. Laktat akan diubah kembali menjadi piruvat oleh sel hati. Selain itu, fermentasi asam laktat juga dapat terjadi pada beberapa sel bakteri. Fermentasi asam laktat oleh fungi dan bakteri tertentu digunakan dalam industri susu untuk membuat keju dan yoghurt.



Sumber: *The Study of Biology*, Baker

Gambar 2.10 Diagram yang menunjukkan kemungkinan terjadinya 2 macam fermentasi dalam respirasi anaerob

Tipe lain dari respirasi anaerob adalah *fermentasi alkohol*, yaitu dihasilkannya alkohol sebagai hasil akhir. Hal ini dapat terjadi misalnya pada sel ragi. Pada fermentasi tersebut, satu gugus karboksil dari asam piruvat dilepaskan (dekarboksilasi) untuk membentuk senyawa antara berupa asetaldehid. Selanjutnya 2 atom C dari asetaldehid mengambil elektron dari NADH untuk menghasilkan etil alkohol atau etanol. Fermentasi alkohol dapat terjadi dalam proses pembuatan minuman (bir, sider, anggur, dan lain lain) dan pada proses pengembangan roti, yang dilakukan oleh ragi. Secara singkat hubungan antara respirasi asam laktat dan respirasi alkohol dapat dilihat pada Gambar 2.10.

KEGIATAN 2.1

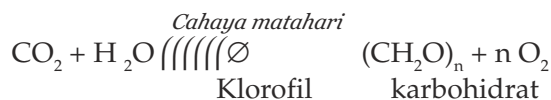
Dari penjelasan di atas, coba sekarang kamu hitung, berapa jumlah ATP yang dihasilkan jika respirasi terjadi tanpa adanya oksigen. Diskusikan jawabanmu dengan guru dan teman-temanmu.

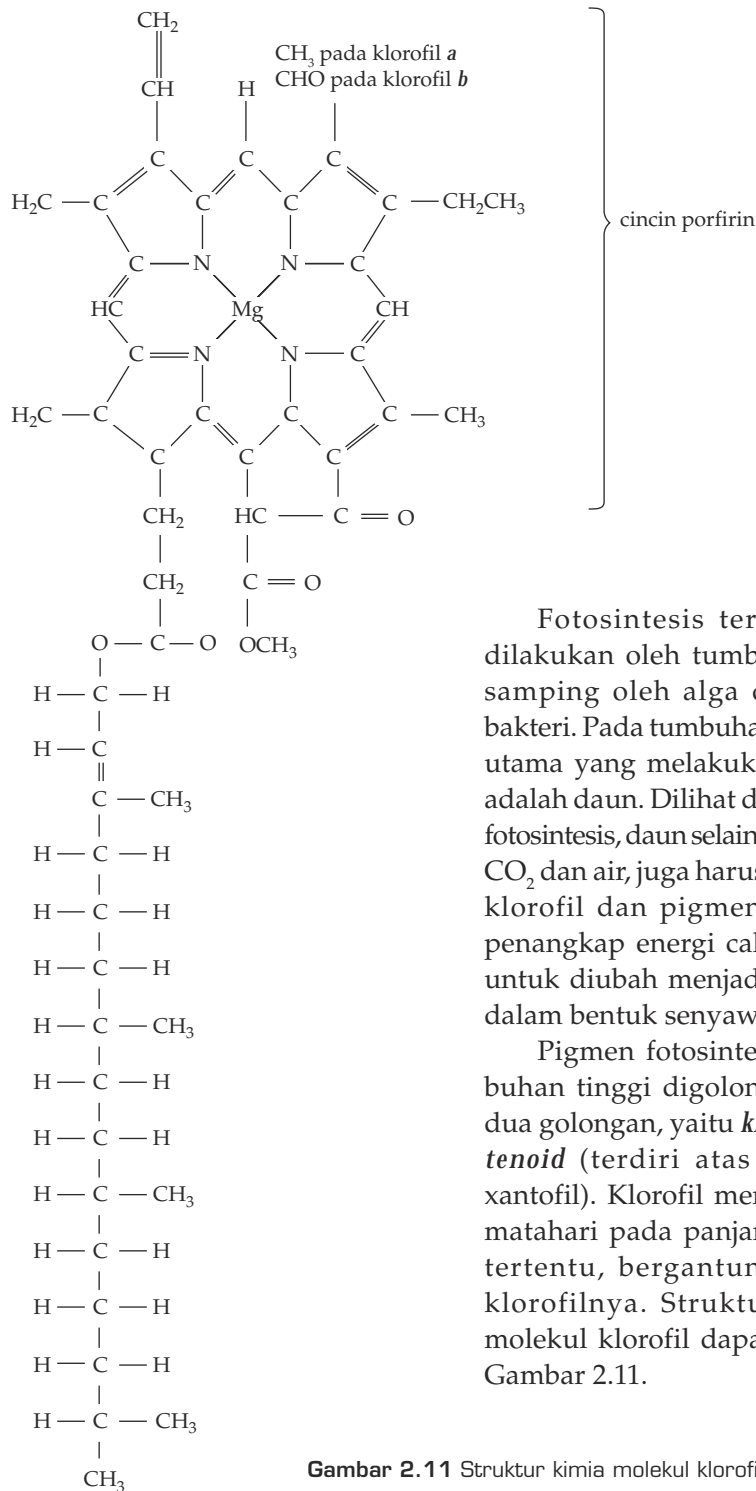
C. Proses Anabolisme Karbohidrat

Setelah kita membahas reaksi katabolisme, selanjutnya akan dibahas reaksi penyusunan atau anabolisme. Reaksi anabolisme yang paling penting yaitu anabolisme karbohidrat yang dikenal dengan *fotosintesis*. Selain itu, akan dibahas pula tentang Kemonsintesis karena pengubahan CO₂ (karbon anorganik) menjadi organik (karbohidrat) tidak harus selalu melalui proses fotosintesis.

1. Fotosintesis

Seluruh makhluk hidup di bumi secara langsung atau tidak langsung bergantung pada fotosintesis. Dalam peristiwa fotosintesis, karbon anorganik (CO₂) dan air akan diubah menjadi karbon organik (karbohidrat) yang merupakan senyawa dasar bagi pembentukan senyawa-senyawa utama yang berguna untuk menunjang kehidupan makhluk hidup. Di samping itu dalam reaksi fotosintesis juga dihasilkan oksigen yang merupakan unsur vital kehidupan. Reaksi fotosintesis dapat ditulis secara singkat sebagai berikut:





Fotosintesis terutama dapat dilakukan oleh tumbuhan hijau di samping oleh alga dan beberapa bakteri. Pada tumbuhan tinggi, organ utama yang melakukan fotosintesis adalah daun. Dilihat dari reaksi pada fotosintesis, daun selain membutuhkan CO₂ dan air, juga harus mengandung klorofil dan pigmen lain sebagai penangkap energi cahaya matahari untuk diubah menjadi energi kimia dalam bentuk senyawa organik.

Pigmen fotosintesis pada tumbuhan tinggi digolongkan menjadi dua golongan, yaitu *klorofil* dan *karotenoid* (terdiri atas karoten dan xantofil). Klorofil menyerap cahaya matahari pada panjang gelombang tertentu, bergantung pada jenis klorofilnya. Struktur kimia dari molekul klorofil dapat dilihat pada Gambar 2.11.

Gambar 2.11 Struktur kimia molekul klorofil

Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

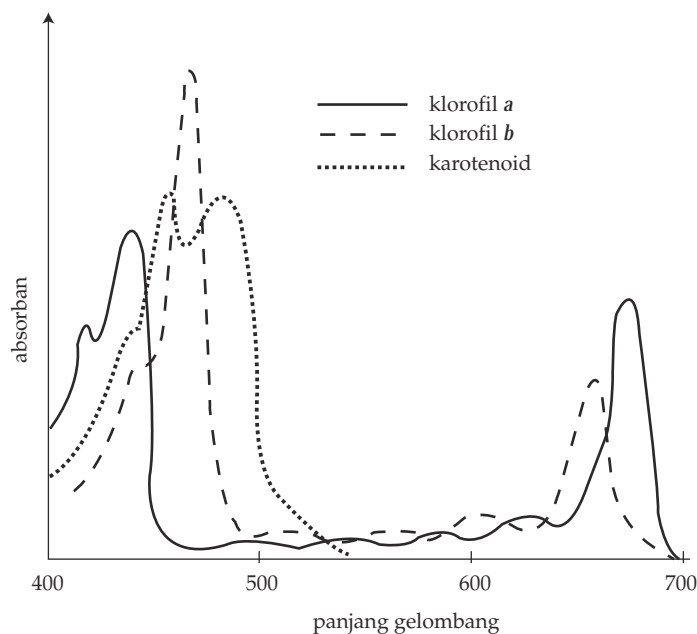
Klorofil sebagai salah satu komponen penting dalam fotosintesis, terdapat pada sel daun dan tersimpan pada organel yang disebut *kloroplas*. Kloroplas terdiri atas beberapa bagian, yaitu *grana* yang tersusun atas tumpukan membran *tilakoid* dan struktur seperti jeli yang ada di sekitar grana dan disebut *stroma* (perhatikan lagi bab tentang sel). Karena klorofil berada di kloroplas, maka peristiwa fotosintesis adalah terjadi pada organ tersebut. Fotosintesis terjadi pada kloroplas dalam dua tahap reaksi, yaitu *reaksi terang* dan *reaksi gelap*.

Sebelum dijelaskan tentang reaksi terang dan reaksi gelap, terlebih dahulu akan dibahas tentang beberapa hal penting yang berkaitan dengan kedua reaksi tersebut.

a. Peran Pigmen dalam Fotosintesis

Pigmen fotosintesis pada tumbuhan tinggi digolongkan menjadi dua golongan, yaitu klorofil dan karotenoid (terdiri atas karoten dan xantofil). Klorofil merupakan pigmen utama yang diperlukan dalam fotosintesis.

Klorofil menyerap cahaya merah dan ungu biru sehingga terlihat hijau karena warna tersebutlah yang dipantulkan. Spektrum cahaya yang diserap klorofil dapat berbeda-beda bergantung pada jenis klorofilnya (perhatikan Gambar 2.12).



Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

Gambar 2.12 Spektrum absorpsi klorofil a, b, dan karotenoid

Dari penjelasan di atas, dapat dikatakan bahwa pigmen berperan dalam menangkap cahaya matahari. Selanjutnya cahaya matahari yang ditangkap dalam bentuk foton akan digunakan oleh sistem yang ada dalam fotosintesis untuk menjalankan reaksi. Apa yang sebenarnya terjadi, jika energi foton dari matahari ditangkap oleh pigmen?

Pigmen adalah senyawa kimia yang dapat menyerap/mengabsorpsi cahaya tampak. Cahaya yang terserap merupakan sesuatu yang mengandung energi tinggi. Karena energinya yang tinggi, foton (yang terkandung dalam cahaya) dapat menyebabkan terlemparnya elektron yang ada pada pigmen, dan elektron yang terlempar disebut sebagai elektron yang berada pada keadaan *tereksitasi*. Dalam keadaan tersebut, elektron berada dalam kondisi yang *tidak stabil* dan menyimpan energi yang tinggi. Untuk menstabilkan dirinya, elektron yang tereksitasi akan berusaha kembali ke keadaan semula sambil melepaskan energinya.

Pada reaksi terang, pigmen yang tereksitasi akan kehilangan elektron, sehingga menghasilkan molekul yang bermuatan positif, seperti terlihat pada reaksi:



Elektron yang dilepaskan dalam peristiwa tersebut kemudian akan ditangkap oleh molekul lain yang disebut penangkap elektron atau *akseptor elektron*. Dalam hal ini klorofil ada dalam bentuk teroksidasi dan akseptor elektron menjadi senyawa yang tereduksi. Dalam hal ini klorofil dapat juga disebut sebagai *donor elektron*.

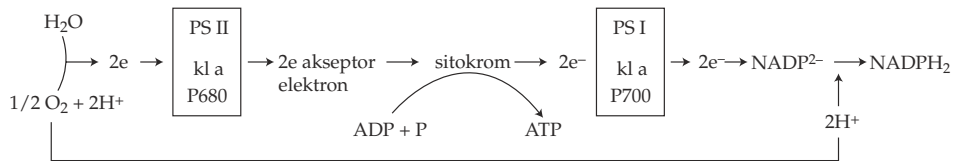
b. Unit-Unit Fotosintetik dan Pusat Reaksi

Unit-unit fotosintetik terdapat dalam membran tilakoid pada grana dari sebuah kloroplas. Unit fotosintetik terdiri atas sejumlah klorofil a, klorofil b, dan karotenoid yang masing-masing mempunyai klorofil a khusus sebagai pusat reaksi. Dalam membran tilakoid terdapat dua tipe unit fotosintetik, yaitu *fotosistem I* dan *II (PSI dan PSII)*. PSI disebut juga **P700** dan PSII disebut **P680** (sesuai puncak absorpsi panjang gelombang yang diserapnya).

Fotosistem mengandung kumpulan pigmen tambahan yang akan melakukan energi foton yang ditangkapnya menuju *molekul pigmen utama* dan molekul ini disebut *pusat reaksi*. Pada pusat reaksi, energi yang ditangkap dari cahaya digunakan untuk menjalankan reaksi. Jadi, di sinilah energi cahaya diubah menjadi energi kimia sehingga pusat reaksi dapat disebut *pusat pengubah energi* dalam fotosintesis.

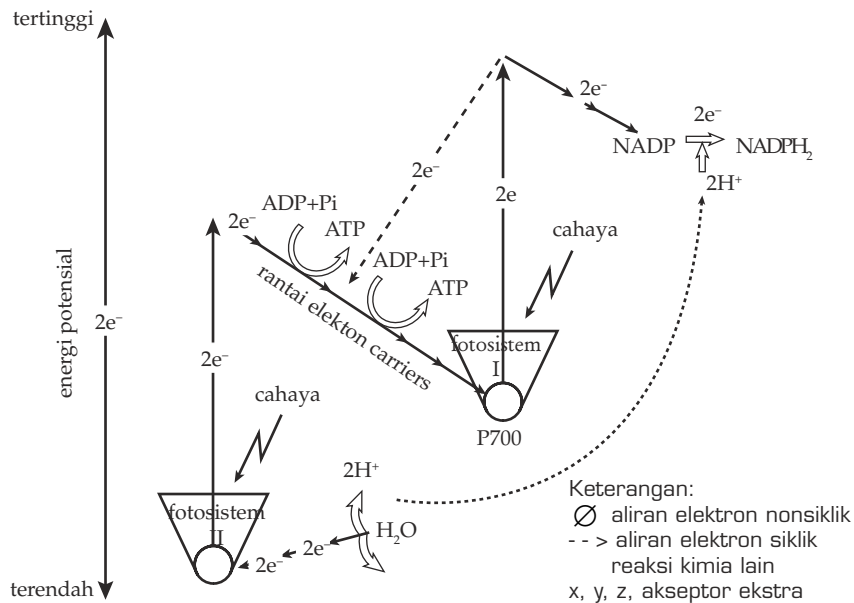
c. Reaksi Terang (Fotofosforilasi)

Agar lebih memahami tentang reaksi terang, pelajari gambar bagan di bawah ini.



Sumber: *Biological Science, Green*

Reaksi terang adalah reaksi yang terjadi pada membran tilakoid grana, yang akan menghasilkan ATP dari ADP+fosfat (fosforilasi) dan NADPH_2 dari NADP. Pembentukan ATP pada reaksi terang menggunakan energi matahari (foton) sehingga peristiwanya disebut *fotofosforilasi*. Dalam reaksi terang juga dibutuhkan hidrogen untuk mereduksi NADP menjadi NADPH_2 . Pada tumbuhan, hidrogen diperoleh dari pemecahan molekul air menjadi hidrogen dan oksigen. Hasil reaksi terang selanjutnya akan digunakan dalam reaksi gelap. Perhatikan Gambar 2.13



Sumber: *Biological Science, Green*

Gambar 2.13 Skema aliran elektron melalui PSII dan PSI pada reaksi terang

Jika cahaya (foton) mengenai PSII maupun PSI, energinya yang tinggi akan menyebabkan klorofil yang ada pada kedua fotosistem tersebut melepaskan elektron, menjadi klorofil⁺. Pada PSII, foton juga sekaligus menyebabkan pecahnya molekul air menjadi hidrogen dan oksigen dengan

melepaskan elektron. Elektron yang dilepaskan air akan menggantikan elektron yang hilang pada klorofil (PSII), sedangkan elektron yang dilepaskan klorofil pada PSII akan ditangkap oleh suatu akseptor elektron (X). Selanjutnya elektron dilepaskan kembali oleh akseptor X dan melalui suatu rantai pembawa elektron. Elektron tersebut akhirnya sampai di PSI. Elektron ini menggantikan elektron yang dilepaskan klorofil pada PSI, sedangkan elektron yang dilepaskan PSI akan ditangkap oleh akseptor hidrogen, yaitu Y. Selanjutnya Y melepaskan elektron tersebut dan melalui serangkaian pembawa elektron, elektronnya ditangkap oleh NADP untuk membentuk NADPH₂. *Elektron yang ditangkap oleh Y selain dapat ditangkap oleh NADP juga dapat kembali ke PSI.*

Selama pergerakan elektron dari akseptor X menuju PSI dan dari Y menuju PSI, energi yang dilepaskannya digunakan untuk memfosforilasi ADP menjadi ATP. Untuk setiap pasang elektron dapat dihasilkan 2 molekul ATP. Jadi, secara keseluruhan reaksi yang terjadi pada reaksi terang dapat ditulis:



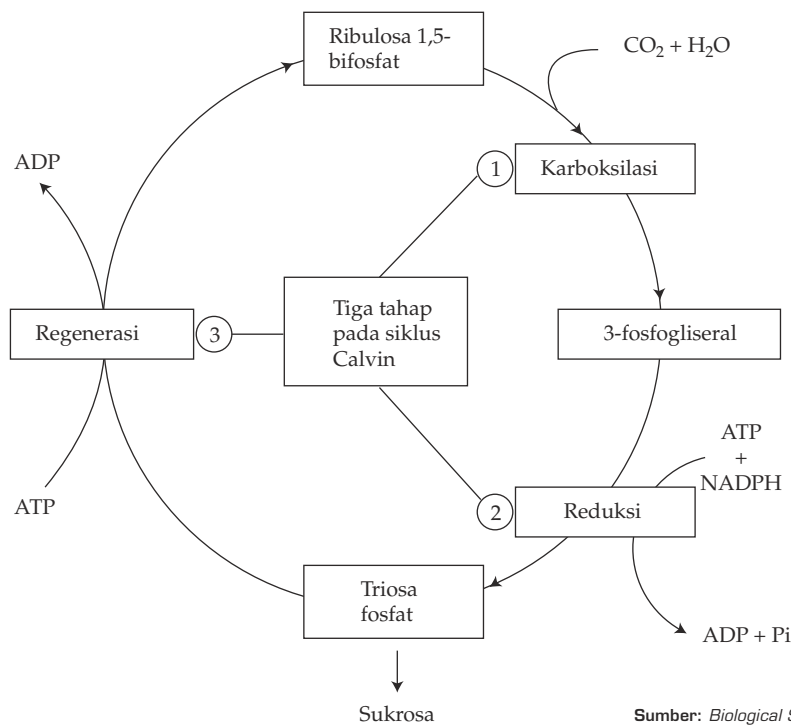
d. Reaksi Gelap (Fiksasi CO₂ atau Siklus Calvin)

Reaksi gelap adalah lanjutan dari reaksi terang dan terjadi pada stroma. Pada reaksi tersebut energi berupa ATP dan molekul pereduksi NADPH₂ yang dihasilkan reaksi terang, digunakan untuk mereduksi/memfiksasi CO₂.

Pada reaksi gelap/siklus Calvin, CO₂ dan air dari lingkungan secara enzimatik direaksikan dengan suatu molekul akseptor yang mengandung 5 atom C (Ribulosa,1,5-bifosfat/RuBP) untuk membentuk 2 molekul antara berat C₃ yaitu asam fosfogliserat (PGA). Molekul antara ini kemudian direduksi untuk menghasilkan karbohidrat. Peristiwa tersebut juga dilengkapi dengan pembentukan kembali (regenerasi) molekul C₅ yang selanjutnya akan digunakan lagi untuk mengikat CO₂ yang masuk. Jadi, dalam siklus Calvin terdapat 3 tahap reaksi, yaitu:

- Karboksilasi** (pengambilan CO₂) oleh akseptor RuBP membentuk 2 molekul PGA yang mengandung 3 atom C.
- Reduksi** molekul PGA menjadi asam fosfogliseraldehid (PGAL) yang selanjutnya akan membentuk karbohidrat berupa glukosa, sukrosa, danamilum.
- Regenerasi** (pembentukan kembali) akseptor CO₂, yaitu RuBP, dari molekul PGAL. Proses ini diperlukan karena CO₂ terus-menerus dihasilkan dari reaksi terang sehingga harus selalu tersedia senyawa yang dapat mengikatnya, yaitu RuBP.

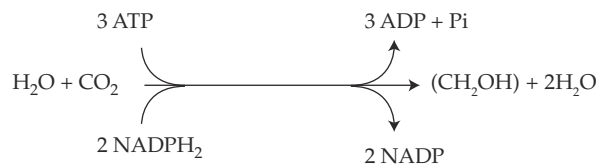
Untuk lebih memperjelas hubungan antara ketiga tahap reaksi tersebut, kamu dapat memerhatikan Gambar 2.14.



Sumber: *Biological Science, Green*

Gambar 2.14 Hubungan tiga tahapan reaksi yang terjadi pada siklus Calvin secara ringkas

Dari uraian di atas, secara singkat dapat dituliskan reaksi yang terjadi pada siklus Calvin adalah sebagai berikut.

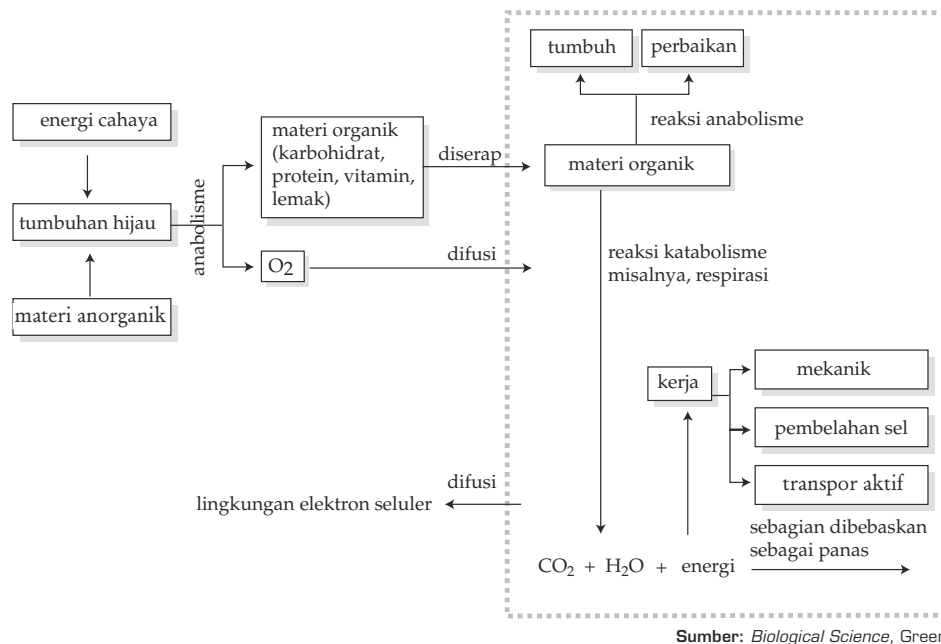


Sumber: *Biological Science, Green*

Gambar 2.15 Reaksi singkat siklus Calvin

Dari uraian di atas, dapat dikatakan bahwa reaksi terang berhubungan langsung dengan reaksi gelap untuk menghasilkan suatu produk, yaitu karbohidrat yang merupakan senyawa utama penyusun senyawa-senyawa vital untuk kehidupan organisme.

penyusunan atau sintesis dari molekul sederhana menjadi molekul yang lebih kompleks disebut *anabolisme*, dan dalam proses ini dibutuhkan energi (*endergonik*). Anabolisme selain meliputi sintesis karbohidrat, juga sintesis lemak, sintesis protein, dan senyawa organik lain yang dibutuhkan sel, sedangkan katabolisme terutama adalah katabolisme glukosa dalam respirasi sel. Secara sederhana hubungan antara proses yang dijelaskan di atas dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Hubungan antara proses anabolisme dan katabolisme dalam metabolisme

E. Keterkaitan Metabolisme Karbohidrat, Lemak, dan Protein

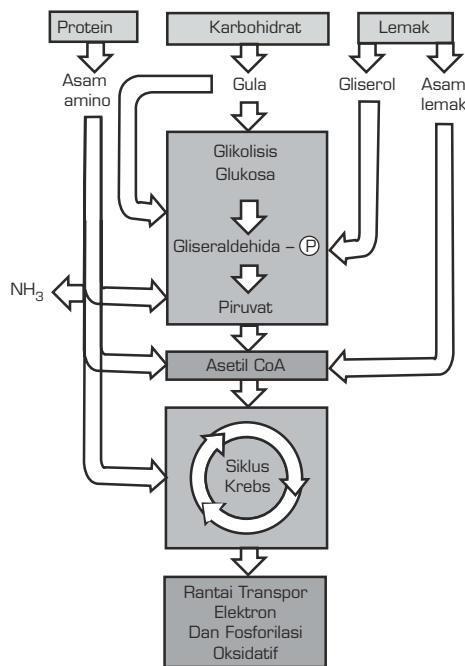
Secara terperinci telah dibahas tentang metabolisme karbohidrat. Pada kenyataannya sel tidak hanya membutuhkan atau menyediakan karbohidrat, sebagai bahan bakar untuk respirasi seluler, tetapi juga senyawa organik lain seperti lemak dan protein. Bagaimana metabolisme kedua senyawa tersebut dan bagaimana hubungannya dengan metabolisme karbohidrat?

Pada metabolisme karbohidrat (glukosa), glikolisis dan daur Krebs merupakan jalur utama dalam pemecahan glukosa menjadi energi. Seperti halnya glukosa, lemak dan protein juga dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi dengan menggunakan jalur metabolisme yang hampir sama.

Melalui reaksi hidrolisis, protein dalam sel akan dipecah menjadi asam amino-asam amino. Monomer ini kemudian dapat diubah menjadi piruvat, Asetil Ko A atau zat-zat antara pada daur Krebs. Piruvat, Asetil Ko A dan zat-zat yang dihasilkan selama daur Krebs dapat disebut zat antara yang nantinya dapat digunakan untuk menyusun senyawa-senyawa lain yang dibutuhkan sel. Hal ini dapat terjadi karena reaksi pemecahan dan penyusunan bersifat *reversible* (dapat berkebalikan). Sebagai contoh Asetil Ko A hasil pemecahan asam amino dapat digunakan sebagai bahan dasar penyusun steroid, yaitu senyawa yang dibutuhkan sel dalam membentuk hormon. Jumlah energi yang dapat dihasilkan dari 1 gram protein sama dengan energi yang dihasilkan dari 1 gram karbohidrat, yaitu 4 kalori. Dengan demikian, jumlah ATP yang dihasilkan akan sama pula. (Mengapa demikian? Dengan cara penghitungan yang telah dijelaskan dalam metabolisme karbohidrat, hitung jumlah ATP yang dapat dihasilkan dari 1 molekul protein. Diskusikan dengan guru dan teman-temanmu).

Lemak juga mengalami hal serupa, tetapi sedikit lebih kompleks. Pemecahan lemak dimulai dengan hidrolisis dari trigliserid menjadi gliserol dan asam lemak. Selanjutnya gliserol akan dimodifikasi menjadi gliseraldehid-3-fosfat (PGAL) dan masuk ke tahap ke-4 dari glikolisis menjadi asam piruvat, Asetil Ko A dan masuk daur Krebs yang dengan penambahan NADH dan FADH₂ dioksidasi dalam rantai transpor elektron. Dari sini dapat dikatakan bahwa dari 1 senyawa lemak dapat dihasilkan 2 molekul Asetil Ko A karena 1 molekul lemak dapat dipecah menjadi 1 molekul gliserol dan 1 molekul asam lemak. Tiap-tiap molekul tersebut dapat menghasilkan 1 molekul asetil Ko A.

Dengan cara yang serupa dengan penghitungan ATP pada metabolisme glukosa, kita dapat menghitung jumlah ATP yang dihasilkan untuk setiap 1 molekul lemak (B.3). 1 gram lemak dapat menghasilkan 9 kalori atau hampir 2.5 kali lebih banyak dibanding dengan gula atau protein. Untuk lebih memperjelas keterangan-keterangan di atas, perhatikan Gambar. 2.17.



Sumber: *Biology*, Barrett.

Gambar 2.17 Hubungan antara penggunaan karbohidrat, protein, dan lemak sebagai bahan bakar dalam respirasi sel.

F. Teknologi yang Terkait dengan Metabolisme

Pengetahuan manusia tentang metabolisme, menjadi dasar ditemukannya teknologi yang bertujuan memecahkan permasalahan yang dihadapi manusia sehingga dapat meningkatkan taraf hidupnya. Manusia sering kali mengalami suatu kondisi yang tidak sesuai dengan keadaan normal, misalnya karena penyakit. Penyakit-penyakit tertentu dapat disebabkan oleh kondisi makanan yang dikonsumsinya. Di samping itu, keadaan lingkungan yang tidak menguntungkan, dapat mengancam ketersediaan bahan makanan untuk kelangsungan hidup manusia. Beberapa usaha manusia dalam mengatasi kedua permasalahan di atas akan dibahas lebih lanjut.

1. Makanan Berkadar Gula Rendah

Dalam keadaan normal, konsumsi gula (sukrosa) dalam jumlah tertentu tidak akan menjadi suatu permasalahan bagi tubuh. Namun, dalam kondisi sakit, misalnya karena kelainan metabolisme pada penyakit diabetes mellitus, dan kegemukan (obesitas), konsumsi gula dalam jumlah normal dapat menimbulkan permasalahan serius bagi penderita penyakit di atas karena dapat meningkatkan kadar gula dalam darah dan meningkatkan berat badan bagi penderita kegemukan.

Seperti diketahui, dalam memilih makanan kita tidak hanya memperhitungkan nilai gizi yang terkandung, tetapi juga mempertimbangkan rasa. Hampir semua manusia menyukai rasa manis. Bagaimana dengan penderita kedua penyakit tadi yang juga masih membutuhkan rasa manis pada makanannya, tetapi tidak boleh mengonsumsi gula dalam jumlah tertentu? Untuk mengatasi hal tersebut, dibutuhkan bahan pengganti gula dengan rasa yang tetap manis, tetapi dengan kalori rendah.

Aspartam adalah salah satu bahan pengganti gula yang ditemukan oleh G.D. Searle pada tahun 1965. Bahan ini 200 kali lebih manis dibanding dengan gula, sehingga untuk menimbulkan rasa manis, tidak dibutuhkan bahan dalam jumlah banyak. Searle mematenkan Aspartam dengan nama dagang *Nutrasweet*. Tahun 1981, Badan Pengawas Makanan dan Obat Amerika (FDA), merekomendasikan digunakannya pemanis ini dalam “soft drink diet”, yoghurt berkadar lemak rendah dan pada puding beras. Aspartam terdiri atas dua molekul asam amino esensial, yaitu phenilalanin dan asam aspartat.

Sakarin merupakan pemanis buatan yang telah lama kita kenal. Bahan ini 20 kali lebih murah dibandingkan Aspartam. Sakarin hampir tidak mengandung kalori sehingga penggunaannya tidak akan menimbulkan permasalahan kelebihan kalori.

HFCS (High Fructose Corn Syrup), bukan merupakan pemanis buatan, tetapi karena fruktosa lebih manis dibanding dengan glukosa dalam kadar yang sama, maka penggunaan pemanis ini juga dapat mengurangi jumlah

kalori. Fruktosa (HFCS) seperti namanya berasal dari jagung dan dibuat dengan proses pengubahan glukosa menggunakan enzim *glucosa isomerase* yang dimobilisasi.

Gula alkohol adalah gula hasil turunan alkohol yang secara alami banyak ditemukan pada buah-buahan dan sayuran. Di antara gula alkohol yang kita kenal adalah sorbitol yang sering digunakan untuk menimbulkan rasa manis pada permen, permen karet, atau roti.

KEGIATAN 2.1

Mencari Informasi tentang Dampak dari Penggunaan Pemanis Buatan

Di antara kalian mungkin pernah mendengar berita bahwa penggunaan pemanis buatan dapat menimbulkan dampak negatif bagi pemakainya. Misalnya, penggunaan Aspartam akhir-akhir ini disinyalir dapat menimbulkan dampak negatif bagi penderita penyakit phenilketonuria (PKU). Coba kumpulkan informasi tentang penggunaan pemanis buatan dan dampak negatif dan positif yang dapat ditimbulkannya dan buatlah semacam klipng atau makalah dari apa yang telah kamu temukan. Bersama guru dan temanmu diskusikan informasi-informasi yang terkumpul tersebut, guna memperoleh informasi yang lebih luas dan menyeluruh.

2. Teknologi Pengawetan Makanan

Untuk menjaga kelangsungan hidupnya, manusia harus senantiasa menjaga ketersediaan bahan makanannya. Namun seperti diketahui, bahan makanan manusia juga merupakan media yang baik bagi pertumbuhan mikroorganisme yang ada di lingkungan. Dengan demikian, manusia harus berusaha mencegah agar bahan makanan tersebut tidak dijadikan sebagai media bagi pertumbuhan mikroba, dengan cara mengawetkannya. Mengawetkan dalam hal ini dapat berarti mencegah masuknya mikroba atau membunuh dan mencegah pertumbuhan mikroba yang telanjur masuk ke dalam bahan makanan tersebut. Dengan pengawetan yang baik, bahan makanan menjadi lebih berkualitas karena dapat selalu digunakan dalam keadaan yang terbaik dan terbebas dari organisme pengganggu beserta senyawa-senyawa merugikan yang dihasilkannya.

Beragam-macam metode pengawetan makanan telah dilakukan oleh manusia dari yang paling sederhana, seperti pengeringan, pemanisan, pengasinan sampai yang lebih canggih, seperti iradiasi, pengozonan, dan perlakuan dalam kondisi vakum (hampa udara).

- a. Pengeringan
Proses ini sebenarnya bertujuan menghilangkan air dari bahan yang diawetkan. Dengan menurunnya kadar air, mikroba tidak dapat tumbuh dengan baik karena untuk pertumbuhannya air merupakan komponen terpenting.
- b. Pemanisan dan pengasinan
Tujuan kedua proses tersebut adalah untuk menaikkan tekanan osmotik larutan dalam lingkungan mikroba dengan penambahan gula atau garam dalam konsentrasi tinggi. Dengan demikian, air akan ditarik dari sel mikroba dan sel akan mengalami dehidrasi, metabolisme terhenti sehingga memperlambat atau menghambat pertumbuhan mikroba.
- c. Suhu tinggi/rendah
Perlakuan suhu yang ekstrem, seperti panas, dingin atau beku, dapat menghambat atau membunuh mikroba. Dengan suhu ekstrem, enzim-enzim dalam mikroba akan rusak atau berhenti bekerja sehingga proses metabolisme terhenti yang pada akhirnya menyebabkan kematian atau terhambatnya pertumbuhan mikroba.
- d. Iradiasi
Iradiasi merupakan metode pengawetan makanan yang relatif baru. Iradiasi bahan makanan biasanya menggunakan iradiasi elektromagnetik, yaitu iradiasi yang menghasilkan foton berenergi tinggi yang dapat menyebabkan terjadinya ionisasi dan eksitasi pada materi yang dilaluinya. Iradiasi semacam ini dikenal dengan iradiasi pengion. Iradiasi pengion yang paling sering digunakan adalah sinar γ (gamma) yang dipancarkan dari kobalt radioaktif (Cobalt-60) dan sesium radioaktif (Caesium-37). Keefektifan radiasi berintensitas tinggi ini dalam mensterilkan suatu produk tidak diragukan lagi. Namun, pengaruh iradiasi terhadap rasa, bau, aroma, warna, tekstur dan mutu gizi masih perlu dikaji dengan lebih baik. Demikian pula dengan perubahan-perubahan kimiawi yang mungkin dihasilkan dari bahan pangan yang diiradiasi, masih perlu dievaluasi pengaruhnya terhadap manusia dan hewan.

KEGIATAN 2.2

Meneliti Metode Pengawetan Makanan

Kualitas makanan, di antaranya ditentukan oleh proses pengawetan atau penyimpanannya. Dari metode-metode pengawetan makanan yang telah dijelaskan di atas, kembangkanlah suatu *penelitian sederhana* yang bertujuan *melihat metode pengawetan paling cocok bagi suatu bahan*

makanan, diukur dari keawetan, terjadi tidaknya perubahan rasa, bau dan warnanya. Pilih beberapa macam bahan makanan dan cara pengawetan yang paling sesuai dengan kondisi di sekolahmu (ketersediaan alat, bahan, dan waktu).

Sebagai contoh kamu dapat memilih bahan makanan: roti, buah, atau ikan. Proses pengawetan, misalnya pemanisan, pengasinan, pendinginan, atau pengeringan. Lakukan penelitian tersebut dengan tahapan-tahapan metode ilmiah yang telah diajarkan. Jangan lupa tentukan mana variabel bebas dan variabel terikatnya. Catat hasil penelitianmu, lalu presentasikan dan diskusikan di depan kelas.

3. Makanan Suplemen

Dalam kondisi normal, kebutuhan gizi manusia sebenarnya telah dapat tercukupi dari makanan seimbang yang dikonsumsi. Namun, dalam keadaan tertentu misalnya sakit, untuk beraktivitas terlalu tinggi atau baru sembuh dari sakit, sering kali diperlukan suplemen makanan yang dapat menambah atau mengganti zat-zat gizi yang kurang terpenuhi karena kondisi-kondisi tersebut. Sebagai contoh orang sakit yang tidak sadarkan diri atau tidak mampu makan dengan normal, tubuhnya tetap harus disuplai dengan zat-zat gizi. Dari mana zat gizi tersebut dapat diperoleh? Zat-zat gizi dalam bentuk lain selain makanan yang kita makan sehari-hari, dan dapat mengganti atau menambah kebutuhan gizi manusia kita kenal dengan makanan suplemen. Makanan suplemen tersebut misalnya berupa sumber energi, berupa cairan infus, protein, tablet vitamin, atau multivitamin dan mineral.

a. Cairan Infus

Cairan infus sebagai makanan suplemen (makanan pengganti) biasanya mengandung larutan gula berupa glukosa. Seperti kita ketahui glukosa adalah bahan yang paling mudah diserap usus dan diubah menjadi energi siap pakai. Dengan demikian, kebutuhan energi bagi penderita tidak harus disuplai melalui makanan, tetapi dapat digantikan dengan cairan ini.

b. Protein Sel Tunggal (PST)

Protein sel tunggal dihasilkan dari material mikroba termasuk fungi (terutama ragi) dan alga berupa *Chlorella* dan *Spirulina*. PST mempunyai nilai nutrisi yang tinggi karena bahan terbanyak yang dikandung mikroba-mikroba tersebut adalah protein. Protein mikroba tersebut dapat digunakan secara langsung sebagai bagian dari bahan makanan manusia, meskipun saat ini masih lebih sering digunakan sebagai makanan hewan. Ada beberapa alasan mengapa PST dapat digunakan sebagai bahan pangan alternatif. Mikroba

dapat tumbuh jauh lebih cepat dibandingkan dengan hewan dan tumbuhan, dapat menggunakan substrat yang bervariasi termasuk bahan limbah sehingga sekaligus dapat menekan polusi, dan mikroba dapat tumbuh pada tempat yang relatif sempit. Karena hal-hal tersebut, PST sering dikatakan sebagai sumber protein masa depan.

c. Vitamin

Vitamin juga dapat dikatakan sebagai makanan suplemen karena pada kondisi tertentu, seperti sakit atau baru sembuh dari sakit, diperlukan tambahan vitamin selain dari makanan untuk mempercepat penyembuhan. Vitamin dapat berfungsi sebagai koenzim dalam proses-proses metabolik penting (misalnya B kompleks) dan fungsi-fungsi lain seperti antioksidan (misalnya vitamin A, C, dan E).

d. Mineral

Beberapa mineral dapat ditambahkan pada makanan suplemen yang disebut multivitamin, yang di dalamnya selain mengandung vitamin juga terdapat beberapa mineral. Mineral penting yang sangat dibutuhkan tubuh, di antaranya P (fosfor), Ca (kalsium), dan Fe (besi). Manusia memerlukan kalsium dan fosfor dalam jumlah relatif besar untuk pembentukan dan pemeliharaan tulang. Kalsium juga diperlukan untuk fungsi normal otot, dan fosfor merupakan unsur pembentuk ATP dan asam nukleat. Besi adalah mineral yang penting dalam pembentukan hemoglobin.

Tugas

Untuk menambah wawasanmu tentang teknologi pengawetan makanan dan makanan suplemen, kumpulkanlah tulisan-tulisan tentang hal tersebut baik dari koran, majalah, atau internet. Presentasikan hasilnya dan diskusikan serta analisis dampak positif dan negatifnya, selanjutnya buatlah saran-saran pemecahan masalah yang mungkin timbul.

INFO BIOLOGI

Bahaya Terlalu Banyak Minum “Soft Drink”

Saat orang Amerika mulai sadar pada dampak buruk mengonsumsi sukrosa, kita di sini malah bangga meniru pola makan mereka. Bahkan lebih getol mengasup “soft drink”, permen, biskuit yang dilapisi sukrosa, sampai gula dan sirup jagung yang kerap dipromosikan sebagai rendah kalori (padahal tidak begitu).

Banyak orang masih belum mengerti bahwa gula (gula dari tebu atau sukrosa) mengandung glukosa dan fruktosa dengan perbandingan yang sama besar. Dalam kondisi “normal” tidak berlebihan), glukosa dibakar melalui jalur “biasa” menjadi tenaga, sedangkan sisa pembakaran glukosa diubah menjadi asam lemak. Pembakaran fruktosa pun harus melalui jalur pembakaran glukosa ini. Setelah sukrosa dicerna di usus, glukosa dan fruktosa masuk ke pembuluh darah dan hati.

Bagaimana jika sukrosa yang dikonsumsi terlalu banyak sehingga timbul gelombang atau “banjir” glukosa dan fruktosa? Dampaknya, fruktosa tidak dapat masuk jalur pembakaran glukosa sehingga terpaksa menempuh jalur pintas, diubah menjadi gliserol-3-fosfat. Begitu juga dengan glukosa, jika terlalu banyak akan diubah pula menjadi gliserol-3-fosfat. Padahal gliserol-3-fosfat ini dapat mengikat tiga asam lemak dan membentuk trigliserida. Trigliserida ada yang bebas beredar dalam darah, ada pula yang disimpan dalam jaringan lemak. Peningkatan kadar trigliserida dapat memicu penyakit jantung dan pembuluh darah (kardiovaskuler).

Begitu berbahayanya trigliserida ini, kelebihan 800mg/dl saja sudah dapat menyebabkan terjadinya pankreatitis akut atau radang kelenjar pankreas, untuk itu penting menjaga trigliserida tetap normal, di bawah 80 mg/dl.

Dahulu di Amerika Serikat, meningkatnya kasus kardiovaskuler, obesitas, dan diabetes menimbulkan kekhawatiran, sekaligus menimbulkan gagasan untuk mengganti konsumsi lemak hewan dengan karbohidrat sebagai sumber energi. American Diabetes Association bahkan merekomendasikan energi dari lemak tidak boleh lebih dari 30%. Karbohidrat pun menggantikan posisi lemak sebagai sumber energi utama. Namun, sumber energi pengganti lemak pun tak sepenuhnya aman karena belakangan terbukti, sukrosa terutama fruktosa, ternyata dapat meningkatkan kadar trigliserida dan menurunkan kadar kolesterol baik dalam darah sehingga meningkatkan jumlah pasien kardiovaskuler. Tak heran kalau American Diabetes Association akhirnya menganjurkan pembatasan pemakaian sukrosa dan menggantikannya dengan tepung.

Sumber: *Intisari*, Maret 2005

Rangkuman

1. Metabolisme adalah seluruh proses atau reaksi biokimia dalam sel untuk memperoleh dan menggunakan energi guna melaksanakan aktivitas dan menjaga kelangsungan hidup sel tersebut. Metabolisme terdiri atas anabolisme (penyusunan) dan katabolisme (pemecahan).
2. Setiap peristiwa metabolisme membutuhkan komponen-komponen penunjang utama. Komponen tersebut terdiri atas enzim sebagai biokatalisator, kofaktor enzim berupa FAD, FMN, NADP, ATP, dan reaksi oksidasi-reduksi (redoks).
3. Respirasi sel adalah peristiwa katabolisme ketika terjadi pemecahan/oksidasi glukosa menjadi CO_2 dan air untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Respirasi sel dapat terjadi dengan adanya oksigen (aerob) dan tanpa oksigen (anaerob). Respirasi secara aerob terdiri atas tiga reaksi, yaitu glikolisis, dekarboksilasi oksidatif (siklus Krebs), dan rantai transpor elektron.
4. Fotosintesis merupakan peristiwa anabolisme (penyusunan) karbohidrat, terutama dilakukan oleh tumbuhan hijau. Dalam peristiwa ini, molekul CO_2 dan air diubah menjadi karbohidrat dan oksigen dengan bantuan klorofil dan energi matahari. Fotosintesis terdiri atas dua tahap reaksi, yaitu reaksi terang yang menghasilkan ATP dan NADPH_2 dan reaksi gelap yang menghasilkan karbohidrat. Kedua reaksi terjadi di kloroplas.
5. Kemosintesis adalah reaksi pembentukan karbohidrat dari CO_2 dan air, tidak menggunakan energi matahari sebagai sumber energi, tetapi menggunakan energi dari reaksi kimia. Kemosintesis dapat dilakukan oleh bakteri kemosintetik.

Kata Kunci

<i>akseptor elektron</i>	<i>glikolisis</i>	<i>reaksi redoks</i>
<i>active site</i>	<i>katabolisme</i>	<i>reaksi terang</i>
<i>anabolisme</i>	<i>kemosintesis</i>	<i>siklus krebs</i>
<i>ATP</i>	<i>koenzim</i>	<i>siklus Calvin</i>
<i>biokatalisator</i>	<i>kofaktor</i>	
<i>energi aktivasi</i>	<i>metabolisme</i>	
<i>enzim</i>	<i>reaksi gelap</i>	

Evaluasi Akhir Bab

A. Pilih jawaban yang paling tepat.

1. Dalam metabolisme, reaksi selalu terjadi secara bertahap. Hal ini bertujuan untuk . . .
 - A. menghasilkan energi yang lebih banyak
 - B. memanfaatkan energi yang lebih efektif
 - C. menghasilkan senyawa-senyawa antara
 - D. menghasilkan ATP
 - E. mengubah bentuk energi
2. Enzim berfungsi sebagai katalis biologis karena dapat . . .
 - A. mengurangi energi aktivasi dalam suatu reaksi biokimia
 - B. mempertahankan reaksi biokimia dalam sel
 - C. menyeimbangkan reaksi biokimia dalam sel
 - D. mengurangi penggunaan bahan bakar dalam sel
 - E. bekerja dalam reaksi pembentukan maupun penguraian
3. Energi hasil metabolisme selalu disimpan dalam bentuk . . .

A. NADP	D. Karbohidrat
B. Produk	E. FAD
C. ATP	
4. Oksidasi adalah peristiwa . . .
 - A. pelepasan elektron
 - B. penerimaan elektron
 - C. pelepasan oksigen
 - D. penerimaan hidrogen
 - E. pelepasan oksigen dan penerimaan hidrogen
5. Jumlah ATP yang dihasilkan pada rantai transpor elektron dalam respirasi adalah . . .

A. 34 ATP	D. 36 ATP
B. 32 ATP	E. 10 ATP
C. 38 ATP	
6. Dalam fotosintesis, energi cahaya dapat diubah menjadi energi kimia terutama karena adanya . . .

A. ATP	D. Klorofil
B. Akseptor elektron	E. Enzim
C. Donor elektron	

7. Dalam rantai transpor elektron, yang bertindak sebagai pembawa elektron adalah
 - A. flavoprotein, koenzim Q, dan sitokrom
 - B. NAD dan FAD
 - C. ATP
 - D. ADP dan fosfat inorganik
 - E. NADPH₂

8. Yang dimaksud dengan organisme anaerob fakultatif adalah
 - A. organisme yang tidak dapat melakukan respirasi tanpa oksigen
 - B. organisme yang dapat melakukan respirasi tanpa oksigen
 - C. organisme yang dapat melakukan respirasi dengan dan tanpa adanya oksigen
 - D. organisme yang mati jika ada oksigen
 - E. organisme yang mati tanpa ada oksigen

9. Reaksi terang pada fotosintesis menghasilkan

A. Karbohidrat	D. Karbohidrat dan oksigen
B. CO ₂ dan air	E. ATP dan asam piruvat
C. ATP, NADPH ₂ dan oksigen	

10. Bahan yang terkandung dalam larutan infus sebagai sumber energi adalah

A. sukrosa	D. glukosa
B. protein	E. garam
C. lemak	

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan benar.

1. Apa yang dimaksud dengan metabolisme? Jelaskan hubungannya dengan energi, reaksi biokimia, dan enzim.
2. Metabolisme terdiri atas anabolisme dan katabolisme. Jelaskan masing-masing istilah tersebut dan hubungkan dengan penggunaan energi serta bagaimana hubungan antara keduanya.
3. Dalam proses respirasi sel, pemecahan materi organik berlangsung secara bertahap. Jelaskan mengapa terjadi demikian, dan dalam bentuk apa energi yang dihasilkan dari proses pemecahan tersebut disimpan.
4. Ada beberapa komponen penting yang berperan dalam fotosintesis. Jelaskan komponen apa yang berperan dalam menangkap cahaya matahari sebagai sumber energi.
5. Aspartam merupakan salah satu jenis pemanis buatan. Jelaskan terdiri atas apakah Aspartam tersebut dan mengapa Aspartam tidak dianjurkan bagi penderita PKU.

Bab III

Hereditas



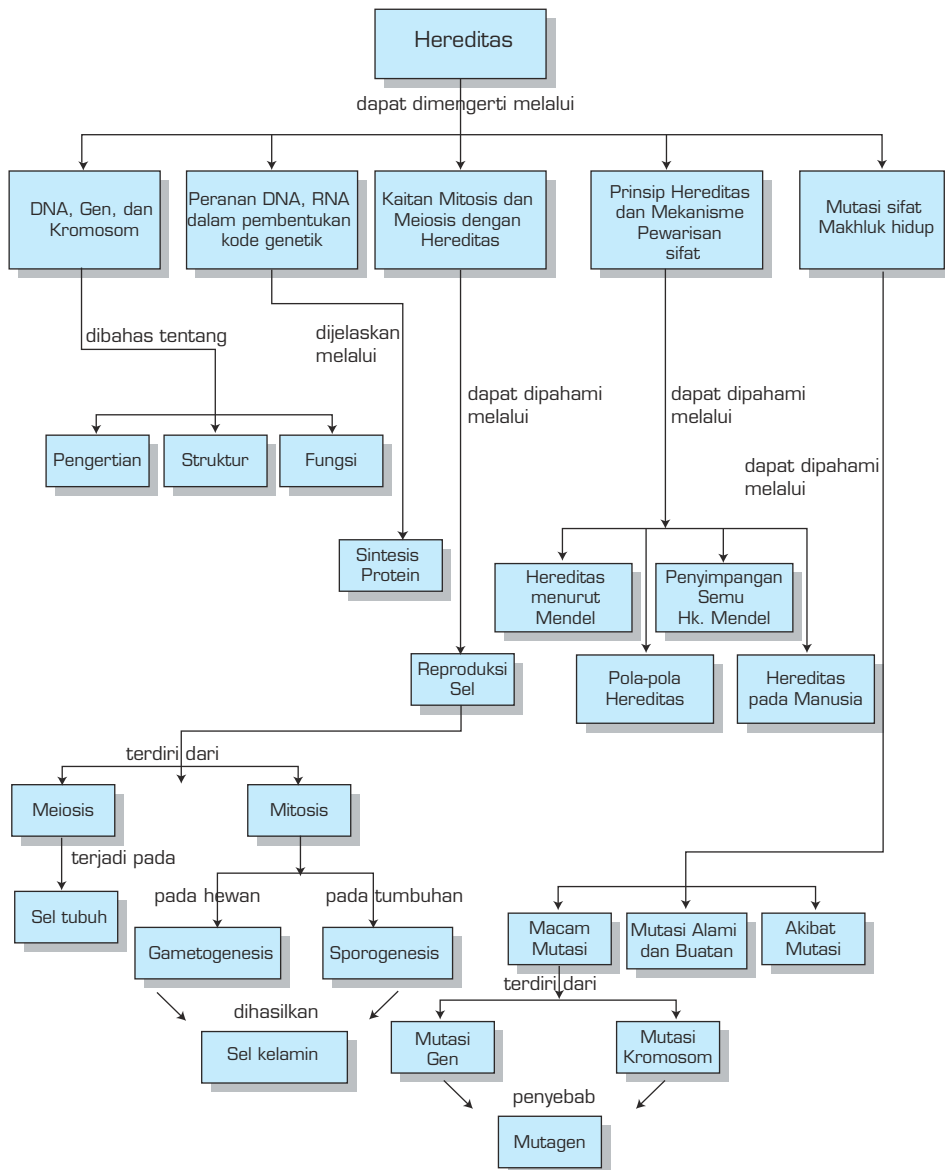
Sumber: *Biology The Unity and Diversity of Life*, Starr Taggart

TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, siswa dapat:

1. menjelaskan hubungan antara gen, DNA, dan kromosom;
2. mendeskripsikan struktur heliks DNA, serta sifat dan fungsinya;
3. mendeskripsikan struktur, sifat, dan fungsi RNA;
4. menjelaskan hubungan DNA-RNA-Polipeptida;
5. mengurutkan proses tahapan sintesis protein;
6. menjelaskan proses replikasi dan transkripsi DNA;
7. menjelaskan proses penyampaian kode genetika;
8. menjelaskan peran dan bagian-bagian dalam sintesis protein;
9. menemukan macam-macam kode genetik;
10. mengidentifikasi sel yang akan bereproduksi;
11. menjelaskan urutan dan ciri-ciri tahapan mitosis;
12. menjelaskan urutan dan ciri-ciri tahapan meiosis;
13. membedakan proses, tahapan, tempat terjadinya, fungsi pembelahan mitosis, dan meiosis;
14. menjelaskan gametogenesis terkait pewarisan sifat;
15. menjelaskan hukum mendel;
16. menjelaskan cara-cara menghindari terjadinya pewarisan sifat yang merugikan;
17. menjelaskan macam mutasi dan penyebabnya;
18. menjelaskan keuntungan dan kerugian dari berbagai peristiwa mutasi.

PETA KONSEP



Hereditas adalah ilmu yang mempelajari sifat atau karakter yang diturunkan dari satu generasi ke generasi berikutnya secara turun temurun. Bagian-bagian yang diturunkan bukanlah sifat itu sendiri melainkan suatu faktor yang disebut gen.

Gen terletak pada tempat khusus yang disebut lokus (*locus*), jamaknya losi (*loci*) pada kromosom, yang terdapat di dalam inti sel. Bahan dasar inti sel (nukleus) adalah protein khas yang disebut protein inti atau nukleoprotein dan asam nukleat. Di dalam inti sel terdapat bermacam-macam asam nukleat, tetapi asam nukleat yang berhubungan dengan hereditas adalah Asam Deoksiribo Nukleat (DNA) dan Asam Ribo Nukleat (RNA)

A. DNA, Gen, dan Kromosom

Thomas Hunt Morgan, seorang ahli genetik dan ahli embriologi asal Amerika menyatakan bahwa faktor-faktor keturunan atau gen terdapat pada kromosom dalam inti sel. Bahan dasar inti sel adalah protein inti atau nukleoprotein. Inti sel dibangun oleh senyawa protein dan asam nukleat. Asam nukleat ada dua macam, yaitu DNA dan RNA.

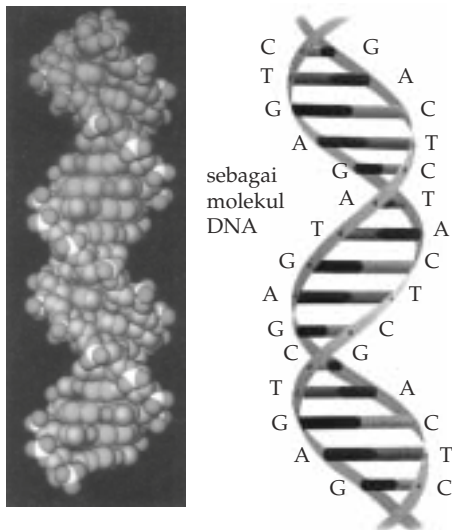
1. Pengertian DNA, Gen, dan Kromosom

Dioxyribo Nucleic Acid (DNA) atau Asam Deoksiribo Nukleat merupakan senyawa kimia yang terdapat di dalam inti sel. DNA sangat berperan pada proses sintesis protein untuk pembentukan enzim, dan protein lain.

Gen adalah unit terkecil dari Hereditas, Gen merupakan bagian dari kromosom yang berfungsi sebagai pembawa faktor keturunan. Gen terbentuk dari sejumlah asam nukleat yang tersusun dalam makromolekul yang disebut DNA.

Istilah kromosom diperkenalkan oleh W. Waldeyer pada tahun 1888. Kromosom (*chroma* = warna, *soma* = badan) adalah benda-benda halus berbentuk lurus seperti batang yang terdiri atas zat yang mudah menyerap zat warna yang disebut kromatin. Kromosom terdapat di dalam inti sel dan baru terlihat jelas jika sel dalam proses pembelahan mitosis ataupun meiosis, yaitu pada metafase. Pada fase ini, kromosom berbentuk benang-benang pendek, tebal dan tersusun teratur pada bidang pembelahan atau pada bidang ekuator. Pada sel tubuh (*somatis*), kromosom terdapat dalam keadaan tunggal (tanpa pasangan) disebut haploid (*n*). Pada sel tubuh manusia terdapat 46 buah kromosom, ini berarti terdapat 23 macam kromosom dalam keadaan berpasangan (23 pasang). Pada setiap satu sel kelamin (*gamet*) manusia terdapat 23 macam kromosom seperti pada sel tubuh, tetapi setiap kromosomnya tunggal.

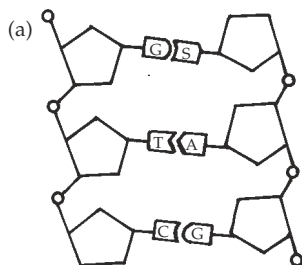
2. Struktur dan Fungsi DNA



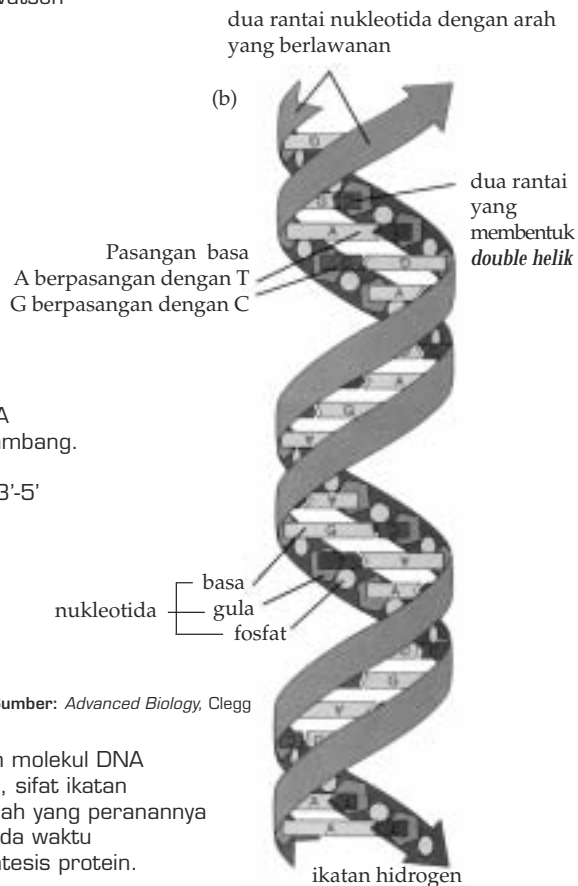
Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.1 Model DNA menurut Watson dan Crick

Pada tahun 1953, Francis H.C Crick dan James D. Watson, berdasarkan analisis foto difraksi sinar X, menggambarkan struktur DNA sebagai tangga tali terpilin dan disebut "Double Helix" (heliks ganda). Ibu tangganya terdiri atas rentetan rantai gugus gula deoksiribosa dan gugus fosfat, sedangkan anak tangganya terdiri atas basa nitrogen, yaitu Purin terdiri atas Adenin(A) dan Guanin (G); serta Pirimidin terdiri atas Sitosin (S) dan Timin (T). Untuk mempelajari struktur DNA, kamu dapat melihat Gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.2a Sebagian molekul DNA dengan menggunakan simbol atau lambang. Rangkaian gugusan gula dan fosfat ditunjukkan oleh arah yang terbalik (3'-5' dan 5'-3').



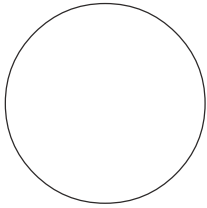
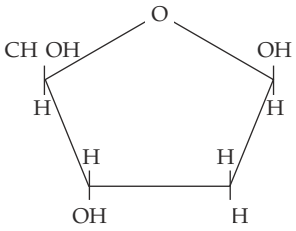
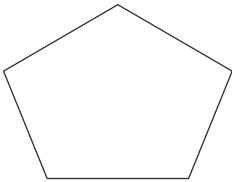
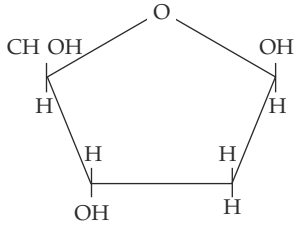
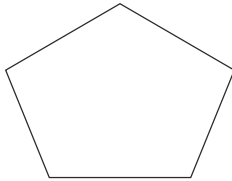
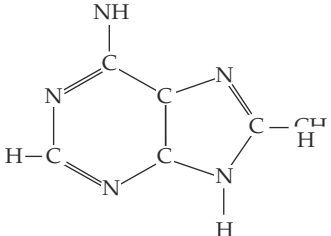
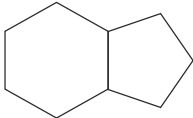
Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

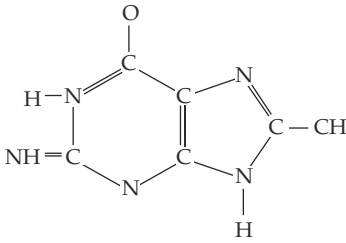
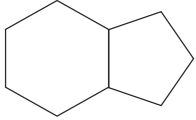
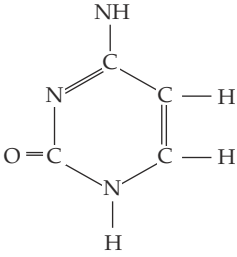
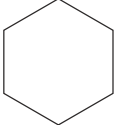
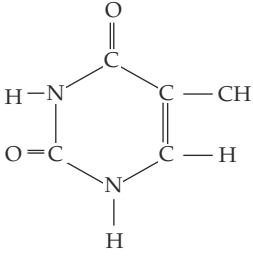
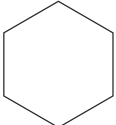
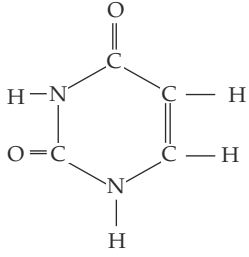
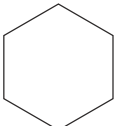
Gambar 3.2b Sebagian molekul DNA dengan ikatan hidrogen, sifat ikatan hidrogen ini sangat lemah yang peranannya sangat penting yaitu pada waktu pembelahan sel dan sintesis protein.

Basa-basa nitrogen yang menyusun anak tangga tersebut dihubungkan oleh ikatan hidrogen yang sifat ikatannya lemah. Setiap anak tangga terdiri atas pasangan basa nitrogen yang khas, yaitu Adenin (A) dengan Timin (T), Sitosin (S) dengan Guanin (G).

Atas penemuan mereka mengenai struktur model DNA tersebut, pada 1962, Crick dan Watson menerima hadiah Nobel. Crick dan Watson menyimpulkan bahwa tatanan nukleotida merupakan perangkat kode instruksi pembangunan seluruh organisme.

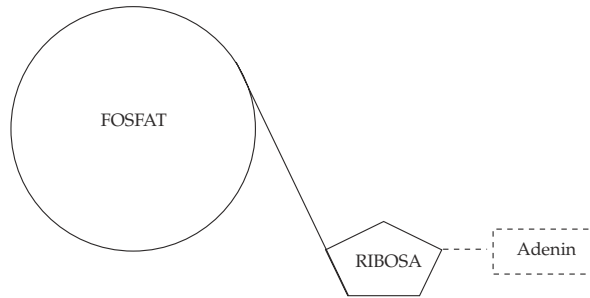
Tabel 3.1 Molekul penyusun DNA

Nama Molekul	Struktur Kimia	Lambang/Symbol
Fosfat	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{HO} - \text{P} - \text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	
Ribosom		
Deoksiribosa		
Adenin (Basa purin)		 <p style="text-align: center;">Adenin</p>

<p>Guanin (Basa purin)</p>		 <p>Guanin</p>
<p>Sitosin (Basa pirimidin)</p>		 <p>Sitosin</p>
<p>Timin (Basa pirimidin)</p>		 <p>Timin</p>
<p>Urasil (Basa pirimidin)</p>		 <p>Urasil</p>

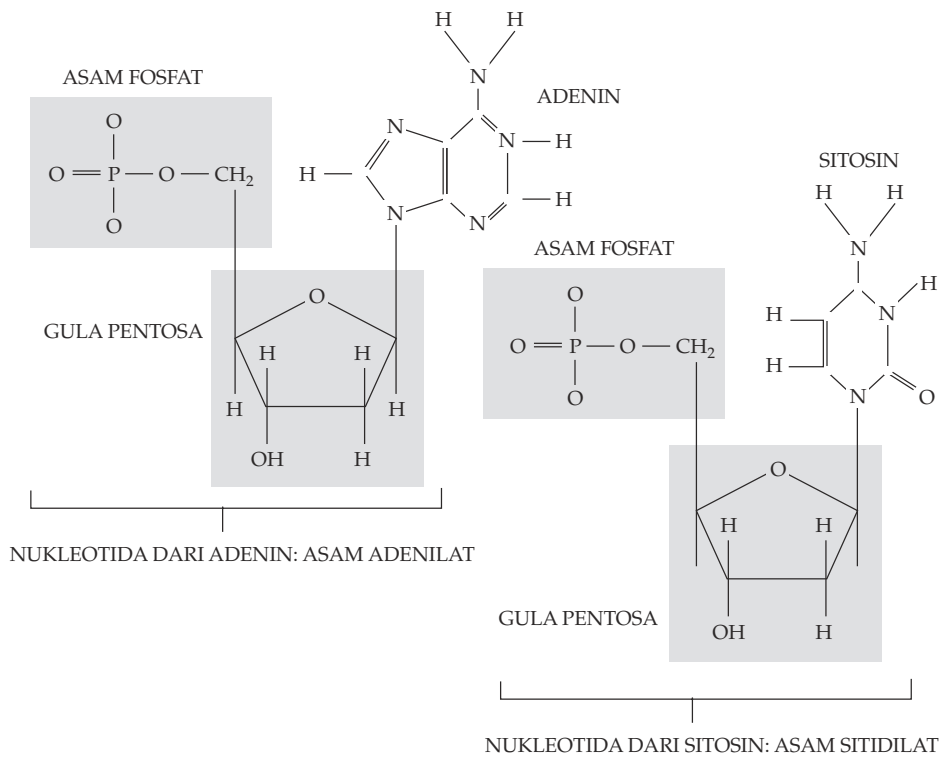
Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

Setiap molekul DNA terdiri atas nukleotida-nukleotida yang terangkai menjadi untaian yang panjang (polinukleotida). Setiap nukleotida mengandung 1 gugus gula deoksiribosa, 1 gugus fosfat, dan 1 basa nitrogen. Perhatikan Gambar 3.3 dan 3.4.



Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

Gambar 3.3 Struktur model nukleotida



Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

Gambar 3.4 Rumus bangun nukleotida

Nukleotida-nukleotida akan membentuk rantai yang panjang, yaitu polinukleotida. Polinukleotida menghubungkan antara nukleotida yang satu dan nukleotida yang lain, yaitu menghubungkan antara gugus fosfat dari suatu nukleotida dan gugus gula dari nukleotida berikutnya. Gugus fosfat terikat secara kimiawi, ikatan-ikatan tersebut sangat kuat dan dikenal sebagai *ikatan ester kovalen* (ikatan fosfodiester).

Suatu molekul DNA terdiri atas dua untaian nukleotida yang tidak identik, tetapi merupakan komplemen atau pasangan satu dengan lainnya. Dikatakan komplemennya karena untaian nukleotida yang satu lagi mengandung basa nitrogen yang tak sama dengan nitrogen yang ada di hadapannya.

KEGIATAN 3.1

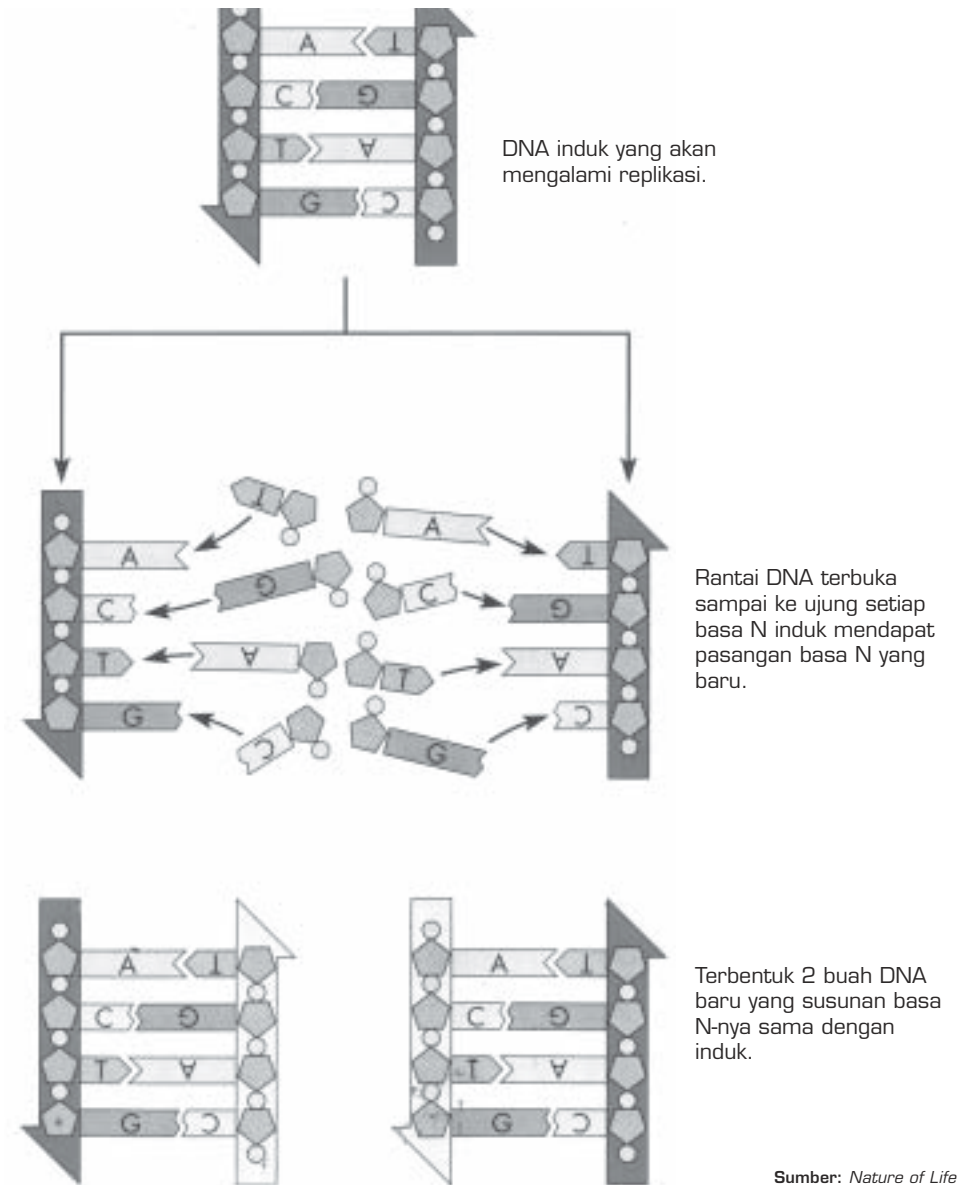
Tes DNA

Untuk memecahkan suatu masalah, misalnya menentukan anak siapa? Mayat siapa? Siapa pelakunya? Pihak kepolisian sering mengadakan tes DNA. Diskusikan dengan teman-temanmu, mengapa polisi melakukan tes DNA?

a. Replikasi DNA

DNA mempunyai kemampuan untuk mengadakan replikasi, yaitu memperbanyak diri atau menggandakan diri. Peristiwa ini terjadi mendahului penggandaan kromosom, berlangsung pada waktu interfase, yaitu pada saat sel siap untuk melakukan pembelahan. Untuk replikasi diperlukan enzim DNA polimerase. Replikasi DNA melalui cara-cara sebagai berikut.

- a. Senyawa DNA yang heliks ganda di dalam setiap kromosom akan membuka secara progresif dari salah satu ujungnya sehingga ikatan-ikatan hidrogen yang lemah akan lepas. Setiap belahan molekul DNA akan lepas dari pilinnya dan memisahkan diri.
- b. Basa-basa nitrogen dari nukleotida-nukleotida bebas yang terdapat dalam nukleoplasma segera bergabung dengan basa-basa dari rantai DNA yang terbuka tersebut. Penggabungan basa-basa nitrogen sesuai dengan pola penggabungan basa. Selanjutnya ikatan-ikatan gula dan fosfat akan terbentuk lagi, terjadilah tangga tali baru. Rantai polinukleotida tunggal yang lama merupakan pola untuk menghasilkan rantai penggenap (komplemen) yang baru.
- c. Pembentukan rantai penggenap itu diteruskan sampai ke ujung lainnya yang menghasilkan dua buah heliks ganda yang sama seperti aslinya. Dengan adanya selubung protein, di luar buah heliks ganda akan terbentuk kromosom yang kemudian disampaikan kepada sel-sel anak sebagai hasil dari pembelahan sel. Untuk memperjelas proses ini, perhatikan Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Replikasi DNA

b. Fungsi DNA

DNA berfungsi menyampaikan informasi genetika dari induk ke generasi berikutnya dan mengatur perkembangan metabolisme tubuh. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa DNA adalah gen itu sendiri. DNA dapat juga mengawasi aktivitas-aktivitas sel dengan memerintahkan pembentukan

semua macam protein (enzim) di dalam sel. DNA berada di dalam inti sel dan pada umumnya pembentukan protein terjadi pada ribosom, yaitu pada sitoplasma. Sehingga, informasi yang ada pada DNA harus diterjemahkan dahulu oleh suatu senyawa tertentu dan dibawa oleh senyawa tersebut dari inti ke sitoplasma. DNA akan membentuk senyawa lain dalam menyampaikan informasi genetik yang akan memerintahkan sintesis protein. Senyawa-senyawa yang dibentuk oleh DNA, yaitu RNA duta, RNA transfer, dan RNA ribosom.

1) *RNA-d*

RNA-d bertugas menyampaikan informasi genetika dari DNA dalam bentuk kode-kode genetik dari inti ke ribosom di dalam sitoplasma. Kode genetika tersebut berupa urutan basa N yang disebut dengan kodon. RNA-d dibentuk oleh DNA jika dibutuhkan saja. Apabila sudah selesai melaksanakan tugasnya, RNA-d akan hancur dalam plasma. Molekul RNA-d merupakan RNA yang terpanjang di dalam sel.

2) *RNA-t*

RNA-t dibuat oleh DNA di dalam inti sel, tetapi selalu terdapat dalam sitoplasma dan ukuran molekulnya sangat kecil. Fungsi RNA-t adalah untuk mengangkut asam-asam amino ke ribosom yang sesuai dengan kode-kode yang terdapat pada RNA-d. Setiap asam amino memerlukan RNA-t khusus. Pada RNA-t, ada dua bagian yang penting, yaitu bagian antikodon (urutan basa N) yang berhubungan dengan kodon dan bagian lain yang mengikat asam amino.

3) *RNA-r*

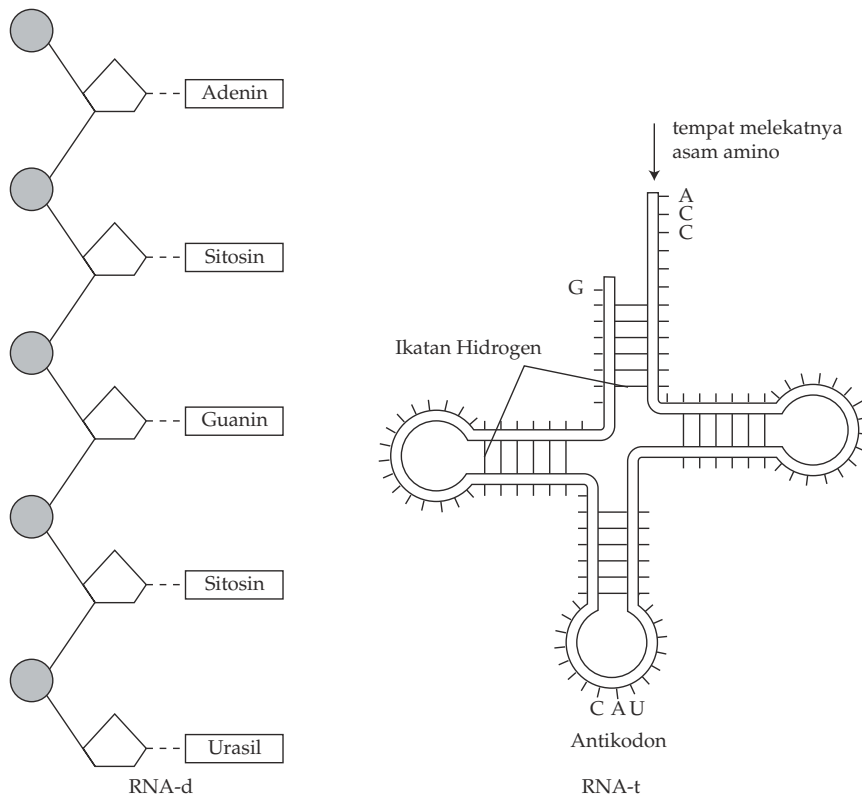
RNA-r berfungsi sebagai mesin perakitan yang bergerak ke satu arah sepanjang RNA-d. RNA-r dibuat oleh DNA dari gen khusus dalam kromatin yang melekat pada nukleolus. RNA-r meskipun tidak digunakan selalu terdapat dalam ribosom.

2. Struktur RNA

RNA merupakan rantai tunggal yang tersusun atas nukleotida. Nukleotida RNA tersusun dari gugus fosfat, 1 gula ribosa, dan 1 basa nitrogen. Basa nitrogen pada RNA adalah Purin terdiri atas Adenin (A) dan Guanin (G), sedangkan Pirimidinnya terdiri atas Sitosin (S) dan Urasil (U). Untuk lebih jelasnya, perhatikan Tabel 3.2, dan perhatikan pula Gambar 3.6.

Tabel 3.2 Perbedaan DNA dan RNA

	DNA	RNA
Bentuk	Rantai panjang yang tersusun atas 100 ribu – 150 juta nukleotida.	Rantai pendek yang tersusun atas 20 ribu – 2 juta nukleotida.
Fungsi	Penurunan sifat pengatur proses sintesis protein.	Pelaksana dalam proses sintesis protein.
Struktur 1) gula 2) Basa N	Deoksiribosa Purin : A dan G Pirimidin : S dan T	Ribosa Purin : A dan G Pirimidin: S dan U
Keberadaannya	Permanen	Masa periodenya pendek
Kadar	Tidak dipengaruhi aktivitas sintesis protein.	Dipengaruhi aktivitas sintesis protein.

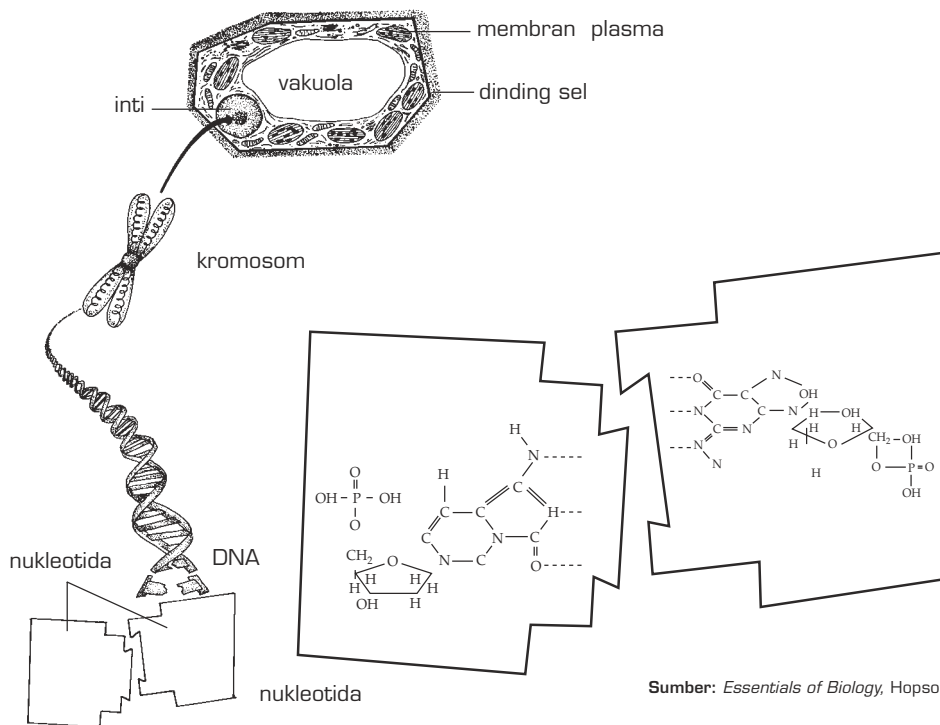


Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.6 Struktur RNA

3. Struktur dan Fungsi Gen

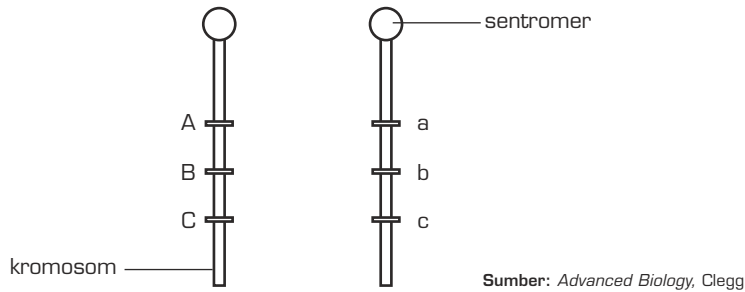
Gen adalah unit terkecil dari bahan sifat keturunan, besarnya yaitu antara 4 -50 milimikron. Istilah gen pertama kali dikemukakan oleh W. Johansen, terdapat dalam kromosom pada bagian kromonema. Jika kromonema dilihat di bawah mikroskop elektron, akan tampak adanya manik-manik yang berjejer tidak beraturan. Manik-manik ini disebut kromomer atau lokus. Di dalam manik-manik ini terdapat protein histon yang mengikat DNA. Tempat kedudukan gen pada bagian kromosom ini disebut lokus. Terdapat beratus-ratus lokus di dalam setiap kromosom yang berderet panjang. Diperkirakan paling sedikit 40.000 gen terdapat di dalam sel tubuh manusia. Jika satu gen bekerja untuk satu sifat, beribu-ribu pula sifat yang terdapat pada manusia. Oleh karena itu, kita tidak perlu heran bahwa di dunia ini tidak ada dua manusia yang sama, bahkan anak kembar satu telur sekalipun. Kedudukan sel-kromosom-DNA-Nukleotida dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Kedudukan sel - kromosom - DNA - nukleotida

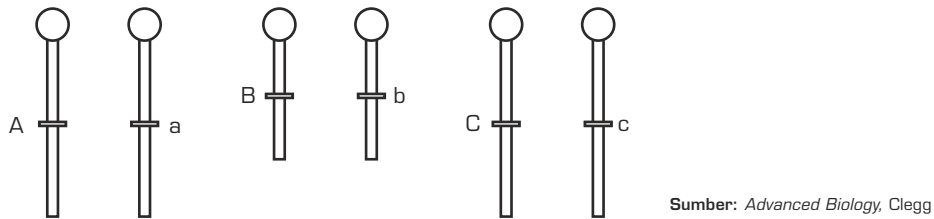
Gen terdiri atas DNA. Jadi, secara kimia gen itu adalah DNA. Jika karena sesuatu struktur DNA berubah, berubah pulalah sebagian karakter individu yang dikendalikan oleh gen tersebut. Peristiwa ini sekarang kita kenal sebagai mutasi. Individu yang mengalaminya disebut mutan. Karena di dalam sel tubuh kromosom mempunyai pasangan homolog, gen juga digambarkan berpasang-pasangan. Pasangan gen tersebut disimpulkan dengan huruf yang sama, baik huruf besar maupun huruf kecil, misalnya AA, Bb, atau cc.

Kromosom digambarkan sebagai garis panjang vertikal dan lokus gen digambarkan sebagai garis pendek melintang (horizontal) pada garis vertikal kromosom. Jika pasangan gen AA, Bb, dan cc di atas terletak pada satu kromosom homolog, dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3.8 Letak gen pada kromosom homolog

Apabila pasangan gen di atas tidak terletak pada satu kromosom homolog, dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3.9 Letak gen pada kromosom yang tidak homolog

Pasangan gen yang terletak pada lokus yang bersesuaian, misalnya A dengan A atau a, B dengan B atau b, C dengan C atau c disebut alel. Gen A bukan pasangan B karena tidak terletak pada lokus yang sama, maka gen A bukan alel dari B.

Penulisan huruf besar untuk simbol gen biasanya dimaksudkan untuk menunjukkan karakter gen yang dominan. Sebaliknya, penulisan gen dengan menggunakan huruf kecil untuk karakter gen yang resesif.

Gen mengendalikan kegiatan sel melalui sintesis protein. Sintesis protein ini dilakukan dengan cara membuat substansi tertentu. Substansi ini kemudian dikirimkan ke sitoplasma, dan berfungsi sebagai cetakan atau matriks untuk membentuk molekul-molekul protein. Protein-protein ini merupakan komponen enzim yang mengatur reaksi metabolisme dalam plasma sel. Diduga setiap gen hanya membuat satu macam komponen enzim. Dari keterangan tersebut dapat disimpulkan bahwa sifat gen adalah sebagai berikut.

- 1) Substansi tersendiri dalam kromosom.
- 2) Mengandung informasi genetis.
- 3) Dapat menduplikasikan diri pada waktu pembelahan sel.

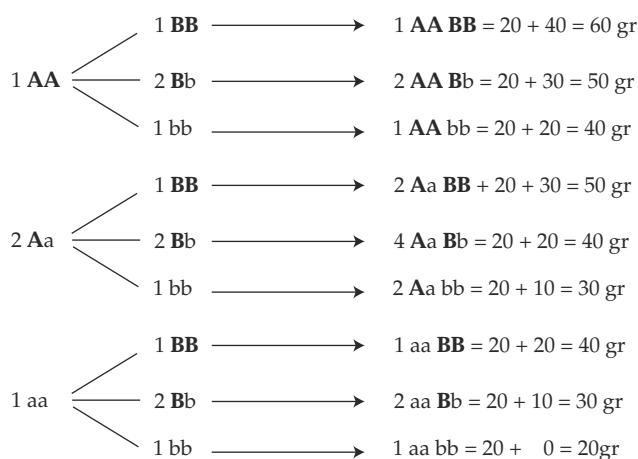
Adapun fungsi gen adalah untuk mengatur perkembangan dan metabolisme individu serta menyampaikan informasi genetika pada generasi berikutnya.

a. Gen Ganda

Pada umumnya satu macam gen akan menampakkan satu sifat atau satu karakter, misalnya kacang ercis gen B lambang untuk biji bulat, gen K untuk lambang biji warna kuning, tetapi ada beberapa macam gen yang bekerja sama menampakkan satu sifat atau satu karakter, tetapi gen-gen tersebut menempati lokus yang berbeda. Gen yang demikian itu disebut gen ganda atau poligen.

Menurut Davenport, pigmen kulit manusia paling sedikit dikendalikan oleh dua pasang gen, misalnya orang Negro mempunyai paling sedikit 2 pasang gen. apabila gen untuk pigmen kulit manusia diberi lambang P, genotipe orang Negro tersebut adalah $P_1P_1P_2P_2$, gen P_1 dan P_2 menempati lokus yang berlainan.

Selain pada pigmen manusia, gen ganda juga banyak dijumpai pada tumbuhan tingkat tinggi, misalnya gen-gen yang menentukan berat buah, tinggi pohon, dan kadar gula. Berat buah tomat, misalnya ada yang besar, sedang, dan kecil. Hal ini karena berat buah ditentukan oleh beberapa pasang gen. Apabila untuk berat ditentukan oleh 2 macam gen, yaitu A dan B, untuk tomat yang berbuah paling besar mempunyai berat 60 gram, genotipenya AA BB dan untuk buah tomat yang terkecil yang mempunyai berat 20 gram bergenotipe aa bb. Apabila kedua pohon tersebut disilangkan, berapa berat buah tomat pada F_1 dan F_2 ?



Buah tomat yang bergenotipe	AA BB	=	60 gram
Buah tomat yang bergenotipe	<u>aa bb</u>	=	<u>20 gram</u>
	selisih	=	40 gram

Selisih 40 gram karena adanya 4 buah gen dominan (AA BB). Jadi, setiap 1 gen dominan menambahkan $40 : 4 = 10$ gram.

P_1 : AA BB x aa bb
60 gram 20 gram

gamet : AB ab

F_1 : Aa Bb
beratnya $20 \text{ gr} + (2 \times 10 \text{ gr}) = 40 \text{ gram}$

P_2 : Aa Bb x Aa Bb
40 gram 40 gram

F_2 :

Perbandingan fenotipe F_2 :

60 gram : 50 gram : 40 gram : 30 gram : 20 gram
1 : 4 : 6 : 4 : 1

Tugas 3.1

Jika kamu ingin lebih memahami tentang gen ganda, coba selesaikan masalah berikut ini:

Apabila orang Negro menikah dengan orang kulit putih, bagaimana rasio genotipe dan rasio fenotipe pada generasi ke-2. jika untuk pigmen ditentukan oleh gen P_1 dan P_2 .

b. Alel

Tiap pasangan gen yang menunjukkan bentuk alternatif sesamanya disebut alel, misalnya gen A alel dari a dan sebaliknya atau gen B alel dari b dan sebaliknya. Harus diingat bahwa jika gen A dan a sealel, A dan a harus terletak pada lokus yang bersesuaian pada kromosom yang homolog. Jadi, gen A tidak sealel dengan gen B atau b karena tidak terletak pada lokus yang bersesuaian walaupun mungkin A dan B atau b terletak pada kromosom yang homolog.

c. Alel Ganda

Gen umumnya hanya mempunyai dua macam kombinasi dengan pasangannya, misalnya gen A kombinasinya AA dan Aa. Jadi, satu seri alel hanya memiliki dua anggota, yaitu A dan a. Namun, ternyata ada juga seri alel atau pasangan gen yang memiliki lebih dari dua anggota alel, misalnya tiga atau empat alel. Alel demikian disebut alel ganda. Contoh alel ganda

terdapat pada golongan darah manusia dan warna bulu pada kelinci. Pada kelinci warna bulu dikendalikan oleh gen C (berpigmen penuh) yang bersifat dominan, kemudian mengalami mutasi berulang kali dan menghasilkan tiga macam alel yang menyimpang dari aslinya. Ketiga macam alel tersebut adalah sebagai berikut.

c = pigmentasi kurang sekali (albino)

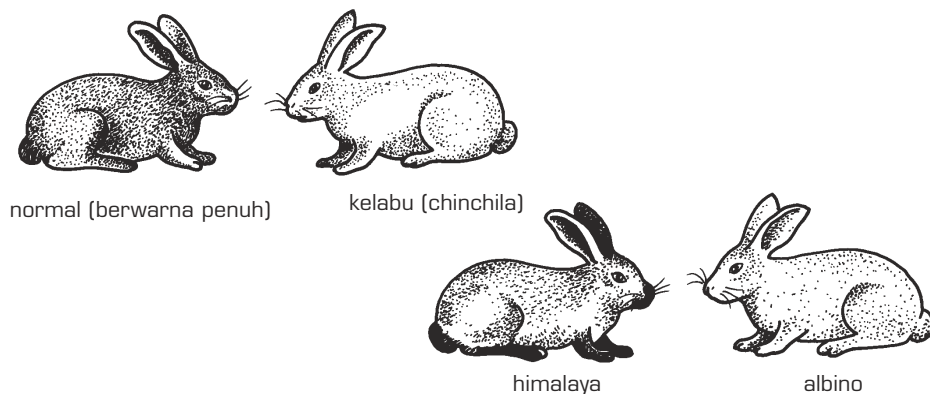
ch = pigmentasi hanya pada bagian ujung-ujung tubuh, yaitu ujung mulut (moncong), kaki, ekor, dan telinga, sedangkan bagian tubuh lainnya berwarna putih (Himalaya).

cch = pigmentasi kelabu muda (Chinchila).

Urutan dominansinya dari keempat alel warna bulu kelinci adalah $C > ch > c$. Gen-gen ini terletak pada kromosom homolog sehingga akan membentuk alel ganda. Kemungkinan macam genotipe dan fenotipe warna bulu kelinci, dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut.

Tabel 3.3 Macam genotipe dan fenotipe warna bulu kelinci

Macam Genotipe	Macam Fenotipe
CC, Cc ^{ch} , Cc ^h , Cc	berwarna penuh (normal)
c ^{ch} c ^{ch} , c ^{ch} c ^h , c ^{ch} c	Chinchila (kelabu muda)
c ^h c ^h , c ^h c	Himalaya
cc	Albino



Gambar 3.10 Warna bulu pada kelinci

Begitu pula untuk golongan darah pada manusia. Golongan darah sistem A, B, AB, dan O pertama kali ditemukan oleh K. Landsteiner, tahun 1900. Keempat golongan darah tersebut ditentukan oleh ada atau tidak adanya aglutinogen dan antibodi. Gen asli untuk golongan darah adalah I = Isoaglutinogen (menggumpalkan sesamanya). Karena mengalami mutasi, gen tersebut mengalami perubahan menjadi tiga macam alel, yaitu:

- I^A = gen yang mengendalikan aglutinogen A dan bersifat dominan;
- I^B = gen yang mengendalikan aglutinogen B dan bersifat dominan;
- i = gen yang mengendalikan tidak mengandung aglutinogen A dan B, bersifat resesif.

Jadi, untuk golongan darah sistem A, B, AB, dan O terdapat beberapa macam genotipe, perhatikan tabel 3.4.

Tabel 3.4 Fenotipe dan genotipe golongan darah sistem A, B, O

Fenotipe	Genotipe
Gol. darah A	$I^A I^A$ dan $I^A i$
Gol. darah B	$I^B I^B$ dan $I^B i$
Gol. darah AB	$I^A I^B$
Gol. darah O	ii

Tugas 3.2

Jika ibu golongan darah A dan ayah golongan darah B. Bagaimana kemungkinan golongan darah anak-anaknya.

4. Struktur dan Fungsi Kromosom

Thomas Hunt Morgan (1911), seorang ahli genetika dan ahli embriologi dari Amerika Serikat (1866-1945), mengamati kromosom lalat buah *Drosophila melanogaster* karena lalat buah cepat berkembang biak, mudah diperoleh, mudah dipelihara, dan bertelur banyak. Lalat buah mempunyai kromosom 8 buah atau 4 pasang, yang terdiri atas 3 pasang autosom dan 1 pasang kromosom seks. Kromosom yang mudah diamati berasal dari sel-sel kelenjar ludah dari larva karena kromosomnya lebih besar jika dibandingkan dengan kromosom organ lainnya.

a. Jumlah Kromosom

Setiap spesies organisme mempunyai jumlah kromosom yang konstan dan spesifik, misalnya dalam setiap sel tubuh manusia terdapat 46 kromosom, pada tikus 40, pada jagung 20, dan pada lalat buah 8. Kita tidak perlu bangga bahwa di dalam setiap sel kita terdapat 46 kromosom, sedangkan lalat buah 8 karena tidak ada hubungan antara jumlah kromosom dengan “derajat” makhluk hidup. Demikian pula tidak ada hubungan antara jumlah kromosom dan ukuran tubuh suatu organisme. Pada sejenis udang, umpamanya, jumlah sel kromosom dalam setiap sel tubuhnya mencapai 168 buah.

Sebagai bahan perbandingan mengenai jumlah kromosom yang tetap dan khas pada setiap spesies organisme dapat kamu lihat pada tabel berikut ini.

Tabel 3.5 Jumlah Kromosom pada Berbagai Organisme

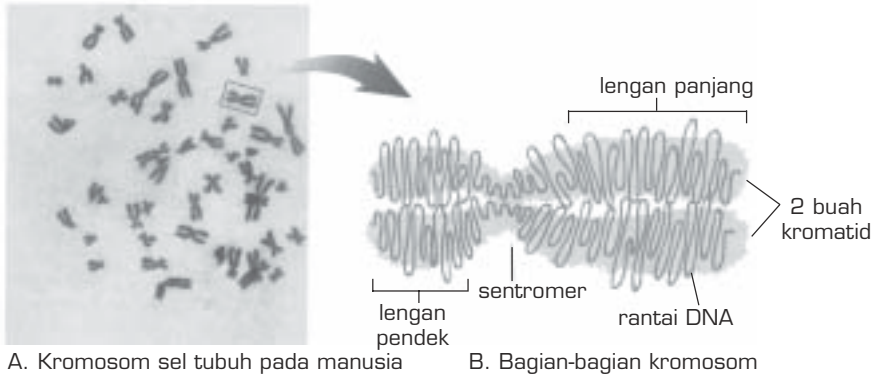
Nama Organisme	Jumlah Kromosom	Nama Organisme	Jumlah Kromosom
Manusia	46	Belalang	24
Gorila	48	<i>Drosophilla melanogaster</i>	8
Simpanse	48	<i>Drosophila obscura</i>	10
Orang utan	48	<i>Drosophila virillis</i>	12
Siamang	50	Udang	168
Kukang	50	Ascaris	2
Marmot	60	Jangkrik	24
Kelinci	44	Cylops	4
Kuda	60	Rhizopoda	1500
Domba	60	Jamur biasa	4
Kambing	60	Pakis	44
Sapi	60	Tomat	24
Anjing	78	Tembakau	48
Kucing	38	Kentang	48
Tikus (<i>Ratus</i>)	42	Kecubung	24
Mencit (<i>Mus</i>)	40	Bawang	16
Ayam	40	Nenas	150
Kadal	34	Jagung	20
Katak	26	Gandum	42
Salamander	28	Ercis	14
Kumbang	30	Buncis	14
Nyamuk (<i>Culex</i>)	6	Lalat	12
Bakteri (<i>E. Coli</i>)	1	-	-

Sumber: *The Study of Biology*, Baker

b. Bagian-Bagian Kromosom

Kromosom dapat diidentifikasi dengan baik pada metafase. Karena sangat halus, umumnya kromosom hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop elektron. Kromosom terdiri atas dua bagian, yaitu sentromer dan lengan.

Sentromer merupakan bagian kepala kromosom yang berfungsi untuk bergantung pada gelendong sewaktu sel membelah. Lengan merupakan badan kromosom itu sendiri, bagian inilah yang mengandung kromonema berupa benang halus yang berpilin, tempat berderetnya gen-gen. Perhatikan Gambar 3.11



A. Kromosom sel tubuh pada manusia

B. Bagian-bagian kromosom

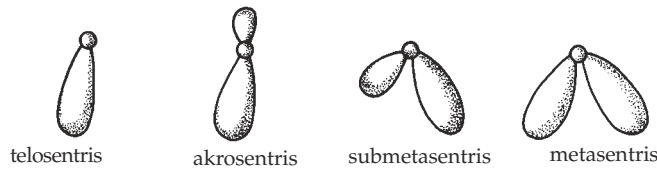
Sumber: *The Nature of Life*, Postlethwait

Gambar 3.11 Bagian-bagian kromosom

c. Macam-Macam Kromosom

Kromosom mempunyai bermacam-macam bentuk, lihat Gambar 3.12. Berdasarkan letak sentromernya, terdapat empat macam bentuk dasar kromosom, yaitu:

- 1) telosentris, jika kromosom mempunyai satu lengan;
- 2) akrosentris, jika kromosom mempunyai dua lengan, tetapi satu lengan pendek sekali dibandingkan dengan lengan yang lainnya;
- 3) submetasentris, jika kromosom mempunyai dua lengan yang hampir sama panjangnya;
- 4) metasentris, jika kromosom mempunyai dua lengan yang sama panjang.

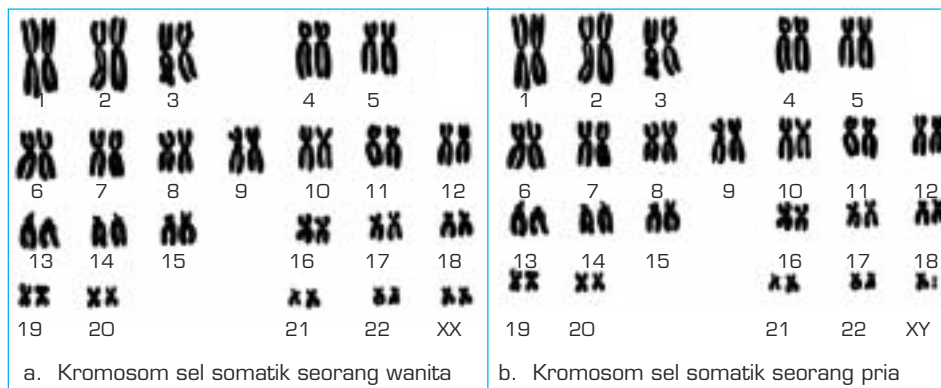


Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.12 Berbagai bentuk kromosom

Selain berdasarkan bentuknya, kromosom juga dapat dibedakan berdasarkan fungsinya. Menurut fungsinya dalam mengatur jenis kelamin, terdapat dua macam kromosom, yaitu autosom dan kromosom seks. Autosom, yaitu kromosom yang tidak berperan dalam menentukan jenis kelamin, sedangkan kromosom seks, yaitu kromosom yang berperan dalam menentukan jenis kelamin, biasanya diberi simbol X dan Y.

Cara penulisan kromosom pada individu adalah sebagai berikut. Pada manusia, misalnya, setiap sel tubuh mengandung 46 buah kromosom, yang terdiri atas 22 pasang autosom dan 1 pasang kromosom seks. Jika ditulis, 22 AA + XX untuk individu wanita dan 22 AA + XY untuk individu laki-laki. Namun, pada sel kelamin (gamet) yang memiliki 23 buah kromosom dapat ditulis 22 A + X untuk sel telur (ovum) dan 22 A + X atau 22 A + Y untuk sperma (perhatikan Gambar 3.13).



Gambar 3.13 Perbedaan kromosom sel somatik wanita dan pria

Jadi, pada wanita sel telurnya hanya mempunyai satu macam kromosom seks, yaitu X. Adapun pada laki-laki di dalam spermanya terdapat dua macam kromosom seks, yaitu X dan Y. Jika terjadi peleburan antara sel telur dan sperma, akan terjadi kemungkinan kombinasi kromosom sebagai berikut:

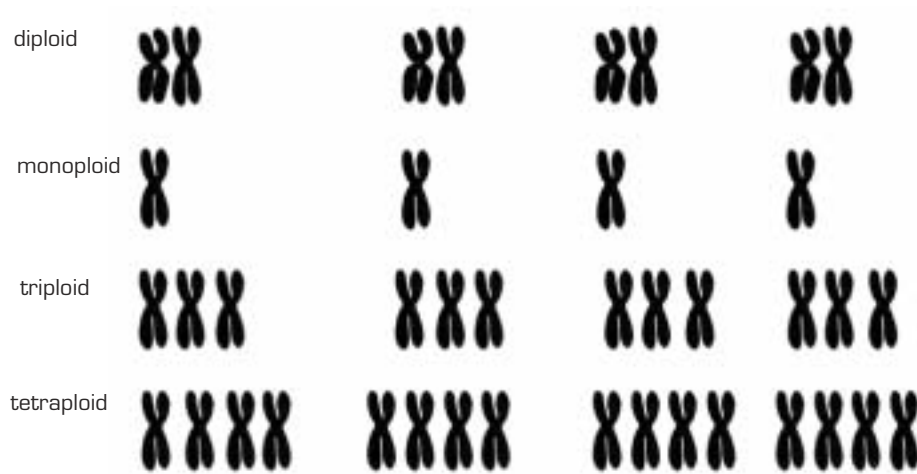
- 1) sel telur (22A + X) dengan sperma (22A + X) akan membentuk kombinasi 22 AA + XX, berarti akan terlahir individu dengan jenis kelamin wanita;
- 2) sel telur (22A + X) dengan sperma (22A + Y) akan membentuk kombinasi 22 AA + XY, berarti akan terlahir individu jenis kelamin laki-laki.

Dari gambaran di atas dapat disimpulkan bahwa yang menentukan jenis kelamin anak adalah laki-laki (ayahnya) bukan ibunya karena kromosom seks Y hanya terdapat pada sperma.

d. Ploidi (Perangkat atau Genom)

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa kromosom pada sel tubuh terdapat dalam keadaan berpasangan. Kromosom yang berpasangan dan mempunyai bentuk, ukuran, serta komposisi yang sama disebut kromosom homolog. Pada setiap sel tubuh lalat buah terdapat delapan kromosom. Karena kromosomnya berpasang-pasangan, setiap sel tubuh terdiri atas empat pasang kromosom homolog. Adapun pada setiap sel tubuh manusia terdapat 46 buah kromosom atau 23 kromosom homolog berbeda dengan pasangan kromosom homolog lainnya. Jumlah macam kromosom disebut dengan ploidi (perangkat atau genom).

Karena berada dalam sel tubuh, kromosom tersebut berpasang-pasangan berarti terdiri atas dua set, maka disebut diploid = $2n$. Sebaliknya, pada sel gamet terdapat hanya satu perangkat atau satu set disebut haploid = n . Kadangkala dalam sel tubuh yang mengalami kelainan, misalnya karena kanker, jumlah kromosomnya lebih dari dua set, misalnya $3n$ = triploid, $4n$ = tetraploid, dan selebihnya disebut poliploid (lihat Gambar 3.14).



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.14 Monoploid dan Poliploid

B. Peranan DNA dan RNA dalam Pembentukan Kode Genetika

Pembentukan karakter seseorang berlangsung melalui reaksi-reaksi kimia yang kompleks. Reaksi kimia itu sendiri dibantu oleh enzim yang tersusun atas protein. Oleh karena itu, sintesis protein menentukan karakter dan diatur oleh gen. Dengan demikian, pertumbuhan karakter pada hakikatnya mengalami liku-liku yang kompleks dari sintesis protein.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh G.W. Beadle dan E.L. Tatum (1964) disimpulkan bahwa dalam sintesis protein, meskipun satu gen bekerja dengan teliti, bukannya tidak mungkin terjadi kesalahan pembentukan protein (enzim) hal ini bisa disebabkan oleh terjadinya perubahan basa Nitrogen pada DNA. Hal tersebut merupakan salah satu mekanisme terjadinya mutasi gen.

1. Sintesis Protein

Untuk sintesis protein diperlukan beberapa faktor, yaitu:

- a. bahan: asam amino (20 macam);
- b. pelaksana: RNA-d, RNA-t, RNA-r;
- c. enzim: RNA Polimerase;
- d. energi: ATP.

Adapun langkah-langkah sintesis protein adalah sebagai berikut.

a. Transkripsi

Bagian tertentu dari sebuah molekul DNA (sense) dalam inti ikatan hidrogennya lepas dan menjadi cetakan untuk RNA-d. RNA-d yang terbentuk merupakan salinan dari kode pada sense. Selanjutnya RNA-d meninggalkan inti menuju ke ribosom di dalam sitoplasma.

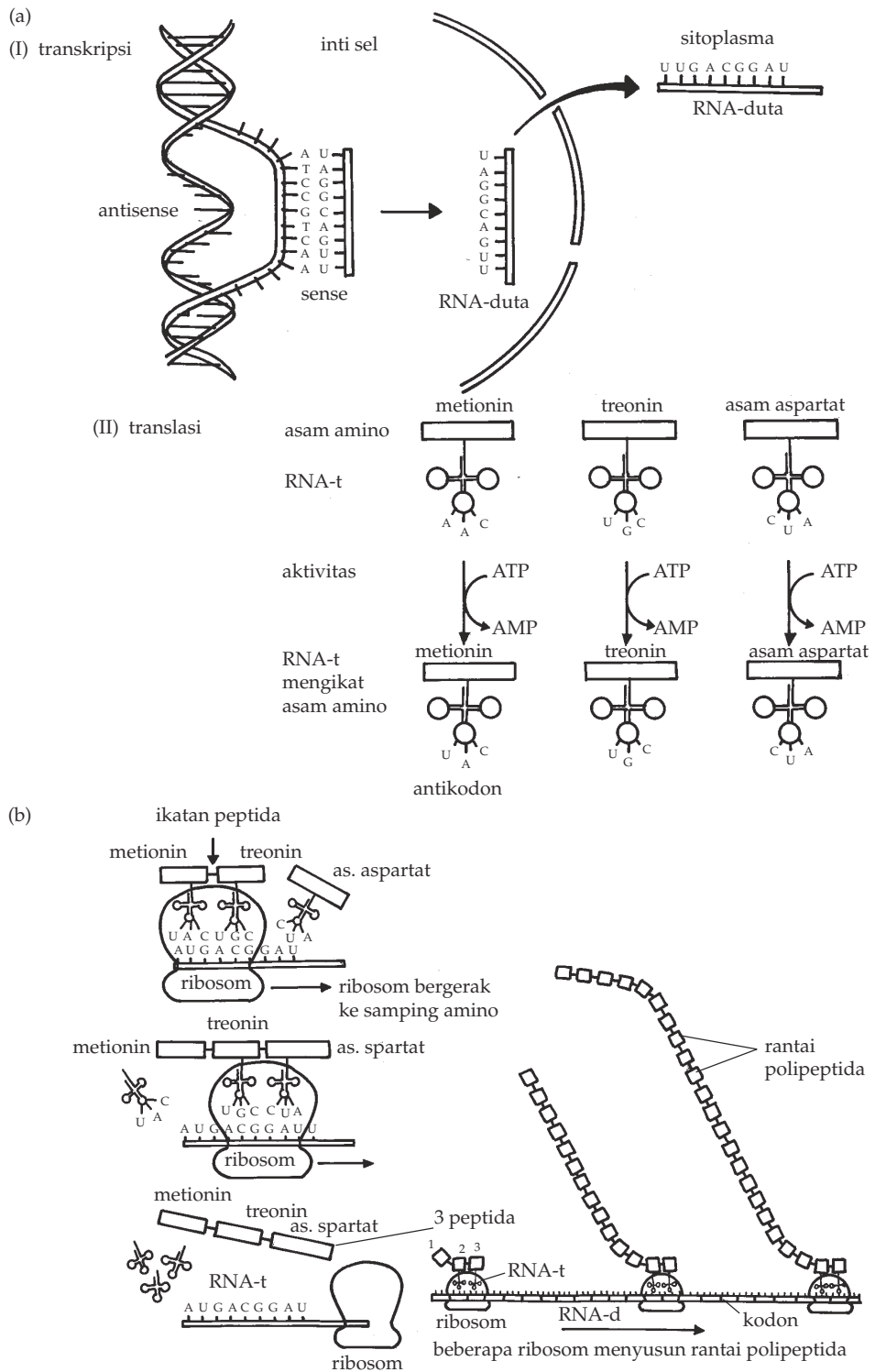
b. Translasi

Beberapa tahap pada proses translasi adalah sebagai berikut.

- 1) Di dalam sitoplasma terdapat asam-asam amino dan RNA-t. Tiap molekul RNA-t memiliki 3 basa nitrogen (antikodon) pada salah satu sisinya, yang menggambarkan jenis asam amino tertentu yang dapat terlihat pada salah satu sisi lainnya.
- 2) Setiap molekul RNA-t mengambil, mengikat asam amino yang sesuai dengan kodon, yang memerlukan energi dari ATP.
- 3) RNA-t membawa asam amino ke ribosom, 3 basanya berpasangan dengan 3 basa nitrogen pada RNA-d (antikodon berpasangan dengan kodon) yang sesuai.
- 4) Selanjutnya RNA-t yang lainnya juga datang membawa asam amino lainnya. Dua asam amino itu kemudian membentuk ikatan kimia bersama-sama.

c. Pembentukan Polipeptida

RNA-d bergerak memanjang dan bergeser 3 basa-3 basa. RNA-t pertama melepaskan diri dari DNA-d dan kembali ke sitoplasma. Sebuah RNA-t ketiga datang lagi dengan membawa asam amino lainnya lagi dan seterusnya. Proses ini berlangsung terus-menerus sampai sebuah rantai asam amino atau sebuah molekul polipeptida terbentuk. Jika ribosom sudah sampai ke ujung RNA-d, rantai protein telah lengkap dan akhirnya ribosom dan protein memisahkan diri dari RNA-d. Setelah tugasnya selesai, RNA-t kembali ke sitoplasma dan selanjutnya dapat dipergunakan kembali untuk sintesis protein berikutnya. Pembentukan ini sesuai dengan kode-kode pada RNA-d, yang pada dasarnya adalah salinan dari DNA dalam inti sel. Waktu yang diperlukan untuk merakit satu molekul hemoglobin diperkirakan satu menit. Untuk lebih jelasnya mengenai jalannya sintesis protein, perhatikan skema tahap sintesis protein pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Tahap-tahap sintesis

Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

2. Kode Genetika

Inti sel, antara lain mengandung asam nukleat, yaitu DNA dan RNA. Keduanya bertanggung jawab terhadap pembangunan protein dan mengontrol sifat-sifat keturunan. Tempat sintesis protein adalah di ribosom, sedangkan DNA terdapat dalam inti. Oleh karena itu, DNA tidak dapat melaksanakan fungsinya secara langsung, tetapi DNA memberikan instruksi kepada sel mengenai protein yang akan dibuatnya. DNA berperan sebagai pemberi perintah untuk menyusun protein, DNA akan membentuk senyawa lain untuk menyampaikan instruksinya ke ribosom berupa kode-kode yang merumuskan jenis protein apa yang akan dibuat. Untuk menyampaikan kode-kode tersebut, DNA membuat senyawa RNA yang dikenal dengan RNA-d.

Protein merupakan senyawa kimia organik yang terdiri atas rangkaian-rangkaian asam amino yang dihubungkan oleh ikatan polipeptida. Asam amino yang membentuk protein ada 20 macam. Senyawa DNA mengandung empat macam basa nitrogen. Keempat basa nitrogen tersebut akan membentuk kode-kode genetik pada DNA. Kode-kode genetik tersebut terdiri atas tiga buah basa nitrogen yang dapat mengodekan satu asam amino. Dengan pengodean tiga basa nitrogen untuk satu jenis asam amino diperoleh $4 \times 4 \times 4 = 64$ kode untuk 20 macam asam amino. Hal ini akan menyebabkan adanya satu jenis asam amino yang mempunyai lebih dari satu kode, sifat ini disebut “degenerate”.

Seorang ahli Biokimia, M.W. Nirenberg dan J.H. Matthaei dari Amerika Serikat, pada tahun 1960 mengadakan percobaan dan memecahkan masalah tentang kode genetika. Percobaan tersebut, antara lain dengan mencampurkan salah satu basa nitrogen dari RNA, yang terdiri atas poliurasil. Poliurasil tersebut kemudian dimasukkan ke dalam campuran beberapa asam amino sehingga terbentuk satu asam amino, yaitu fenilalanin. Dengan demikian, para ahli genetika menafsirkan kode genetik urasil-urasil (UUU) membentuk fenilalanin. Fenilalanin itu yang akan membentuk protein. Rangkaian basa nitrogen yang tiga-tiga terdapat pada senyawa DNA disebut kodogen. Rangkaian basa nitrogen yang tiga-tiga terdapat pada senyawa RNA-d disebut kodon (triplet) yang akan mengenali asam-asam amino yang harus diikatnya. Basa nitrogen yang tiga-tiga terdapat pada RNA-t disebut antikodon. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Antikodon

		Nukleotida kedua				
		U	C	A	G	
Nukleotida pertama	U	UUU } Fenil alanin (phe) UUC } UUA } Leusin (leu) UUG }	UCU } UCC } Serin (ser) UCA } UCG }	UAU } tirosin (tir) UAC } UAA } Stop UAG } Stop	UGU } Cistein (cis) UGC } UGA } Stop UGG } tripofan (trp)	U C A G
	C	CUU } CUC } Leusin (leu) CUA } CUG }	CUU } CCC } Prolin (prol) CCA } CCG }	CAU } Histidin (his) CAC } CAA } Glutamin (gln) CAG }	CGU } CGC } Arginin (arg) CGA } CGG }	U C A G
	A	AUU } AUC } Isoleusin (ile) AUA } AUG } Mebionin (met)	ACU } ACC } Threonin (thr) ACA } ACG }	AAU } Asparagin (asn) AAC } AAA } Lisin (lis) AAG }	AGU } Serin (ser) AGA } Arginin (arg) AGG }	U C A G
	G	GUU } GUC } Valin (val) GUA } GUG }	GCU } GCC } Alanin (ala) GCA } GCG }	GAU } asam aspartat (asp) GAC } GAA } asam glutamat (glu) GAG }	GGU } GGC } Glisin (gli) GGA } GGG }	U C A G

Sumber: *The Nature of Life*

Tugas 3.3

- Jika di dalam sel akan disusun protein yang terdiri atas asam amino: isoleusin – fenilalanin – valin – arginin – histidin – metionin – lisin – sistein – triptofan – prolin.
 - Bagaimana urutan basa nitrogen pada RNA-d?
 - Bagaimana urutan basa nitrogen pada RNA-t?
 - Bagaimana urutan basa nitrogen pada pasangan DNA yang melakukan sintesis protein?
 - Jika DNA tersebut mengadakan replikasi, bagaimana susunan basa nitrogennya?
- Jika urutan basa nitrogen pada rantai sense adalah: TGA – AGC – AAA – TAT – GCA – TTT – GTT – GGA.
 - Tentukan urutan basa nitrogen pada RNA-d.
 - Tentukan urutan basa nitrogen pada RNA-t.
 - Bagaimana urutan asam amino penyusun protein tersebut?

C. Kaitan Mitosis dan Meiosis dengan Hereditas

Selama sel mengalami pertumbuhan, volume protoplasma sel akan terus bertambah, sementara membran plasma tidak mengalami penambahan luas yang sebanding dengan penambahan isinya. Dalam keadaan demikian, diperlukan pembelahan sel yang akan mengurangi volume protoplasma dan memperluas permukaan membran sel. Sel yang akan membelah biasanya disebut sel induk, sedangkan sel-sel hasil pembelahan disebut sebagai sel anak.

1. Mitosis dan Meiosis

Pada organisme multiseluler terdapat dua macam sel, yaitu sel tubuh (sel somatis) dan sel kelamin (gamet). Setiap sel tubuh mempunyai sejumlah kromosom yang berpasangan atau $2n$. Sel yang mengandung kromosom $2n$ tersebut dinamakan sel diploid. Sebaliknya, kromosom pada sel kelamin tidak berpasang-pasangan atau n . Sel yang mengandung kromosom n tersebut adalah sel haploid. Sel-sel diploid dan sel-sel haploid tersebut dihasilkan melalui cara pembelahan sel yang berbeda, yaitu pembelahan mitosis dan pembelahan meiosis.

a. Pembelahan Mitosis

Pada pembelahan mitosis, setiap sel diploid, yaitu yang mengandung kromosom $2n$, akan menghasilkan dua sel anak yang juga diploid. Pembelahan mitosis terjadi pada sel-sel tubuh dan bertujuan memperbanyak sel-sel tersebut. Hal ini diperlukan pada pertumbuhan jaringan, penggantian jaringan yang rusak, dan pembiakan organisme secara tak kawin.

Proses pembelahan mitosis terdiri atas beberapa tahap pembelahan, yaitu profase, metafase, anafase, dan telofase. Setelah selesai satu proses pembelahan yang menghasilkan dua sel anak, maka sel tersebut mengalami interfase atau masa "istirahat" di antara dua proses pembelahan.

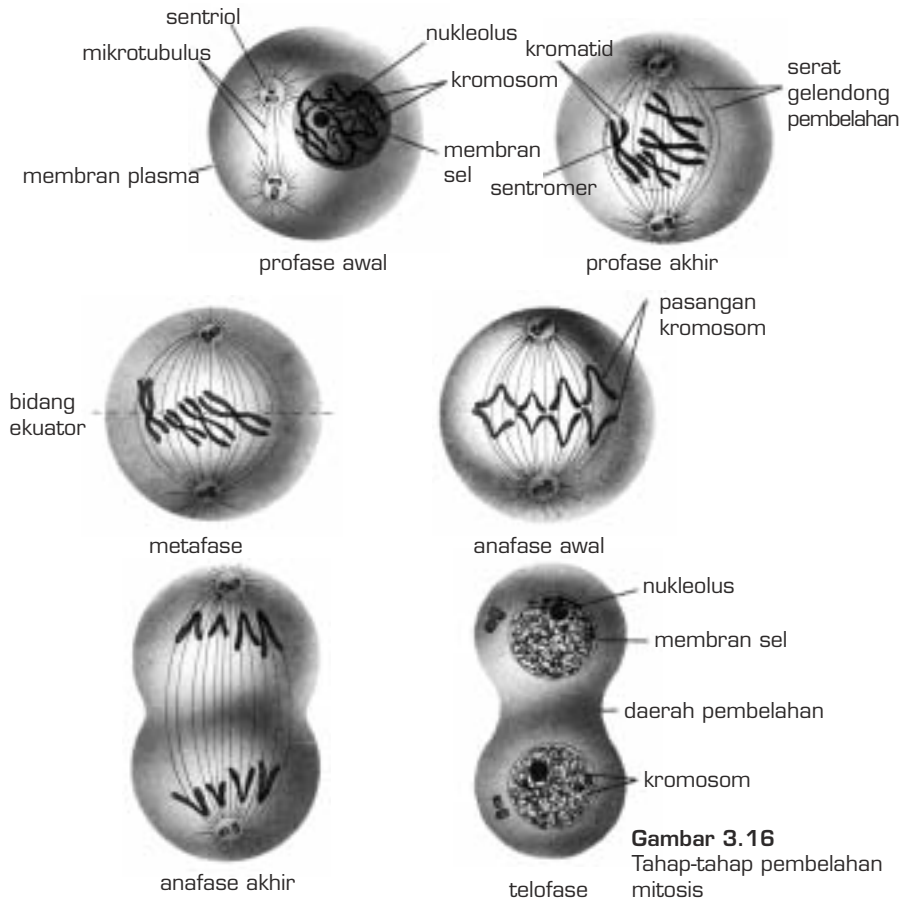
Pada masa interfase, sel anak akan mengalami pertumbuhan, sintesis DNA, protein, dan zat-zat lain, serta duplikasi kromosom. Tahap (fase) yang paling lama ini merupakan masa persiapan untuk pembelahan selanjutnya.

Tugas 3.4

Carilah informasi mengenai waktu yang diperlukan pada siklus sel dari suatu spesies, lalu buat dalam bentuk tabel.

Waktu yang diperlukan untuk proses pembelahan mitosis bergantung pada beberapa faktor, antara lain jenis organisme, jenis jaringan, suhu, dan faktor-faktor lingkungan lainnya.

Perubahan dari satu tahap ke tahap berikutnya pada pembelahan sel secara mitosis tidak terjadi secara jelas sehingga kerap kali sulit untuk menentukan waktu dimulai dan berakhirnya suatu tahap. Namun, pada setiap tahap terdapat ciri-ciri yang khas, perhatikan Gambar 3.16.



Gambar 3.16
Tahap-tahap pembelahan mitosis

Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

1) Profase

Pada tahap ini membran nukleus dan nukleolus melebur di dalam sitoplasma, sementara kromatin terpilin secara bertahap menjadi gulungan yang pendek dan tebal berupa kromosom. Setiap kromosom terdiri atas dua helai *kromatid* sebagai hasil duplikasi yang tetap saling berlekatan pada bagian yang disebut *sentromer*.

Setiap pasangan sentriol pada sel hewan bergerak menuju ke kutub-kutub sel yang berlawanan, diikuti dengan terbentuknya serat-serat gelendong pembelahan yang tersusun dari mikrotubulus. Pada sel tumbuhan tidak terdapat sentriol. Namun, serat-serat gelendong pembelahan tetap terbentuk di antara kedua kutub sel yang berlawanan tersebut.

2) *Metafase*

Kromosom bergerak ke bidang pembelahan (bidang ekuator) dan berjajar satu-satu di bidang tersebut. Kromosom ini bergantung pada serat gelendong melalui sentromernya masing-masing. Pengamatan tentang jumlah kromosom paling mudah dilakukan pada tahap ini karena kromosom memiliki ketebalan yang maksimal dan berada di tengah-tengah sel.

Pada akhir metafase, sentromer membelah dan setiap kromatid mendapatkan sentromernya masing-masing. Kedua kromatid yang berasal dari satu kromosom itu pun terpisah. Kini setiap kromatid dapat dikatakan sebagai kromosom yang baru.

3) *Anafase*

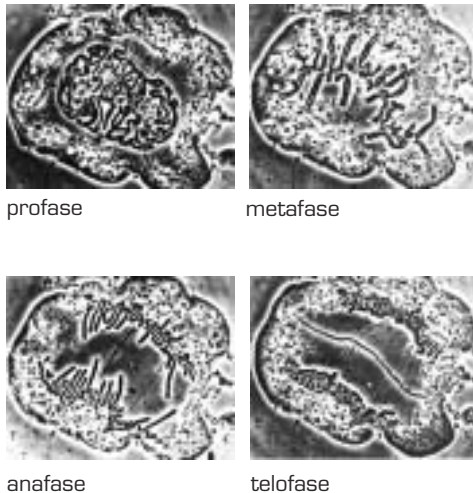
Pada anafase awal, setiap kromosom bergerak bertolak belakang terhadap pasangannya untuk menuju ke kutub masing-masing sambil tetap bergantung pada serat gelendong melalui sentromer. Pada tahap anafase akhir, seluruh kromosom mencapai kutub-kutub sel.

4) *Telofase*

Kromosom yang terpilin pendek melepaskan gulungannya menjadi kromatin yang panjang dan halus, sementara serat-serat gelendong melebur di dalam sitoplasma bersamaan dengan munculnya kembali nukleolus dan membran nukleus. Membran nukleus yang baru terbentuk mengelilingi kromatin, nukleolus, dan sejumlah sitoplasma sehingga dihasilkan nukleus baru.

Pada tahap ini terjadi peristiwa *sitokinesis*, yaitu terbaginya sel induk menjadi dua sel anak yang meliputi pembagian sitoplasma, ribosom, retikulum endoplasma, RNA, dan struktur-struktur lainnya.

Peristiwa sitokinesis pada sel tumbuhan dimulai dengan pembentukan lempeng pemisah yang tersusun dari selulosa di bidang ekuator. Lempeng tersebut akan membentuk dinding sel primer. Adapun sitokinesis pada sel hewan dimulai dengan terbentuknya lekukan di daerah ekuator yang makin lama semakin dalam dan akhirnya membagi sel menjadi dua sel anak. Untuk lebih jelasnya, proses pembelahan mitosis pada sel bawang dapat dilihat pada Gambar 3.17.

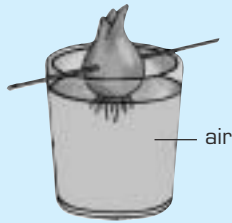


Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.17 Proses pembelahan mitosis pada sel bawang

KEGIATAN 3.2

Mempelajari perubahan yang terjadi pada setiap tahapan Mitosis



Mula-mula buatlah bahan untuk preparat \pm 3 hari, seperti gambar di samping.

- Potonglah akar-akar dari bawang merah \pm 1 cm, rendam dengan larutan asetokarmin pada kaca arloji, lalu panaskan dengan hati-hati sehingga zat warnanya meresap ke dalam akar bawang tersebut, angkatlah sebelum larutan itu mendidih.
- Potonglah dan pisahkan akar tersebut, letakkan pada setetes larutan asetokarmin yang telah disiapkan pada kaca objek, tutup dengan kaca penutup, tekan kaca penutup dengan menggulungkan pensil bulat di atas kaca penutup tersebut.
- Amati di bawah mikroskop dengan pembesaran 400 x, apa yang kamu lihat, kemudian jawab pertanyaan di bawah ini.
 - Fase apa saja yang dapat kamu temukan dari preparat tersebut?
 - Berdasarkan apa kamu bisa mengatakan nama dari fase-fase pembelahan?
 - Gambarkan fase-fase pembelahan yang kamu temukan!
 - Mengapa percobaan ini menggunakan akar bawang?

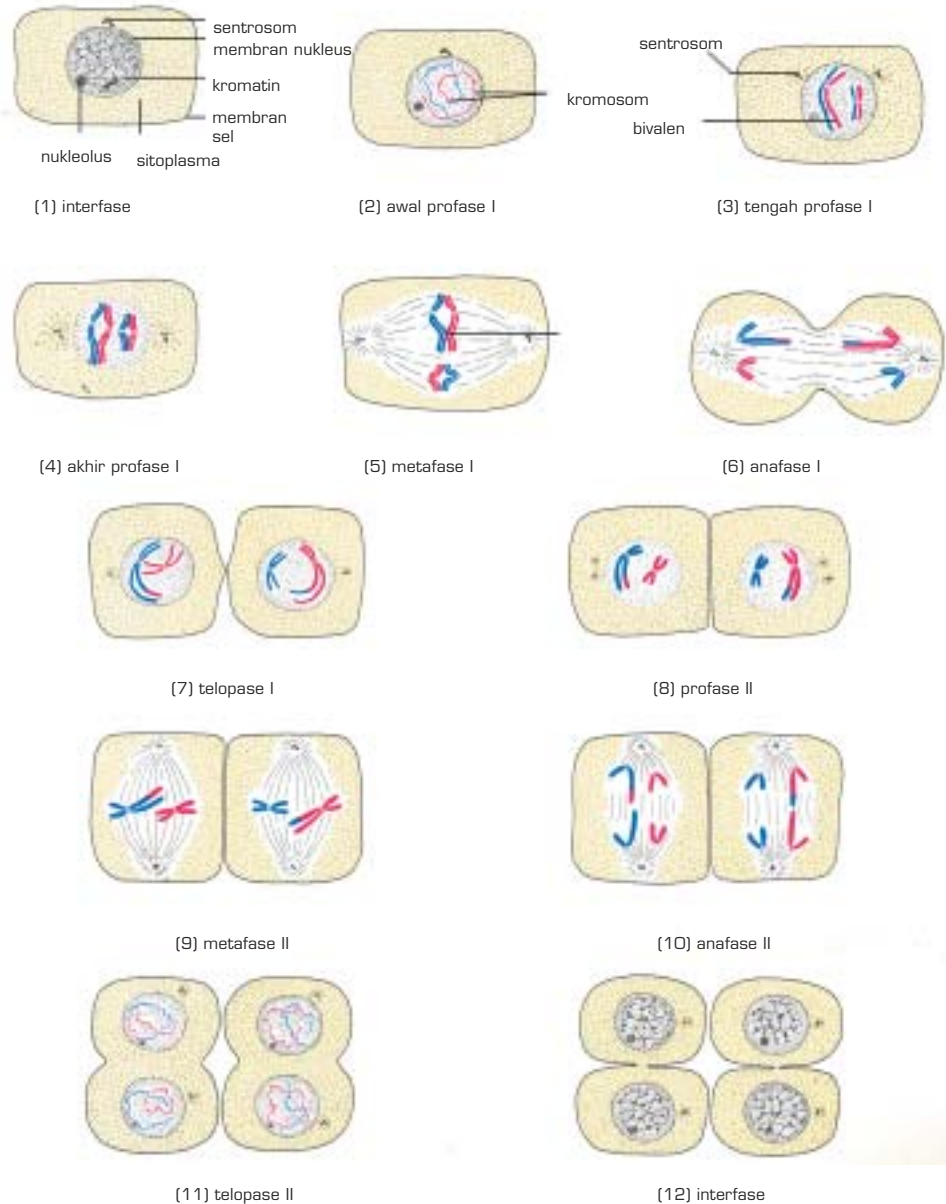
b. Pembelahan Meiosis

Pembelahan sel secara meiosis terjadi pada sel-sel reproduksi dengan tujuan menghasilkan sel-sel kelamin. Sel-sel reproduksi merupakan sel-sel diploid, sedangkan sel-sel kelamin yang dihasilkannya bersifat haploid karena hanya mengandung separuh dari jumlah kromosom sel induknya. Dengan demikian, pembelahan meiosis menyebabkan pengurangan jumlah kromosom sehingga disebut juga pembelahan *reduksi*.

Pengurangan jumlah kromosom tersebut bukan secara acak, melainkan kromosom-kromosom yang semula berpasangan akan kehilangan pasangan masing-masing setelah proses pembelahan meiosis. Umpamanya, pada sel reproduksi manusia terdapat 23 pasang kromosom (terdiri atas 46 kromosom), maka pada sel kelamin hanya terdapat 23 kromosom yang tidak berpasangan.

Proses pembelahan sel secara meiosis terdiri atas dua kali pembelahan berturut-turut, yaitu meiosis I dan II yang tidak diselingi interfase atau interfase yang singkat tanpa duplikasi kromosom, pada akhir pembelahan dihasilkan 4 sel haploid.

Tahap-tahap pembelahan tersebut adalah profase I, metafase I, anafase I, telofase I, profase II, metafase II, anafase II, dan telofase II, perhatikan Gambar 3.18.



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.18 Tahap-tahap pembelahan meiosis pada sel yang memiliki 2 pasang kromosom

1) Profase I

Pada fase ini secara bertahap membran inti melebur, sentrosom berpisah, dan serat gelendong terbentuk. Namun, ternyata profase pada meiosis lebih rumit daripada mitosis. Oleh karena itu, pada profase I terjadi beberapa tahap, yaitu *leptoten*, *zigoten*, *pakiten*, *diploten*, dan *diakinesis*.

a) Leptoten (gambar 2)

Pasangan kromosom masih berupa kromaton yang panjang dan tipis, tetapi masing-masing sudah mengalami duplikasi menjadi dua kromatid.

b) Zigoten (gambar 3)

Kromosom homolog mendekati pasangannya, lalu bersatu yang disebut bivalen.

c) Pakiten

Tiap kromosom pembentuk sinapsis membelah menjadi dua kromatid. Berarti pada tiap-tiap kromosom sekarang terdapat empat kromatid yang disebut tetrad.

d) Diploten

Pasangan kromatid yang berasal dari satu kromosom mulai menjauhi pasangan kromatid dari kromosom lainnya, kecuali pada kiasma atau titik-titik persilangan antara kromatid yang satu dan kromatid lain.

e) Diakinesis (gambar 4)

Pasangan kromatid yang semakin pendek dan menebal itu berpisah dari pasangan kromatid yang berasal dari kromosom lain.

2) Metafase I

Berbeda dengan metafase pada mitosis, di sini kromosom yang terdiri atas dua kromatid tidak berjajar satu-satu, tetapi saling berhadapan dengan kromosom pasangannya di bidang pembelahan.

3) Anafase I

Setiap kromosom bergerak menuju kutub yang terdekat melalui jalur serat gelendong, sementara sentromer pada tiap-tiap kromosom tetap bergantung pada serat gelendong pembelahan. Pada akhir fase ini semua kromosom telah berkumpul di kutubnya masing-masing.

4) Telofase I

Di kedua kutub sel terbentuk membran nukleus yang mengelilingi kromosom. Selanjutnya, sel terbelah dua dan masing-masing memperoleh satu nukleus. Akhir dari tahap ini ditandai dengan terbentuknya dua sel yang haploid.

5) *Profase II*

Seperti halnya pada profase I, membran inti kembali melebur dan sentriol berpisah menuju ke kutub sel yang berlawanan, sementara kromatid-kromatid penyusun kromosom masih melekat pada sentromernya.

6) *Metafase II*

Kromosom bergerak ke bidang pembelahan dan berjajar di bidang tersebut kemudian diikuti dengan pemisahan kromatid.

7) *Anafase II*

Kromatid bergerak meninggalkan bidang pembelahan menuju ke kutub yang terdekat sambil tetap bergantung pada serat gelendong melalui sentromernya masing-masing.

8) *Telofase II*

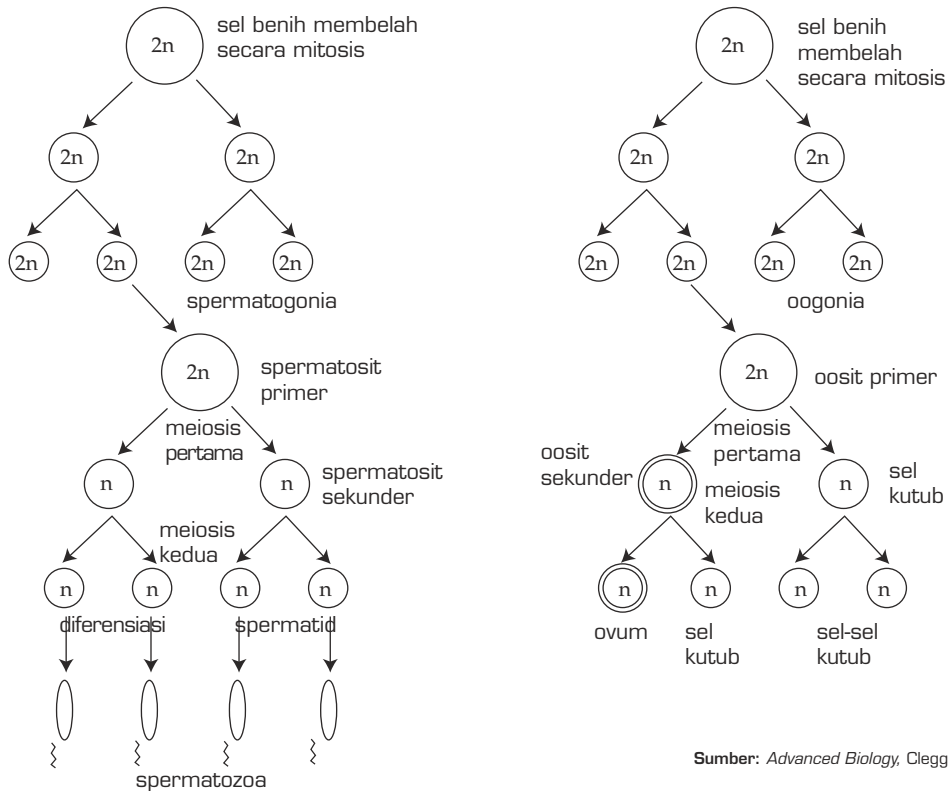
Setelah semua kromatid berkumpul di kedua kutub sel, lalu terbentuk membran nukleus di sekelilingnya diikuti dengan pembelahan setiap sel sehingga terjadilah 4 sel haploid baru.

Tugas 3.5

Setelah mempelajari pembelahan mitosis dan meiosis, buatlah tabel perbedaannya berdasarkan: tujuan, tempat terjadinya, jumlah pembelahan, jumlah kromosom, susunan gen, jumlah sel anak.

2. Gametogenesis

Gametogenesis atau proses pembentukan gamet terjadi melalui pembelahan sel-sel reproduksi secara meiosis di dalam alat reproduksi. Pada individu jantan, peristiwa yang menghasilkan gamet jantan (spermatozoa) ini disebut *spermatogenesis*, sedangkan pada individu betina disebut *oogenesis* yang akan menghasilkan gamet betina (ovum). Perbandingan spermatogenesis dan oogenesis dapat kamu lihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Perbandingan spermatogenesis dan oogenesis

a. Spermatogenesis



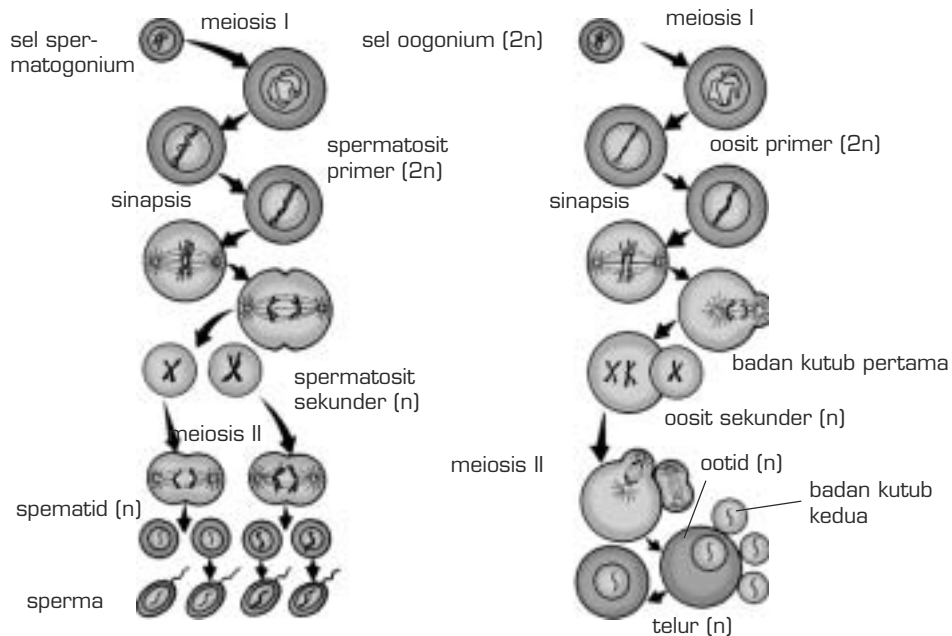
Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.20 Sperma terdiri atas kepala, leher, dan ekor

Proses pembentukan spermatozoa pada hewan jantan dimulai dengan pembelahan mitosis terhadap sel-sel *spermatogonia* (tunggal: spermatogonium) pada testis yang menghasilkan spermatosit primer diploid (2n). Bentuk sperma dapat dilihat pada Gambar 3.20.

Selanjutnya spermatosit primer mengalami pembelahan meiosis I yang menghasilkan dua sel *spermatosit sekunder* (n). Pada meiosis II setiap spermatosit sekunder membelah lagi dan menghasilkan dua *spermatid*. Dengan demikian, dari setiap spermatosit primer dihasilkan empat spermatid haploid (n), spermatid ini merupakan bakal sperma. Melalui proses spermatogenesis, spermatid akan berubah menjadi spermatozoa, yaitu sperma dewasa yang sempurna dengan penambahan ekor.

Setiap sperma terdiri atas kepala, leher, dan ekor. Bagian kepala terdiri atas inti dan akrosom berisi enzim protease yang berfungsi untuk meluruhkan dinding sel telur pada saat penetrasi, bagian leher banyak mengandung mitokondria sebagai penyuplai energi dan bagian ekor terdiri atas mikrotubula. Spermatozoa meninggalkan testis melalui duktus. Epididimis yang akan didiaminya selama ± 3 minggu sampai sperma dewasa. Perhatikan Gambar 3.21.



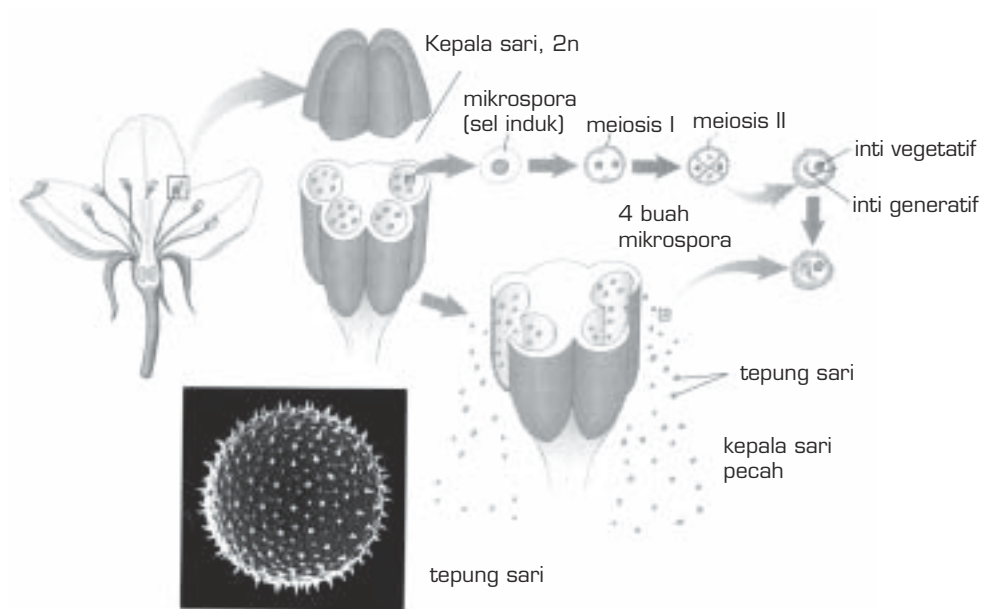
Sumber: *The Study of Biology*, Baker

Gambar 3.21 Pada spermatogenesis terjadi pembelahan meiosis yang akan menghasilkan 4 sperma (a). Oogenesis akan menghasilkan satu sel telur yang fertil dan tiga polosit yang steril (b)

Tugas 3.6

- Coba kamu tuliskan kembali urutan perjalanan sperma dari testis sampai keluar tubuh.
- Diskusikan dengan temanmu mengenai hal berikut ini. *Setiap 1 kali ejakulasi mengandung ± 5 ml sperma dan cairan sperma untuk seorang laki-laki dinyatakan tidak mandul jika setiap 1 ml cairan sperma itu mengandung berapa sperma? Mengapa harus sebanyak itu?*

Pada tumbuhan biji, proses pembentukan gamet jantan terjadi di dalam ruang serbuk sari yang terdapat pada kepala sari. Di dalam ruang serbuk sari tersebut terdapat *sel-sel induk mikrospora (mikrosporosit)* yang bersifat diploid. Setiap mikrosporosit membelah secara meiosis dan menghasilkan 4 *mikrospora* haploid yang masing-masing akan berkembang menjadi *serbuk sari*, perhatikan Gambar 3.22.



Sumber: *The Nature of Life*, Postlethwait

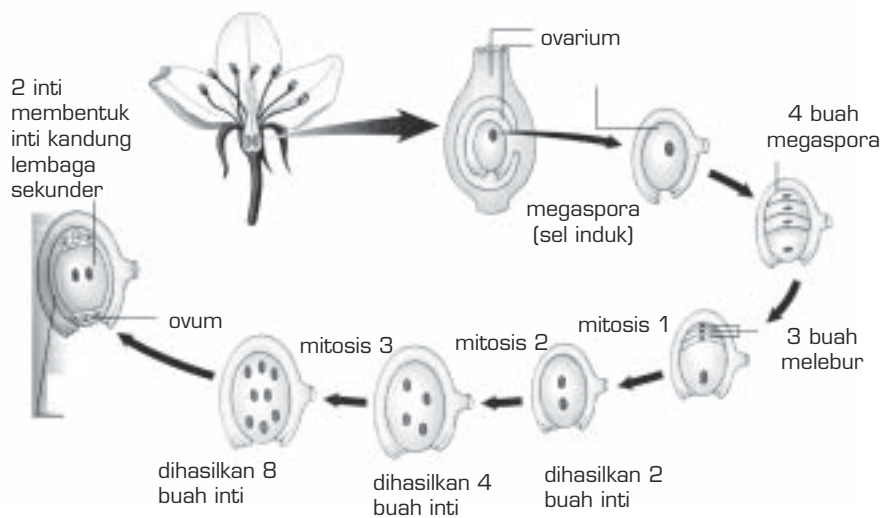
Gambar 3.22 Pembentukan tepung sari (Mikrosporogenesis)

Sel-sel haploid hasil pembelahan meiosis ini belum dapat berfungsi pada pembiakan generatif. Inti dari tiap mikrospora masih harus membelah secara mitosis menjadi dua inti. Inti pertama merupakan *inti vegetatif* yang berperan pada pembentukan *buluh serbuk sari*, sedangkan inti kedua adalah *inti generatif* yang akan membelah sekali lagi sehingga dihasilkan dua inti yang berperan sebagai *inti sperma* (gamet jantan).

b. Oogenesis

Proses pembentukan ovum pada hewan betina berasal dari sel-sel oogonia (tunggal: oogonium) yang terdapat di lapisan permukaan ovarium. Seperti halnya spermatogonia, sel-sel ini membelah secara mitosis menjadi oosit primer yang diploid.

Oosit primer mengalami pembelahan meiosis I. Pembelahan ini tidak membagi dua sitoplasma sama banyak sehingga kedua sel yang dihasilkannya tidak sama besar. Sel yang lebih besar adalah oosit sekunder, sedangkan sel yang kecil disebut sel kutub (polosit primer). Sel kutub ini akan menyusut lalu hilang atau membelah lagi menjadi dua sel kutub baru.



Sumber: *The Nature of Life*, Postlethwait

Gambar 3.23 Pembentukan gamet betina (Makrosporogenesis)

Pada meiosis II terjadi lagi pembagian sitoplasma yang tidak sama banyak sehingga oosit sekunder membelah menjadi dua sel baru yang tidak sama besar, yaitu *ootid* yang lebih besar dan *polosit sekunder* yang kecil. Perkembangan ootid selanjutnya adalah menjadi ovum atau sel telur, sedangkan polosit akan menyusut. Dengan demikian, pada oogenesis dihasilkan 1 ovum dan 3 polosit.

Proses pembentukan gamet betina pada tumbuhan biji berlangsung pada *kantung embrio* (gametofit betina) yang terdapat di dalam bakal biji (ovula). Di dalam kantung embrio itu terdapat *sel induk megaspora* (megasporosit) yang bersifat diploid, perhatikan Gambar 3.23.

Megasporosit membelah secara meiosis menjadi empat megaspora yang haploid. Tiga di antaranya menyusut, sedangkan sisanya yang satu akan membesar, tetapi belum dapat melaksanakan fungsinya pada pembiakan generatif karena harus mengalami perkembangan selanjutnya.

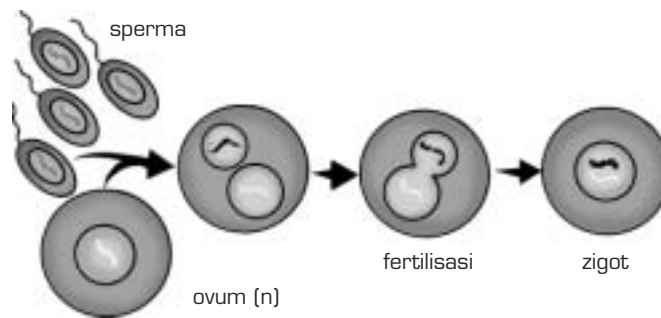
Sel megaspora mengalami tiga kali pembelahan inti secara mitosis tanpa diikuti pembagian sitoplasma. Pembelahan inti ini menghasilkan 8 inti haploid yang terdiri atas tiga *antipoda*, dua inti bergabung menjadi satu inti kutub, dua *sinergid*, dan satu *inti telur* (ovum).

Gamet, yaitu sel kelamin yang sudah matang merupakan mata rantai penghubung antara induk dan keturunannya secara seksual. Melalui gamet inilah diwariskan sifat-sifat menurun suatu organisme kepada generasi berikutnya.

Ilmuwan yang mula-mula mendalami perihal pewarisan sifat menurun ini adalah W. S. Sutton (1920), seorang ahli genetika Amerika. Pendapat Sutton lebih lanjut tentang pewarisan sifat ini adalah sebagai berikut.

1. Jumlah kromosom yang dikandung oleh sperma maupun ovum adalah sama, yaitu masing-masing separuh dari jumlah kromosom yang dikandung oleh sel-sel tubuh.
2. Organisme baru sebagai hasil peleburan ovum dan sperma mengandung 2 perangkat kromosom ($2n$) pada setiap sel-sel tubuhnya.
3. Dalam meiosis, kedua perangkat kromosom memisah secara bebas.
4. Bentuk dan identitas setiap kromosom adalah tetap sekalipun melalui proses mitosis maupun meiosis. Begitu pula masing-masing gen sebagai kesatuan faktor menurun adalah tetap.

Jadi, fertilisasi (peleburan sperma dan ovum merupakan mekanisme untuk memperbaiki sifat-sifat individu. Perbaikan sifat ini terjadi karena adanya kombinasi gen-gen yang berasal dari ovum dan sperma, perhatikan Gambar 3.24.



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.24 Setiap kromosom yang haploid melebur menjadi zigot dengan jumlah kromosom yang diploid

D. Prinsip Hereditas dan Mekanisme Pewarisan Sifat

Perhatikan ciri-ciri yang kamu miliki, kemudian bandingkan dengan ciri-ciri yang dimiliki saudaramu. Adakah perbedaan? Adakah persamaan? Mengapa hal ini terjadi? Bagaimanakah kamu dapat menghubungkan antara gen dengan sifat-sifat tersebut?

Petani tanaman hias sudah sejak lama membudidayakan tanamannya sedemikian rupa sehingga dia menghasilkan varietas-varietas baru. Pembudidayaan tersebut dilakukan dengan cara menyilang-nyilangkan tanaman yang berbeda jenisnya, misalnya mawar bunga merah disilangkan

dengan mawar bunga putih, hasilnya adalah mawar merah muda; mangga buah besar, rasa asam disilangkan dengan mangga buah kecil, rasa manis, diharapkan hasilnya adalah mangga buah besar, rasanya manis.

Bagaimana sebenarnya mekanisme pewarisan sifat tersebut terjadi? Selanjutnya kita akan mempelajari bagaimana suatu sifat dari induk dapat ditemukan pada anaknya.

1. Hereditas menurut Mendel

Gamet, yaitu sel kelamin yang sudah matang. Dengan kata lain gamet merupakan mata rantai penghubung antara induk dan keturunannya secara seksual. Melalui gamet ini diwariskan sifat-sifat menurun suatu organisme kepada generasi berikutnya. Di bawah ini adalah hipotesis Mendel mengenai penurunan sifat.

- Setiap sifat dikendalikan oleh satu pasang faktor keturunan (yang sekarang kita kenal dengan gen), yaitu satu dari individu jantan dan satu dari individu betina.
- Setiap faktor keturunan menunjukkan bentuk alternatif sesamanya, misalnya tinggi atau rendah, bulat atau keriput, merah atau putih. Kedua bentuk alternatif tersebut disebut alel.
- Jika pasangan faktor itu terdapat bersama-sama dalam satu tubuh suatu individu, faktor dominan akan menutup faktor resesif, misalnya genotipe individu Bb dengan gen B untuk bulat dominan terhadap gen b untuk keriput, maka fenotipe untuk individu tersebut adalah bulat, genotipenya bersifat heterozigot.
- Pada waktu pembentukan gamet (meiosis), setiap alel berpisah, misalnya genotipe individu Bb akan menghasilkan gamet yang mengandung gen B dan gamet yang mengandung gen b. Jadi, akan terbentuk dua macam gamet.
- Individu yang murni mempunyai pasangan sifat (alel) yang sama, yaitu dominan saja atau resesif saja, misalnya untuk BB pasangan sifat dominan atau bb untuk pasangan resesif. Genotipe individu tersebut homozigot BB disebut homozigot dominan dan bb disebut homozigot resesif.

Dari hipotesis-hipotesis itu, Mendel dapat mengembangkan beberapa hukum. Ada dua hukum yang terkenal, yaitu Hukum Mendel I dan Hukum Mendel II.

- Hukum Mendel I atau hukum segregasi dapat dibuktikan dengan persilangan monohibrid (persilangan dengan satu sifat beda).
- Hukum Mendel II atau hukum pengelompokan secara bebas dapat dibuktikan dengan persilangan dihibrid (persilangan dengan dua sifat beda). Hal ini berlaku untuk semua makhluk hidup baik hewan, tumbuhan, maupun manusia.

a. Persilangan Monohybrid

Hukum Mendel I: Hukum Segregasi atau pemisahan secara bebas. Pada pembentukan gamet, gen yang merupakan pasangan akan disegregasikan ke dalam sel anak. Untuk memahami hukum Mendel I, marilah kita pelajari bagan persilangan monohybrid di bawah ini.

- 1) Dominansi penuh: gen dominan menutup penuh ekspresi gen dari gen resesif

Induk (P_1) : **BB** x bb genotipe
 bulat keriput fenotipe

Macam gamet : **B** b

Keturunan 1 (F_1) : **Bb**
 bulat

Induk (P_2) : **Bb** x **Bb** genotipe
 bulat bulat fenotipe

Macam gamet : **B** dan b **B** dan b

Keturunan 2 (F_2) :

♀ \ ♂	B	b
B	BB	Bb
b	Bb	bb

Macam genotipe: 3 macam, $BB : Bb : bb = 1 : 2 : 1$

Macam fenotipe: 2 macam, bulat : keriput = 3 : 1

Dari bagan tersebut terlihat bahwa peristiwa terbentuknya keturunan berbiji bulat disebabkan oleh hal-hal berikut.

- a) Pada waktu gamet betina (sel telur), alel-alel **BB** memisah menjadi **B** dan **B** sehingga dalam sel gamet pada tanaman biji bulat hanya mengandung satu macam alel, yaitu **B**, sedangkan tanaman jantan (biji keriput) bersifat homozigot resesif (**bb**). Alel ini memisah menjadi **b** dan **b** pada waktu pembentukan gamet jantan sehingga gamet jantan hanya mempunyai satu macam alel, yaitu **b**. Hal ini membentuk keturunan dengan komposisi gen **Bb** (heterozigot). Karena gen **B** bersifat dominan, fenotipe yang tampak adalah bulat.
- b) Keturunan F_2 menghasilkan biji bulat dan biji keriput dengan perbandingan 3 : 1. Hal ini disebabkan kedua induk (**bb**) juga memisahkan alelnya secara bebas sewaktu pembentukan gamet (**b** dan **b**) sehingga keturunan yang dihasilkan memiliki genotipe **BB**, **Bb**, dan **bb** seperti tampak pada bagan.

2) Intermediet: gen dominan tidak mampu menutupi ekspresi alel resesif secara sempurna atau disebut semidominan atau kodominan.

Induk (P_1) : **MM** x mm genotipe
merah putih fenotipe

Macam gamet : **M** m

Keturunan 1 (F_1) **Mm**
merah muda

Induk (P_2) : **Mm** x **Mm** genotipe
merah muda merah muda fenotipe

Macam gamet : **M** dan m **M** dan m

Keturunan 2 (F_2) :

♀ \ ♂	M	m
M	MM	Mm
m	Mm	mm

Perbandingan genotipe : MM : Mm : mm
1 : 2 : 1

Perbandingan fenotipe : Merah : merah muda : putih
1 : 2 : 1

Tugas 3.7

Apabila petani buah mendapati kasus intermediet pada hasil panennya, bagaimana pendapatmu? Menguntungkan atau merugikan? Jelaskan.

b. Persilangan dihibrid

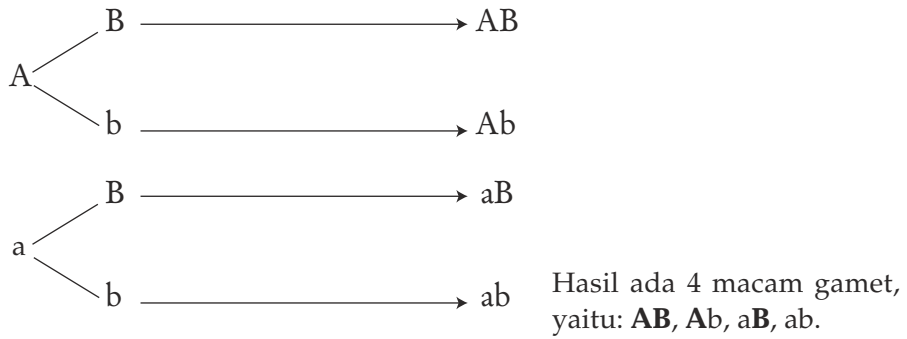
Mendel II: Hukum pemisahan bebas

Jika dua individu berbeda satu dengan yang lain dalam dua pasang sifat atau lebih, diturunkannya sifat yang sepasang tak bergantung pada pasangan sifat yang lain. Pembuktian hukum ini dipakai pada penyilangan dengan 2 sifat beda (dihibrid) atau penyilangan dengan banyak sifat beda (polihybrid). Makin banyak sifat beda makin banyak pula kemungkinan kombinasi gennya. Sebagai contoh ialah adanya dua pasang gen Aa dan Bb yang terpisah pada dua kromosom yang berbeda.

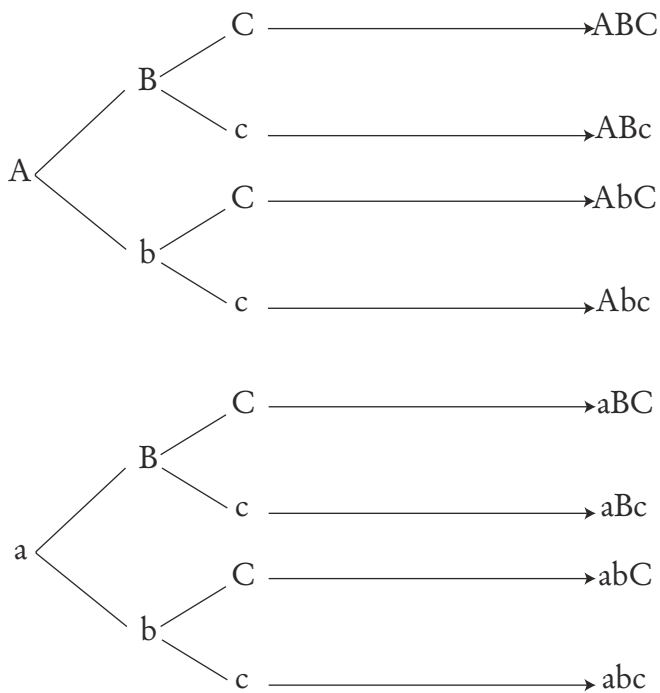
Pada waktu meiosis tepatnya pada anafase, kromosom-kromosom homolog akan saling berjauhan, berpisah, dan berpindah pada kutub yang berbeda. Begitu pula halnya yang terjadi pada kromosom-kromosom yang mengandung gen Aa dan Bb. Kromosom yang mengandung gen A, akan berpisah dengan kromosom yang mengandung gen a, kromosom yang mengandung gen B akan berpisah dengan kromosom yang mengandung gen b.

Dengan demikian, pada pembentukan gamet akan terjadi empat kemungkinan kombinasi gen yang berpasangan secara bebas, yaitu AB, Ab, aB, ab. Cara menentukan macam gamet adalah sebagai berikut.

- 1) Untuk individu dengan dua sifat beda, misalnya Aa Bb

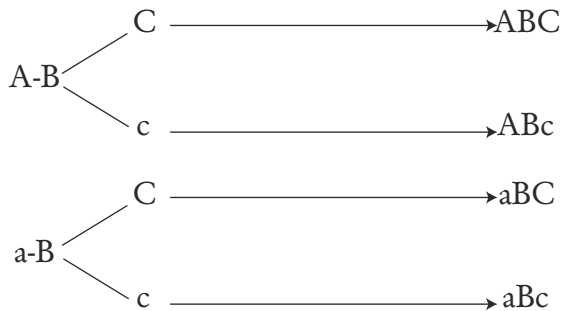


- 2) Untuk individu dengan tiga sifat beda, misalnya Aa Bb Cc



Dihasilkan delapan macam gamet.

3) Untuk individu bergenotipe **Aa BB Cc**



Dihasilkan empat macam gamet

Jumlah macam gamet dapat diketahui dengan rumus 2^n , n adalah jumlah kombinasi gen yang heterozigot. Misalnya:

genotipe Aa macam gametnya $2^1 = 2$ macam

genotipe Aa Bb macam gametnya $2^2 = 4$ macam

genotipe Aa Bb Cc macam gametnya $2^3 = 8$ macam

genotipe Aa BB CC Dd walaupun kombinasi gennya ada 4 pasang, tetapi hanya mempunyai dua kombinasi gen yang heterozigot, maka macam gametnya adalah $2^2 = 4$ macam, yaitu ABCD, ABCd, aBCD, dan aBCd.

Persilangan Dihibrid (dua sifat beda).

- Gen untuk biji bulat (B) bersifat dominan terhadap gen untuk biji kisut (b).
- Gen untuk biji warna kuning (K) dominan terhadap gen untuk warna hijau (k).
- Parental (P) bergenotipe homozigot dominan (BB KK) dan homozigot resesif (bb kk), yang masing-masing berfenotipe bulat-kuning dan kisut-hijau
- Filial I (F_1) semua berfenotipe bulat kuning dan bergenotipe BbKk

P_1 : **BB KK** × bb kk genotipe
 bulat kuning kisut hijau fenotipe
 Gamet : **BK** bk

F_1 : **Bb Kk**
 bulat kuning

P_2 : **Bb Kk** × **Bb Kk** genotipe
 bulat kuning bulat kuning fenotipe

Gamet : BK BK
 Bk Bk
 bK bK
 bk bk

F₂ :

♀ \ ♂	BK	Bk	bK	bk
BK	BB KK 1	BB Kk 2	Bb KK 3	Bb Kk 4
Bk	BB Kk 5	BB kk 6	Bb Kk 7	Bb kk 8
bK	Bb KK 9	Bb Kk 10	bb KK 11	bb Kk 12
bk	Bb Kk 13	Bb kk 14	bb Kk 15	bb kk 16

- Macam fenotipe : 4 macam
- 1) bulat kuning : 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 13.
 - 2) bulat hijau : 6, 8, 14.
 - 3) kisut kuning : 11, 12, 15
 - 4) kisut hijau : 16

Rasio fenotipe:

bulat kuning : bulat hijau : kisut kuning : kisut hijau
 9 : 3 : 3 : 1

Macam kombinasi genotipe : 9 macam

BB KK, BB Kk, BB kk, Bb KK, Bb Kk, Bb kk, bb KK, bb Kk, bb kk.

Tugas 3.8

Jika tanaman batang tinggi (T), berbunga kuning (K) dan letak bunganya di ketiak (A). Sifat-sifat tersebut masing-masing dominan terhadap batang pendek (t), bunga putih (k) dan letak bunga di ujung (a). Kalau tanaman heterozigot sempurna disilangkan sesamanya, tentukan macam fenotipe dan genotipe keturunannya.

2. Penyimpangan Semu Hukum Mendel

Dalam percobaan-percobaan genetika, para peneliti sering menemukan rasio fenotipe yang ganjil, seakan-akan tidak lagi mengikuti hukum-hukum Mendel. Misalnya, pada perkawinan antara dua individu dengan 2 sifat beda,

ternyata rasio fenotipe F_2 tidak selalu 9 : 3 : 3 : 1. Namun, sering dijumpai perbandingan-perbandingan 9 : 7 ; 12 : 3 : 1 ; 15 : 1 ; 9 : 3 : 4; dan lain-lain. Jika kita teliti betul-betul angka-angka perbandingan di atas, ternyata juga merupakan penggabungan angka-angka perbandingan Mendel; $9 : (3 + 3 + 1) = 9 : 7$; $(9 + 3) : 3 : 1 = 12 : 3 : 1$; $(9+3+3) : 1 = 15 : 1$; dan $(9 : 3 : (3+1)) = 9 : 3 : 4$ dan seterusnya. Oleh sebab itu, disebut penyimpangan semu karena sebenarnya masih mengikuti Hukum Mendel.

Penyimpangan semu ini terjadi karena adanya 2 pasang gen atau lebih saling memengaruhi dalam memberikan fenotipe pada suatu individu. Peristiwa pengaruh-memengaruhi antara 2 pasang gen atau lebih disebut **interaksi gen**. Perbedaan perubahan rasio fenotipe bergantung pada macam interaksi gennya.

Interaksi gen ada 4 macam, yaitu:

- a. komplementer,
- b. kriptomeri,
- c. epistasis-hipostasis, dan
- d. polimeri.

a. Komplementer

Komplementer adalah peristiwa dua gen dominan saling memengaruhi atau melengkapi dalam mengekspresikan suatu sifat. Misalnya, ekspresi sifat warna biji jagung, menurut E.M. East dan H.K. Hayes (1913) adalah hasil interaksi 2 gen dominan C dan R. Jika C terdapat bersama-sama R, akan mengekspresikan warna pada kulit biji jagung. Jika C atau R berdiri sendiri atau sama sekali tidak ada, tidak terbentuk pewarnaan pada kulit biji jagung.

- C** – gen penumbuh bahan mentah pigmen.
- c** – gen tidak mampu menumbuhkan bahan mentah pigmen.
- R** – gen penumbuh enzim pigmentasi kulit.
- r** – gen tidak mampu menumbuhkan enzim pigmentasi kulit.

P : **CCRR** $\xleftarrow{\hspace{3em}}$ X $\xrightarrow{\hspace{3em}}$ ccrr
berwarna tidak berwarna

CcRr
(berwarna)

F_2 : $F_1 \times F_1$, sebagai berikut.

1-CC	—	1-RR	—	1-CCRR	berwarna
		2-Rr	—	2-CCRr	berwarna
		1-rr	—	1-CCrr	tidak berwarna

Turunan I (F_1) : **AaBb**
Ungu

Gamet F_1 : **AB, Ab, aB** dan **ab**

Turunan II (F_2) : $F_1 \times F_1$

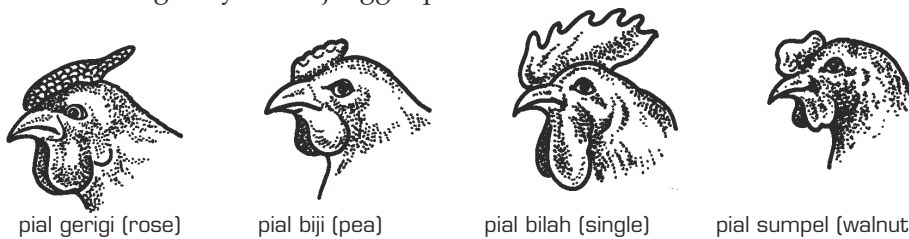
1 AABB	1 AAbb	1 aaBB	1 aabb
2 AABb	2 Aabb	2 aaBb	
2 AaBB			
4 AaBb			
9 ungu	3 merah	3 putih	1 putih

Rasio fenotipe F_2 : ungu : merah : putih = 9 : 3 : 4

Kriptomeri sesungguhnya baru dipecahkan secara genetis pada tahun 1906 oleh William Bateson dan R.C Punnet pada karakter jengger ayam.

Ada 4 macam bentuk jengger ayam, yaitu rose, single, pea, dan walnut. (Gambar 3.25)

- 1) Rose (mawar/gerigi) terdapat pada ayam Wyandotte.
- 2) Single (tunggal/bilah) terdapat pada ayam Leghorn.
- 3) Pea (kacang/biji) terdapat pada ayam Brahma.
- 4) Walnut (sumpel) terdapat pada ayam hasil silangan dari ayam berjengger rose dengan ayam berjengger pea.



Gambar 3.25 Macam-macam pial pada ayam

Sumber: *Biology*, Prentice-Hall

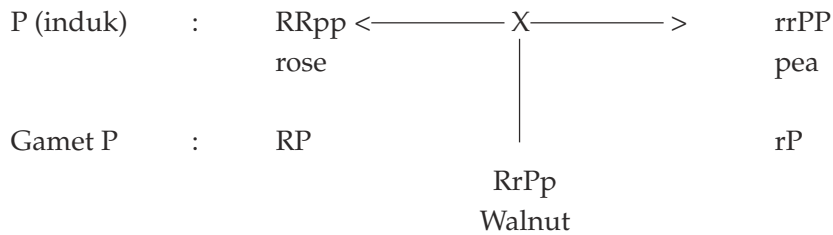
Jika ayam berpial/jengger mawar homozigot disilangkan dengan ayam berpial biji homozigot, pada F_1 karakter jengger kedua induk (P) hilang atau tersembunyi (kriptos), muncul karakter jengger baru, yaitu walnut (sumpel). Bagaimana F_2 -nya?

Ayam berpial rose bergenotipe : **RRpp** atau **Rrpp**

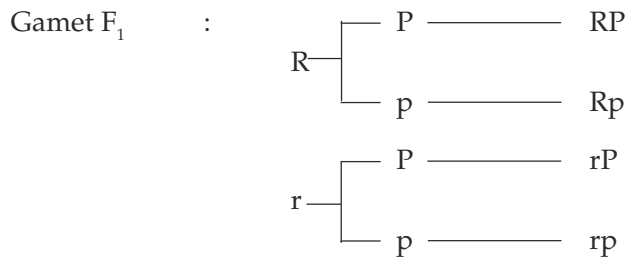
Ayam berpial pea bergenotipe : **rrPP** atau **rrPp**

Ayam berpial walnut bergenotipe : **RRPP** atau **RRPp** atau **RrPP** atau **RrPp**.

Ayam berpial single bergenotipe : **rrpp**



F₂ : F₁ X F₁



Hasil F₂:

♀ \ ♂	RP	Rp	rP	rp
RP	RRPP	RRPp	RrPP	RrPp
Rp	RRPp	RRpp	RrPp	Rrpp
rP	RrPP	RrPp	rrPP	rrPp
rp	RrPp	Rrpp	rrPp	rrpp

Cara lain:

1 RRPP	1 RRpp	1rrPP	1rrpp
2 RrPP	2 Rrpp	2 rrPp	
3 RRPp			
4 RrPp			
9 walnut	3 rose	3 pea	1 bilah

Rasio fenotipe : Walnut : Rose : Pea : bilah = 9 : 3 : 3 : 1

Penyimpangan semu Hukum Mendel bukan terletak pada rasio fenotipenya. Akan tetapi, penyimpangan terjadi pada:

- 1) fenotipe F₁ tidak sama dengan kedua induknya, baik induk jantan maupun induk betinanya;
- 2) F₂ menghasilkan fenotipe baru (tidak sama dengan P ataupun F₁), yaitu ayam berpial bilah (single).

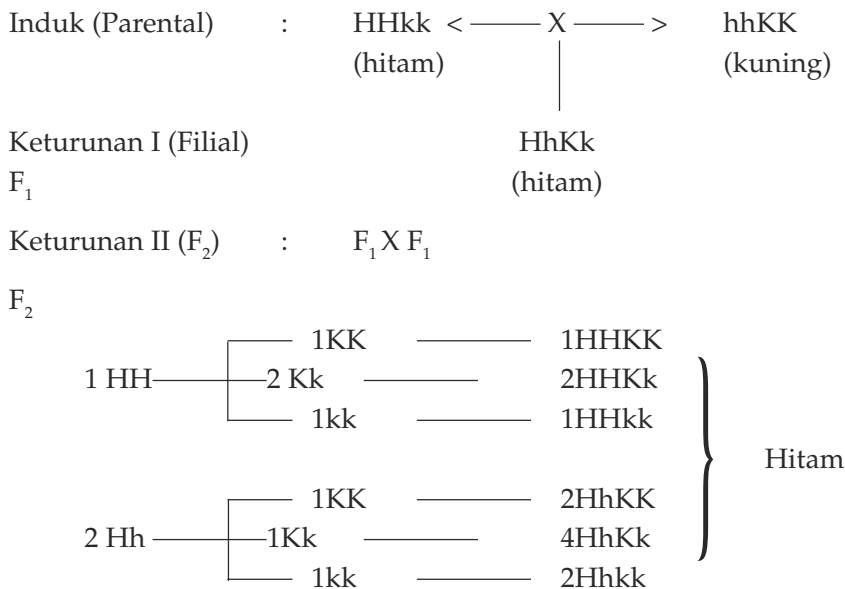
c. Epistasis dan Hipostasis

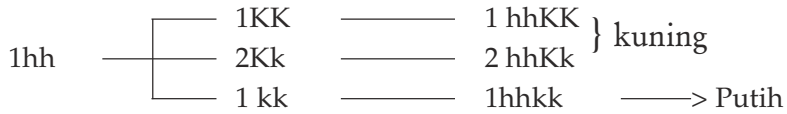
Peristiwa epistasis dan hipostasis pertama kali ditemukan oleh E.W. Sinnott pada sifat warna buah labu (*Cucurbita pepo*). Epistasis-hipostasis adalah peristiwa dengan dua faktor yang bukan pasangan alelnya dapat memengaruhi bagian yang sama dari suatu organisme. Namun, pengaruh faktor yang satu menutup ekspresi faktor lainnya.

Sifat yang menutup disebut *epistasis* dan yang ditutup disebut *hipostasis*. Jika faktor yang menutup adalah gen dominan, disebut *epistasis dominan*. Umpamanya gen A menutup ekspresi gen B dan b. Jika faktor yang menutup adalah gen resesif, disebut *epistasis resesif*. Umpamanya gen aa epistasis terhadap gen B dan b.

Adanya bermacam-macam bentuk epistasis ini menyebabkan pula modifikasi rasio fenotipe yang bermacam-macam pada F_2 . Contoh epistasis dominan dapat dilihat pada tanaman sejenis gandum. Pada tanaman sejenis gandum, faktor dominan H (hitam) epistasis terhadap faktor dominan K (kuning). Jadi, faktor K bersifat hipostasis, ekspresinya tertutup, dan tidak muncul jika terdapat bersama-sama dengan faktor H.

Pada penyilangan gandum berkulit biji hitam dengan gandum berkulit biji kuning, ternyata semua gandum pada F_1 berkulit biji hitam. Bagaimana F_2 -nya? Kamu tentu menduga bahwa fenotipe F_2 adalah hitam dan kuning dengan rasio 3 : 1, seperti pada penyilangan monohibrid. Ternyata tidak demikian, pada F_2 dihasilkan gandum berkulit biji : hitam, kuning, dan putih dengan rasio 12 : 3 : 1 Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.



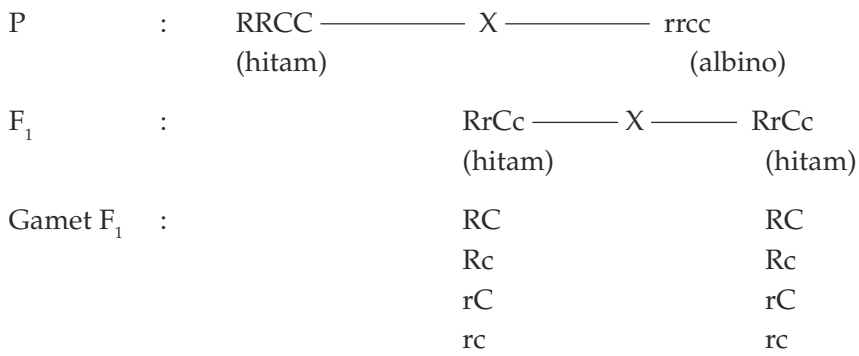


Rasio fenotipe hitam : kuning : putih = 12 : 3 : 1

Contoh Epistasis resesif:

Pada tikus, warna bulu yang hitam dikendalikan oleh gen R dan C bersama-sama, sedangkan rr dan C menyebabkan warna krem. Jika ada gen cc, tikus itu menjadi albino.

Perkawinan antara tikus hitam homozigot dan tikus albino, menghasilkan F₁ semua hitam. Perkawinan antar-F₁ menghasilkan F₂ hitam, krem, dan albino dengan perbandingan 9 : 3 : 4.



F₂ :

♀ \ ♂	RC	Rc	rC	rc
RC	RRCC (hitam)	RRCc (hitam)	RrCC (hitam)	RrCc (hitam)
Rc	RRCc (hitam)	RRcc (albino)	RrCc (hitam)	Rrcc (albino)
rC	RrCC (hitam)	RrCc (hitam)	rrCC (krem)	rrCc (krem)
rc	RrCc (hitam)	Rrcc (albino)	rrCc (krem)	rrcc (albino)

Rasio fenotipe hitam : krem : albino = 9 : 3 : 4

d. Polimeri

Polimeri adalah peristiwa dengan beberapa sifat beda yang berdiri sendiri memengaruhi bagian yang sama dari suatu individu. Karakter polimeri pertama kali diperkenalkan oleh H. Nilson-Ehle pada tahun 1913 di Swedia. Peristiwa polimeri ini ditemukan pada tanaman gandum. Pada tahun yang sama di Amerika, R.A. Emerson dan E.M. East melakukan percobaan polimeri pada tanaman jagung, sedangkan polimeri pada manusia pertama kali diperkenalkan oleh Davenport pada karakter pigmentasi kulit.

Contoh polimeri:

Pada penyilangan antara gandum berbiji merah dan gandum berbiji putih, dihasilkan F_1 semua gandum berbiji merah. Namun, derajat kemerahannya berbeda dengan induknya. Selanjutnya dilakukan penyilangan antar- F_1 . Hasilnya F_2 terdapat dua macam warna biji merah dan putih dengan perbandingan 15 : 1, dengan derajat kemerahan yang sangat bervariasi.

Induk (P) : $M_1M_1M_2M_2$ <—X—> $m_1m_1m_2m_2$
(merah) (putih)

Gamet P : M_1M_2 m_1m_2

Filial (F_1) : $M_1m_1M_2m_2$ <—X—> $M_1m_1M_2m_2$
(merah) (merah)

Gamet F_1 : $M_1M_2, M_1m_2, m_1M_2,$ $M_1M_2, M_1m_2, m_1M_2,$
dan m_1m_2 dan m_1m_2

Filial (F_2) :

1 $M_1M_1M_2M_2$	1 $M_1M_1m_2m_2$	1 $m_1m_1M_2M_2$	1 $m_1m_1m_2m_2$
2 $M_1M_1M_2m_2$	2 $M_1m_1m_2m_2$	2 $m_1m_1M_2m_2$	
2 $M_1m_1M_2M_2$			
4 $M_1m_1M_2m_2$			
9 merah	3 merah	3 merah	1 putih

Rasio fenotipe merah : putih = 15 : 1

Contoh polimeri yang lain:

Pada tanaman tomat ada 3 pasang gen (gen ganda) yang mengawasi berat buah. Tanaman dengan genotipe AABBCc menghasilkan buah yang besar dengan berat rata-rata 70 gram. Genotipe aabbcc menghasilkan buah kecil dengan berat rata-rata 40 gram. Jika diadakan penyilangan antara kedua genotipe tersebut, berapa gramkah berat rata-rata F₁? Berapa gramkah berat yang ditambahkan untuk setiap gen dominan? Bagaimana rasio fenotipe F₂?

Penyelesaian:

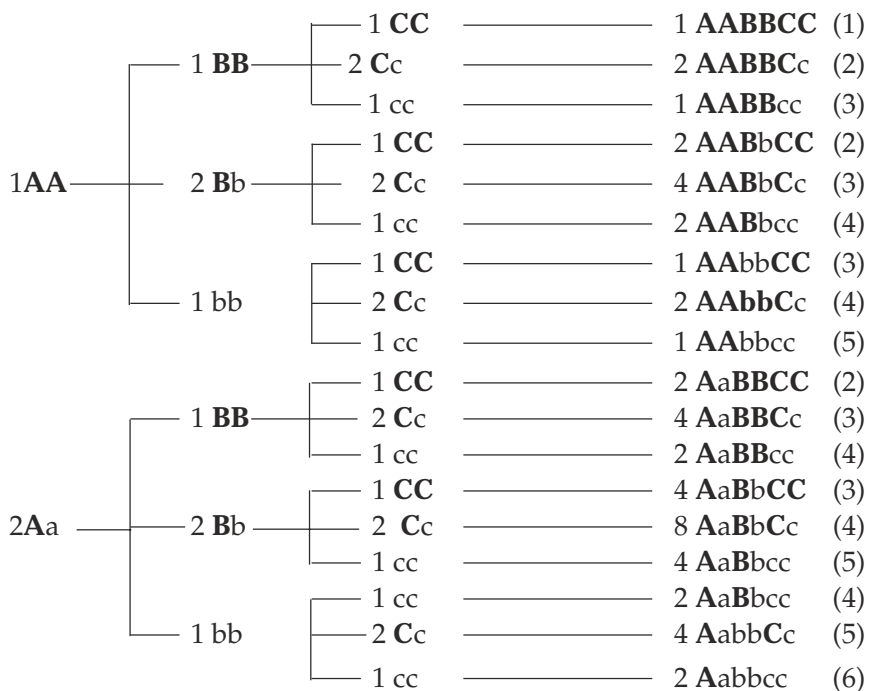
Induk (P): **AABBCc** <———X———> aabbcc
70 gram 40 gram

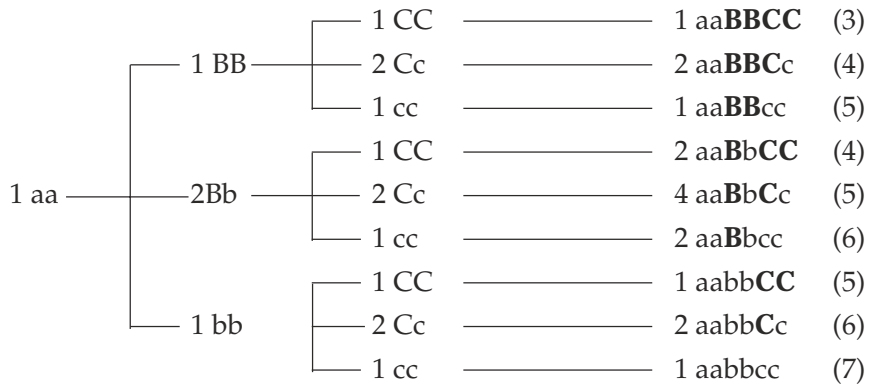
Gamet P : **ABC** abc

F₁ (Filial I) : **AaBbCc** <———X———> **AaBbCc**

Gamet F₁ : **ABC, ABc, AbC, Abc,** | **ABC, ABc, AbC, Abc**
 aBc, aBc, abC, abc **aBc, aBc, abC, abc**

F₂ (Filial II) :





$$\begin{aligned} \text{AABBCC} &= 70 \text{ gram} \\ \text{aabbcc} &= 40 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{6 gen dominan} &= 30 \text{ gram, jadi 1 gen dominan menambahkan} \\ &\text{berat: } \frac{30 \text{ gram}}{6} = 5 \text{ gram} \end{aligned}$$

Genotipe F_1 adalah $AaBbCc$, mengandung 3 gen dominan. Setiap 1 gen dominan menambah berat 5 gram. Jadi, berat buah rata-rata F_1 adalah: $40 \text{ gram} + (3 \times 5) \text{ gram} = 55 \text{ gram}$

Tabel F_2 :

Jumlah Gen Dominan	Berat Buah Rata-Rata (gram)	Frekuensi
0	$40 + 0 = 40$	1
1	$40 + 5 = 45$	6
2	$40 + 10 = 50$	15
3	$40 + 15 = 55$	20
4	$40 + 20 = 60$	15
5	$40 + 25 = 65$	6
6	$40 + 30 = 70$	1

Jadi, fenotipe F_2 adalah :

$$40 \text{ gr} : 45 \text{ gr} : 50 \text{ gr} : 55 \text{ gr} : 60 \text{ gr} : 65 \text{ gr} : 70 \text{ gr} = 1 : 6 : 15 : 20 : 15 : 6 : 1$$

3. Pola-Pola Hereditas

Pada kenyataannya, dalam penelitian-penelitian lebih lanjut sering dijumpai penyimpangan-penyimpangan. Penyimpangan tersebut disebabkan oleh adanya tautan dan pindah silang, determinan seks, tautan seks, kegagalan berpisah, dan gen letal.

a. Tautan dan Pindah Silang

Gen terletak secara linear pada lokus tertentu. Pada saat terjadinya meiosis, gen-gen yang berada dalam kromosom tersebut memisah secara bebas. Pada saat meiosis inilah terjadi peristiwa tautan dan pindah silang.

1) Tautan

Tautan adalah peristiwa ketika gen-gen yang terletak pada kromosom yang sama dapat memisahkan diri secara bebas waktu pembelahan meiosis. Peristiwa tautan pertama kali ditemukan oleh seorang ahli genetika dan embriologi dari Amerika, yaitu Thomas Hunt Morgan pada tahun 1910. Berkat penemuannya, pada tahun 1933 Morgan menerima hadiah Nobel dalam bidang Biologi dan Kedokteran. Objek penelitian Morgan adalah lalat buah (*Drosophila melanogaster*). Alasan digunakan lalat buah adalah sebagai berikut.

- 1) Siklus hidupnya pendek (sekitar 10 hari untuk setiap generasi).
- 2) Sepasang parental dapat menghasilkan beberapa ratus keturunan (seekor betina bertelur 50-70 butir per hari, dengan kemampuan bertelur maksimum 10 hari).
- 3) Jumlah variannya banyak.
- 4) Mudah dipelihara dalam medium yang sederhana (tape singkong dan pisang matang dengan perbandingan 1 : 6 yang dicampurkan sampai homogen).

Morgan melakukan percobaan untuk membuktikan adanya tautan pada kromosom dengan mengawinkan berbagai macam varietas yang terdapat pada lalat *Drosophila melanogaster*. Morgan mengawinkan lalat buah betina normal, yaitu tubuhnya berwarna kelabu (K) dan sayapnya panjang (P) dengan lalat buah jantan yang abnormal, yaitu tubuhnya berwarna hitam (k), sayapnya pendek (p). Diperoleh F_1 lalat buah berwarna kelabu sayapnya panjang semua. Selanjutnya F_1 di-*testcross*-kan dengan induk yang bergenotipe homozigot resesif. Pada F_2 diperoleh lalat buah yang tubuhnya berwarna kelabu sayap panjang dan lalat buah tubuhnya berwarna hitam sayap pendek. Jadi, perbandingan fenotipe F_2 adalah 1 : 1. Perbandingan itu menyimpang dari Hukum Mendel II.

1) *Penyilangan menurut Mendel*

P_1 : **KKPP** >< **kkpp**
 (kelabu sayap panjang) (hitam sayap pendek)

G : **KP** **kp**

F_1 : **KkPp**
 (kelabu sayap panjang)

P_2 : **KkPp** >< **kkpp**

G : **KP** **kp**



Kp

kP

kp

F_2 : **KkPp** **Kkpp,** **kkPp,** **kkpp**
 kelabu sayap panjang kelabu sayap pendek hitam sayap panjang hitam sayap pendek

2) *Penyilangan menurut Morgan*


P_1 :  **KK PP** >< **kkpp** 
 kelabu sayap panjang hitam sayap pendek

Gamet P_1 : KP.

kp.

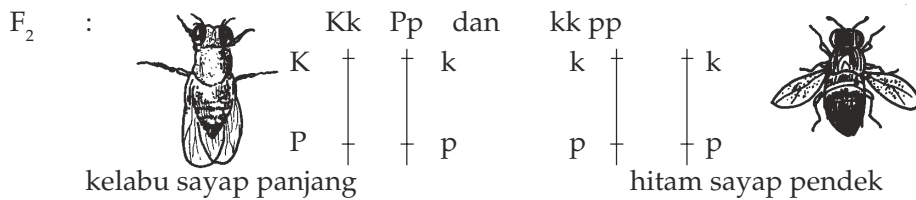
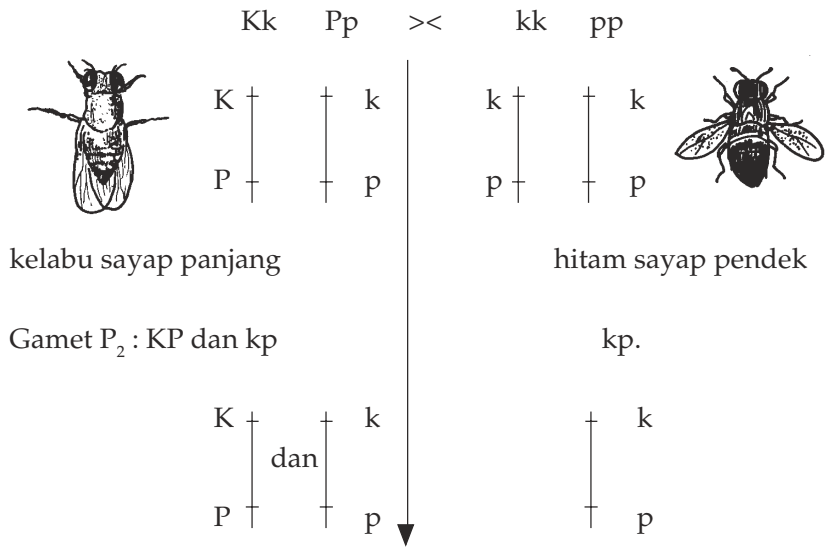
K **k**
 | |
 + +
 | |
P **p**

KkPp

 **K** **k**
 | |
 + +
 | |
P **p**

kelabu sayap panjang

P₂ : Test cross



Menurut Mendel, persilangan lalat buah diperoleh dengan perbandingan fenotipe 1 : 1 : 1 : 1 karena gamet yang terbentuk ada 4 macam dari salah satu induknya. Hal ini disebabkan kromosom yang mengandung gen K atau k, gen P atau p pada waktu meiosis bergerak ke kutub masing-masing yang sama besarnya. Keempat alel tersebut terdapat pada kromosom yang berlainan (berbeda). Pada waktu itu Mendel sama sekali belum mengetahui tentang kromosom dan secara kebetulan kedua pasang gen yang dipakai dalam percobaan, masing-masing terletak pada kromosom yang berlainan. Dengan demikian, pada waktu pembentukan gamet akan terjadi pemisahan secara bebas (Hukum Mendel II). Akan tetapi, pada persilangan lalat buah menurut Morgan, bahwa gen K-k dan P-p terletak pada kromosom yang sama yang dikenal dengan *berangkai tautan*. Karena gen-gen tersebut terletak pada kromosom yang sama pada waktu pembentukan gamet, kedua gen tersebut tidak memisah secara bebas dan cenderung untuk diturunkan bersama.

Tautan (linkage) adalah peristiwa terjadinya dua gen atau lebih terletak pada satu kromosom yang sama dan tidak dapat memisahkan diri secara bebas pada waktu meiosis. Terjadinya tautan karena gen-gen yang mengendalikan dua sifat beda atau lebih terletak pada kromosom yang sama dan lokusnya berdekatan.

Hasil persilangan lalat buah menurut Mendel antara F_1 dan salah satu induknya yang homozigot resesif (*test cross*) adalah $KkPp$, $Kkpp$, $kkPp$ dan $kkpp$. Genotipe yang sama dengan induknya adalah $KkPp$ dan $kkpp$ disebut *kombinasi parental* (KP) sebanyak 50%, sedangkan genotipe $Kkpp$ dan $kkPp$ merupakan kombinasi baru atau *rekombinasi* (RK) sebanyak 50%.

Menurut Morgan hasil persilangan antara F_1 dan salah satu induknya yang homozigot resesif (*test cross*), yaitu $KkPp$ dan $kkpp$ merupakan kombinasi parental (KP) sebanyak 100%, pada persilangan ini tidak dihasilkan rekombinasi (RK). Dari kedua peristiwa tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa apabila $KP > 50\%$ dan $RK < 50\%$ berarti terjadi tautan dan apabila $KP = RK = 50\%$ berarti gen terletak pada kromosom yang berlainan. Persentase rekombinasi menunjukkan kuat lemahnya tautan antara gen-gen yang terdapat pada kromosom yang sama sehingga dapat menunjukkan jarak antara kedua gen tersebut.

2) Pindah Silang (Crossing Over)

Pindah silang adalah peristiwa bertukarnya bagian kromosom satu dengan kromosom lainnya yang homolog, ataupun dengan bagian kromosom yang berbeda (bukan homolognya). Peristiwanya kerap terjadi pada gen-gen yang tertaut, tetapi mempunyai jarak lokus yang berjauhan dan terjadi pada waktu meiosis.

Peristiwa pindah silang selain ditemukan oleh Morgan, juga dilaporkan oleh G.N. Colling dan J.H. Kemton pada tahun 1911. Peristiwa pindah silang ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

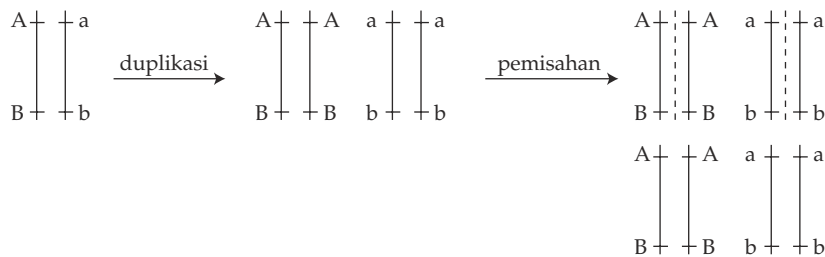
Misalnya gen-gen A dan b tertaut pada kromosom yang sama alelnya adalah a dan b. Jadi, genotipenya dapat ditulis $AaBb$. Berapa macam gametnya jika:

- tidak terjadi pindah silang;
- terjadi pindah silang.

Jawab:

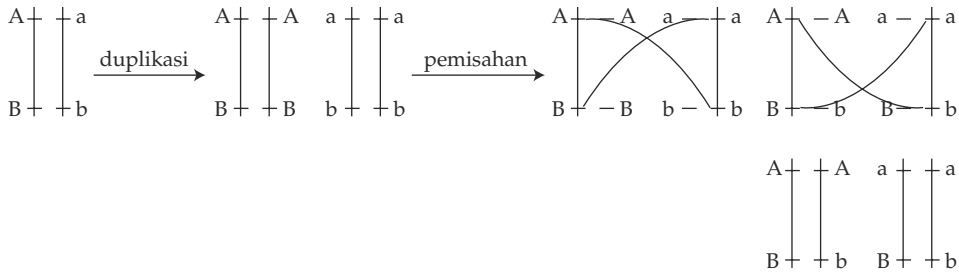
- Jika tidak terjadi pindah silang

Pada pembentukan gamet, ketika terjadi peristiwa meiosis, kromosom akan menduplikasi diri (membuat duplikatnya) kemudian saling memisahkan diri sehingga dari satu sel induk terbentuk 4 gamet, tetapi macamnya hanya 2, yaitu AB dan ab.

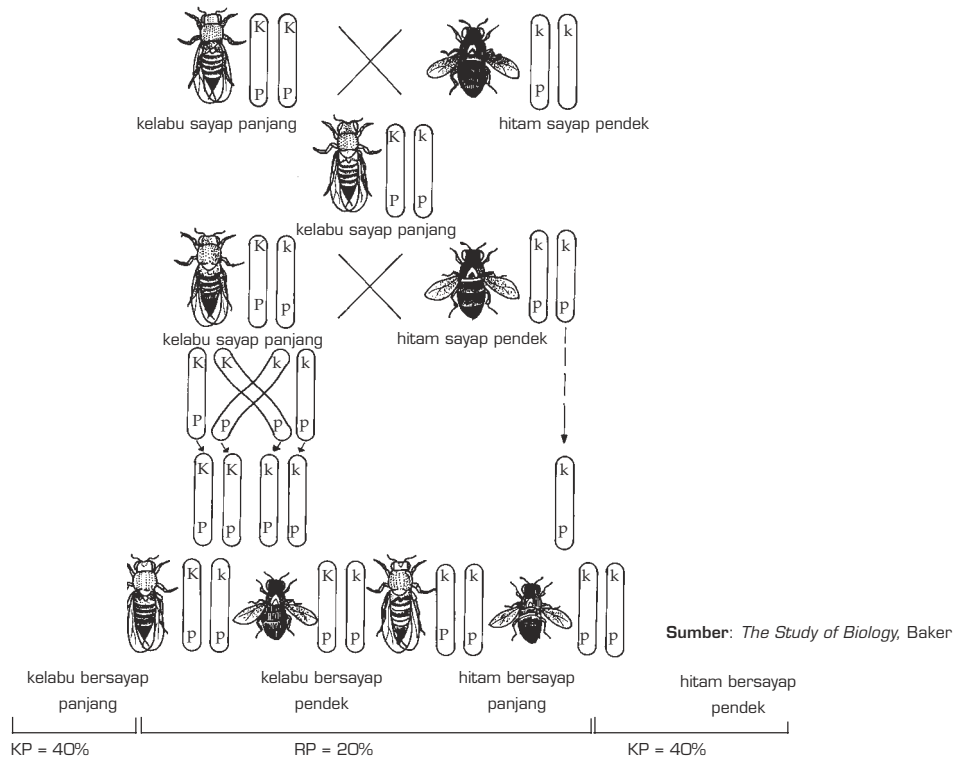


b) Jika terjadi pindah silang

Pada pembentukan gamet, kromosom akan menduplikasi diri sehingga AB akan membentuk AB, dan ab akan membentuk ab. Namun, sebelum pemisahan kromosom, terjadi pindah silang. Satu kromosom dengan kromosom homolognya saling menyimpang dan terjadi pertukaran, berarti pula pertukaran gen-nya. Maka, untuk genotipe AaBb (AB tertaut) terbentuk 4 macam gamet, yaitu AB, Ab, aB, ab.



Rekomendasi gen-gen dapat juga menunjukkan terjadinya pindah silang pada waktu profase dalam meiosis, yaitu pada waktu pembentukan gamet. Contoh lain tautan dan pindah silang pada lalat *Drosophilla melanogaster* adalah seperti yang terlihat pada Gambar 3.26.



Gambar 3.26 Peristiwa tautan dan pindah silang *Drosophilla melanogaster*

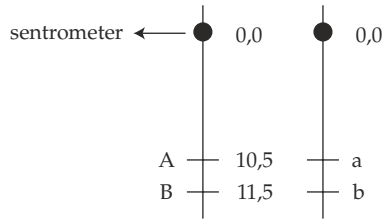
Pada waktu pembentukan gamet F_1 terjadi pertukaran antarbagian kromatid, yaitu pada waktu profase pembelahan meiosis yang diikuti oleh patahnya dan melekatnya kembali kromatid-kromatid tersebut. Gen-gen yang terdapat pada segmen kromosom tersebut bertukar dengan gen-gen yang terdapat pada segmen kromosom pasangannya.

F_1 mengandung dua gen K-k dan P-p. Kedua pasang gen tersebut terdapat pada kromosom yang homolog. Karena terjadi pindah silang, gamet yang terbentuk ada 4 macam, yaitu KP, Kp, kP dan kp. Gamet KP dan kP merupakan gamet asli, sedangkan gamet Kp dan kp merupakan gamet hasil kombinasi baru (rekombinasi). Untuk menguji adanya pindah silang, diadakan uji silang (*test cross*) antara F_1 dengan induk-induk yang homozigot resesif. F_2 terdiri atas genotipe kombinasi parental (KP) sebanyak 80% dan genotipe rekombinasi (RK) sebanyak 20%. Morgan mengatakan bahwa jarak gen yang berangkai akan sebanding dengan nilai pindah silang. Misalnya, nilai pindah silang 1%, maka jarak kedua gen tersebut adalah 1 unit. Nilai pindah silang adalah angka yang menunjukkan persentase rekombinasi dari hasil persilangan. Rekombinasi F_2 adalah 20%. Jadi, jarak antara kedua gen tersebut adalah 20 unit atau 20 satuan peta. Makin jauh jarak antara gen tersebut, makin besar kemungkinan terjadinya pindah silang. Pindah silang merupakan peristiwa yang umum terjadi pada makhluk hidup begitu pula tautan yang merupakan penyimpangan Hukum Mendel.

Peta Kromosom

Telah kita ketahui bahwa gen-gen terletak di dalam kromosom, di dalam satu kromosom terdapat beratus-ratus bahkan beribu-ribu gen. Gen-gen ini terletak pada lokus-lokus yang berderet memanjang sesuai dengan panjang kromosom. Lokus satu dengan lokus lainnya mempunyai jarak yang berbeda. Ukuran yang dipakai untuk menentukan jarak antara lokus pada kromosom disebut *unit*, ukuran yang sangat halus tidak dapat dilihat. Oleh karena itu, jarak antara batas lokus satu dan lokus lainnya belum pasti hingga sekarang. Jadi, ukuran unit itu adalah ukuran khayal, hanya untuk memudahkan perhitungan genetik.

Sentromer pada umumnya dianggap sebagai titik pangkal dan diberi angka 0, maka jarak gen (lokus) pada kromosom tersebut dihitung dari angka 0 (lihat Gambar 3.27). Misalnya, gen A adalah 10,5 unit, berarti gen A ini berjarak 10,5 dari titik 0, kemudian misalnya gen B berjarak 11,5 unit, berarti gen B berjarak 11,5 unit dari titik 0. Berapakah jarak A - B? Jarak A - B ialah $11,5 - 10,5 = 1$ unit. 1 unit disebut 1 mM (mili Morgan)



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.27 Jarak peta kromosom A dan B

Kalau AaBb di atas disilangkan dengan aabb (*test cross*), persentase masing-masing keturunannya akan dapat dihitung. Jarak A - B sudah diketahui = 1 mM (mili Morgan), berarti kombinasi baru (rekombinasi/RK) = 1%. Jadi, kombinasi asli (kombinasi parenta KP) = 100% - 1% = 99% sehingga masing-masing keturunan mempunyai persentase.

1. AaBb = 49,5% kombinasi parental (KP)
2. Aabb = 0,5% rekombinasi (RK)
3. aaBb = 0,5% rekombinasi (RK)
4. aabb = 49,5% kombinasi parental (KP)

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada peristiwa tautan:

- a. kombinasi parental > dari 50%, sedangkan rekombinasi < 50%;
- b. makin kecil persentase rekombinasi (RK), berarti makin rapat jarak lokusnya.

KEGIATAN 3.3

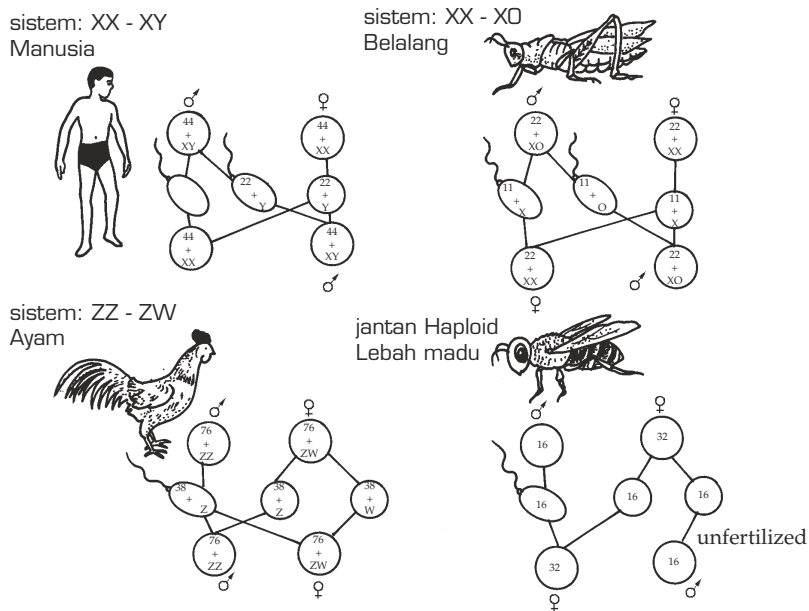
- A. Dalam sebuah kelenjar kelamin terjadi pembelahan meiosis. Sel yang membelah bergenotipe MmNn, M dan N terjadi tautan.
 1. Jika tidak terjadi pindah silang, bagaimana macam gamet yang dihasilkan? berapa perbandingannya?
 2. Jika 40% sel yang membelah mengalami pindah silang. Hitung rasio antara kombinasi parental dan rekombinasi yang terbentuk.
- B. Tanaman buah besar rasa manis bergenotipe BBMM disilangkan dengan tanaman buah kecil rasa asam (bbmm), F₁: 100% buah besar rasa manis. F₂: terdiri atas 75% buah besar rasa manis : 25% buah kecil rasa asam.
 1. Mengapa hasilnya demikian? Coba kamu buat diagram persilangannya.

2. Dari turunan pertama (F_1) disilangkan dengan induk yang resesif, ternyata diperoleh keturunan: 350 buah besar rasa manis : 150 buah besar rasa asam : 150 buah kecil rasa manis : 350 buah kecil rasa asam.
Hitunglah berapa persen sel yang membelah mengalami pindah silang.

b. Determinasi Seks

Berdasarkan hasil berbagai penelitian diketahui bahwa jenis kelamin merupakan sifat yang diwariskan dari generasi ke generasi dengan mekanisme seperti penurunan sifat-sifat lainnya. Telah diketahui bahwa jenis kelamin telah ditentukan sejak sel telur dibuahi oleh sperma. Dengan kata lain, jenis kelamin ditentukan oleh jenis gamet yang mengadakan fertilisasi. Salah satu bukti kebenaran hal tersebut adalah apabila terjadi anak kembar identik ternyata selalu berjenis kelamin sama.

Jenis kelamin dapat ditentukan berdasarkan susunan kromosom di dalam sel. Salah satu perintis yang berhasil menemukan perbedaan susunan kromosom sel jenis jantan dan betina adalah Mc. Clung. Ada beberapa sistem pengelompokan kromosom dalam membedakan jenis kelamin, di antaranya adalah (lihat Gambar 3.28).



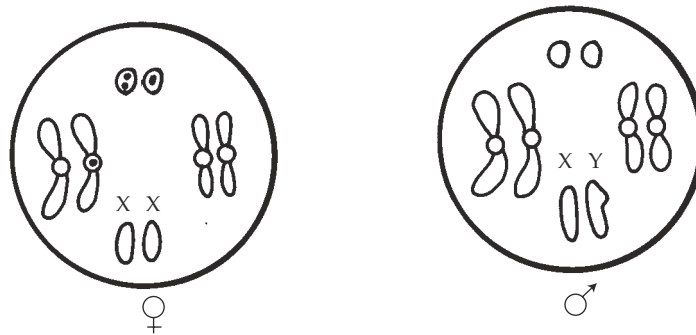
Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.28 Macam-macam determinasi seks

- Sistem XX-XY, misalnya pada manusia, lalat, dan semua mamalia.
- Sistem XX-XO, pada beberapa jenis serangga, misalnya kutu daun dan belalang.
- Sistem ZZ-ZW, pada burung, kupu-kupu, dan ikan.

1) Sistem XX-XY

Pada setiap sel tubuh lalat buah terdapat 4 pasang kromosom, terdiri atas 2 pasang yang sama baik pada jantan maupun betina. Pasangan kromosom ini disebut *autosom*, dan pasangan kromosom ini diberi simbol A, sedangkan pasangan kromosom yang berbeda disebut kromosom seks. Untuk yang betina keduanya berbentuk batang, diberi simbol XX, sedangkan untuk jantan, satu berbentuk (batang) seperti pada betina, juga diberi simbol X, dan yang satu lagi berbentuk kail, diberi simbol Y. Jadi, susunan kromosom seks yang jantan adalah XY. Perhatikan Gambar 3.29 berikut ini.



Gambar 3.29 Kromosom *Drosophila melanogaster*

Dengan demikian, kariotipe dari setiap sel tubuh lalat buah adalah sebagai berikut.

- Lalat betina $6A + XX$ atau $3AA + XX$
- Lalat jantan $6A + XY$ atau $3AA + XY$

Jika mengadakan meiosis, lalat betina menghasilkan satu macam gamet dengan kariotipe $3A + X$, sedangkan lalat jantan menghasilkan dua macam gamet dengan kariotipe $3A + X$ dan $3A + Y$.

Pada sel tubuh manusia yang mengandung 46 kromosom, maka kariotipenya dapat ditulis sebagai berikut.

- Wanita memiliki kariotipe $44A + XX$ atau $22A + XX$, jika mengalami meiosis akan menghasilkan sel telur dengan kariotipe $22A + X$.
- Pria $44A + XY$ atau $22A + XY$, dan jika mengadakan meiosis akan menghasilkan dua macam sel gamet dengan kariotipe $22A + X$ dan $22A + Y$.

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa yang menentukan jenis kelamin anak adalah sperma. Hal ini disebabkan sel telur akan memberikan jenis kromosom seks yang sama, baik pada anak laki-laki maupun pada anak perempuan. Adapun sperma akan memberikan kromosom X pada anak perempuan dan kromosom Y pada anak laki-laki.

Tabel 3.6 Perimbangan kromosom dalam penentuan kelamin pada *Drosophila* dan manusia

<i>Drosophila</i>			Manusia		
Susunan Kromosom	Kelamin Kromosom	X/A	Susunan	Kelamin	X/A
2A XXX	Super	1,5	2A X	Perempuan	0,5
2A XX	Betina	1,0	2A XX	Perempuan	1,5
2A XXY	Betina	1,0	2A XXX	Perempuan	1,0
3A XXX	Betina	1,0	2A XXXX	Perempuan	2,0
3A XX	Intersex	0,67			
3A XXY	Intersex	0,67			
2A X	Jantan	0,5	2A XY	Laki-laki	0,5
2A XY	Jantan	0,5	2A XYY	Laki-laki	0,5
2A XYY	Jantan	0,5	2A XXY	Laki-laki	1,0
2A XXYY	Laki-laki	1,0			
3A X	Super	0,33			

Walaupun autosom tidak menentukan jenis kelamin, perimbangan antara autosom dan kromosom seks sangat memengaruhi pemunculan sifat jenis kelamin. Keadaan ini tampak jelas pada lalat buah, tetapi pada manusia pengaruhnya tidak begitu jelas.

2) Sistem XX - XO

Sistem ini terdapat pada beberapa jenis serangga, misalnya pada kutu busuk, kutu daun, dan belalang. Kromosom seks pada sistem ini hanya satu macam, yaitu kromosom X, sedangkan O bukan simbol kromosom seks.

Betina memiliki susunan kromosom seks XX dan jantan memiliki susunan kromosom seks XO, artinya betina memiliki 2 buah kromosom X (homozigot) dan jantan hanya 1 buah, yaitu X saja.

Contoh:

Belalang mempunyai 24 buah kromosom, yaitu:

- 1) betina 22A + XX
- 2) jantan 22A + XO, hanya 23 buah kromosom.

3) Sistem ZZ - ZW

Sistem ZZ - ZW terdapat pada aves (burung), pisces (ikan) dan beberapa insekta, seperti ngengat dan kupu-kupu. Di sini yang betina mempunyai kromosom seks ZW dan yang jantan ZZ.

Contoh:

Ayam jumlah kromosomnya 48 buah, berarti autosomnya 38 buah atau 19 pasang.

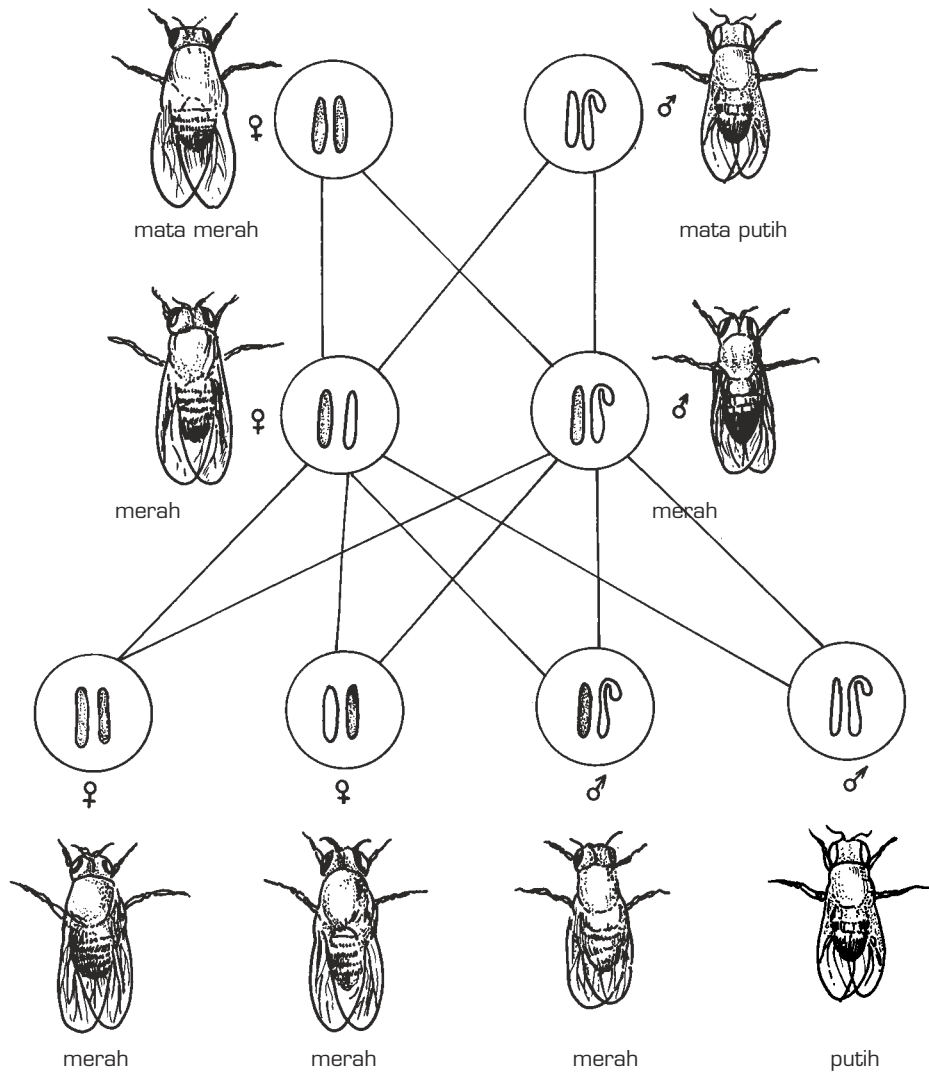
- 1) Ayam betina, kromosomnya 19AA + ZW
Ovum (telur): 19A + Z atau 19A + ZZ
- 2) Ayam jantan, kromosomnya 19AA + ZZ
Sperma : 19 A + Z

c. Tautan Seks (Sex Linkage)

Tautan seks adalah peristiwa seks dengan gen terletak pada kromosom kelamin, umumnya pada kromosom X (kromosom seks X). Seperti halnya autosom, kromosom-kromosom pun (kromosom seks) mengandung gen-gen yang disebut *gen tertaut seks*. Pada umumnya gen yang tertaut seks ini terdapat pada kromosom seks X. Gen ini tidak mempunyai alel pada kromosom seks Y. Jadi, hanya mempunyai alel pada kromosom seks X lagi. Karena tidak ada alel pada kromosom seks Y, gen tertaut seks dapat menunjukkan ekspresinya sekalipun dalam keadaan tunggal (tanpa pasangan) resesif maupun dominan. Percobaan pertama tentang tautan seks ini dilakukan juga oleh Thomas Hunt Morgan (1866-1945) pada tahun 1910 beriringan dengan penemuan peristiwa tautan biasa dengan objek penelitian yang sama, yaitu pada *Drosophila melanogaster*.

Morgan mengawinkan *Drosophila* bermata merah dengan *Drosophila* bermata putih, sifat merah (W) dominan terhadap sifat putih (w). F₁-nya semua *Drosophila* bermata merah. Selanjutnya dari F₁ dikawinkan dengan F₁, F₂-nya terdiri atas 2 macam fenotipe, yaitu *Drosophila* bermata merah dan *Drosophila* bermata putih dengan perbandingan 3 : 1 sesuai dengan perbandingan Mendel. Namun, setelah diteliti ternyata *Drosophila* bermata putih semuanya jantan dan yang bermata merah terdiri atas jantan dan betina. Inilah penyimpangannya karena menurut perbandingan Mendel sifat merah atau putih memiliki kemungkinan yang sama untuk jantan maupun betina. Pada persilangan ini tidak dihasilkan betina bermata putih. Mengapa demikian?

Jawabnya menurut Morgan, karena gen untuk sifat warna mata tertaut pada kromosom seks, yaitu pada kromosom seks X. Untuk lebih jelasnya, peristiwa tautan seks pada penyilangan di atas, pelajailah skema pada Gambar 3.30.



Sumber: *The Study of Biology*, Baker

Gambar 3.30 Penyilangan tautan seks pada *Drosophila melanogaster*

Tautan seks selain pada lalat buah, juga terdapat pada manusia. Menurut V.A. Mc. Kusick (1966) gen yang tertaut pada kromosom X dan bersifat resesif pada manusia, yaitu:

- a. hemofili (darah sukar membeku);
- b. buta warna;
- c. anodontia (tidak bergigi/ompong);
- d. amolar (tidak bergeraham);
- e. anenamel (gigi tidak beremail).

Gen yang tertaut pada kromosom Y, karakter-karakter yang ditimbulkannya disebut *Holandrik*, antara lain sebagai berikut.

- a. *Hyserix gravior* = Hg, pertumbuhan rambut normal, alelnya hg = pertumbuhan rambut sangat kasar dan panjang sehingga mirip duri landak.
- b. *Webbedtoes* = Wt, pertumbuhan kulit pada jari normal, alelnya wt = menyebabkan pertumbuhan kulit pada jari tidak normal, terdapat selaput kulit di antara jari-jari, mirip jari-jari katak.
- c. *Hypertichosis* = Ht, pertumbuhan rambut normal, alelnya ht = menyebabkan pertumbuhan rambut yang panjang di sekitar telinga.

d. Kegagalan Berpisah (Non-Disjunction)

Gagal berpisah adalah peristiwa seks dengan kromosom yang tidak mengadakan pemisahan ke kutub yang berlawanan pada waktu meiosis. Jadi, kromosom tersebut tetap berpasangan dan bergerak ke satu kutub yang sama, sementara kutub lainnya kekurangan kromosom. Misalnya, pada *Drosophila* betina, kromosom normal pada ovumnya ditulis $3A + X$. Namun, jika terjadi peristiwa gagal berpisah, ovumnya mengandung kromosom $3A + XX$ atau $3A + O$. Kromosom pada tubuhnya $3AA + OX$ atau $3AA + XXY$ atau $3AA + OY$, sedangkan seri kromosom normal pada individu adalah $3AA + XX$ pada betina dan $3AA + XY$ pada jantan.

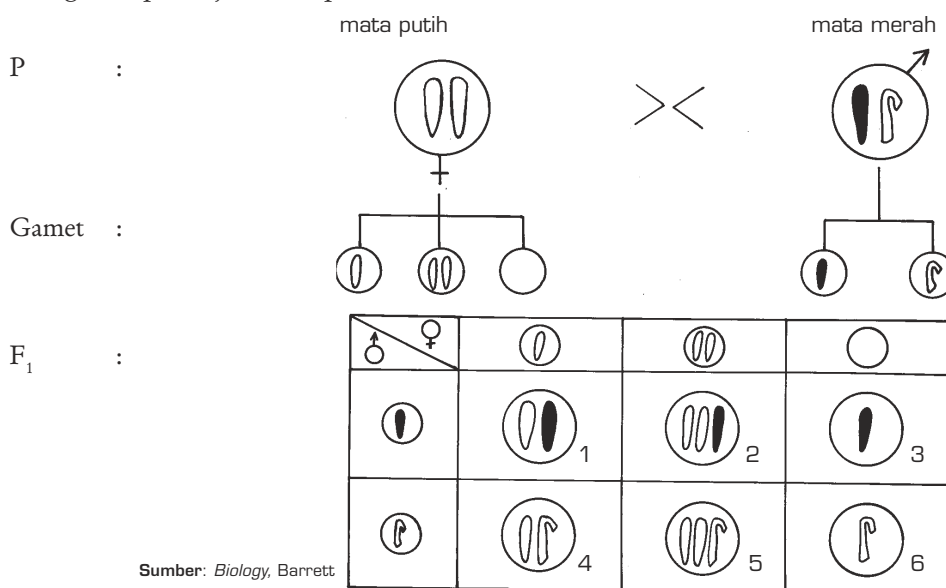
Apabila peristiwa gagal berpisah ini terjadi pada individu jantan, misalnya pada *Drosophila* jantan, akan terbentuk gamet jantan (sperma) yang susunan kromosomnya tidak normal, yaitu $3A + XY$ dan $3A + O$ dan jika sperma ini membuahi ovum yang normal, akan terbentuk individu dengan susunan kromosom $3AA + XXY$ atau $3AA + OX$. Jika terjadi pembuahan antara ovum dan sperma yang kedua-duanya mengandung seri kromosom tidak normal, akan terbentuk individu dengan seri kromosom $3AA + XXXY$ atau $3AA + XXO$ atau $3AA + OXY$ atau $3AA + OO$.

Kemungkinan seri kromosom pada *Drosophila*, yaitu:

- 1) XXXY, OO, O jarang sekali
- 2) XO - jantan steril
- 3) XXY - jantan steril
- 4) XXX - mati

Peristiwa gagal berpisah pertama kali dilaporkan oleh Calvin B. Bridges. Bridges mengawinkan *Drosophila* betina bermata putih dengan *Drosophila* jantan bermata merah, F₁-nya betina mata merah dan jantan mata putih, tetapi di antara sekian banyak betina mata merah terdapat 1 ekor betina mata putih dan di antara beribu-ribu jantan mata putih pada F₁ terdapat 1 ekor jantan mata merah. Menurut Bridges, hal ini disebabkan ketika meiosis terjadi gagal berpisah pada sebagian kromosom seks X sehingga selain gamet normal X terdapat pula XX dan O.

Peristiwa gagal berpisah (nondisjunction) pada percobaan Calvin B. Bridges dapat dijelaskan pada Gambar 3.31.



Gambar 3.31 Bagan persilangan dari gagal berpisah

Tabel 3.7 Susunan genotipe dan fenotipe *Drosophila* pada peristiwa nondisjunction

Individu no:	Genotipe	Fenotipe
1.	$X^M X^m$	Betina, mata merah, normal
2.	$X^M X^m X^m$	Betina super, mata merah, mati
3.	X^M	Jantan, mata merah, tidak normal, (kekecualian pertama)
4.	$X^m Y$	Jantan, mata putih, normal
5.	$X^m X^m Y$	Betina, mata putih, tidak normal, (kekecualian kedua)
6.	Y	Jantan, mati

Keterangan: Warna mata merah (M) terpaat pada kromosom X.

Tugas 3.9

Cobalah diskusikan dengan temanmu, bagaimana kalau betina bermata putih pada diagram F_1 di atas, disilangkan dengan jantan normal bermata merah. Buatlah diagramnya!

Kelainan susunan kromosom pada manusia akibat adanya kegagalan berpisah pada waktu pembentukan gamet antara lain sebagai berikut.

1) *Gagal Berpisah pada Kromosom Seks*

Peristiwa gagal berpisah pada kromosom seks dapat menyebabkan kelainan sebagai berikut.

a) *Sindroma Turner*

Jumlah kromosom 45 buah ($22AA + XO$) atau $2n - 1$. Ciri-cirinya adalah sebagai berikut, yaitu jenis kelamin perempuan, tubuhnya pendek (Dwarfisme), terdapat lipatan di tengkuk, kecerdasan abnormal, payudara tidak tumbuh, Ovarium rudimenter, tidak menghasilkan telur (mandul), dan uterus (rahim) kecil.

Sindroma Turner pertama kali diperkenalkan oleh H.M. Turner (1938) di Amerika Serikat. Jumlah kelahiran sedikit karena banyak yang abortus; 1 : 2.500 kelahiran wanita.

b) *Sindroma Klinefelter*

Jumlah kromosom 47 buah, ($22AA + XXY$) atau $2n + 1$. Ciri-cirinya adalah sebagai berikut: jenis kelamin laki-laki, testis tidak tumbuh, aspermia (tidak menghasilkan sperma/mandul), payudara tumbuh/membesar, merupakan penimbunan lemak, penis normal (sedikit lebih kecil), dan gaya mirip kewanitaan, suara agak kewanitaan.

Sindroma Klinefelter Pertama kali diperkenalkan oleh H.H. Klinefelter (1942). Kejadian kelahiran 1 : 5.000 kelahiran pria.

c) *Wanita Super*

Jumlah kromosom 47 buah, ($22AA + XXX$) atau $2n + 1$. Ciri-cirinya adalah sebagai berikut: jenis kelamin perempuan, bentuk luar, ovulasi, dan kesuburan normal, dan ada yang skizofrenia (gila).

d) *Laki-Laki Super*

Jumlah kromosom 47 buah, ($22AA + XYY$) atau $2n + 1$. Ciri-cirinya adalah sebagai berikut: jenis kelamin laki-laki, bersifat agresif dan antisosial, sejak kecil memperlihatkan watak kriminal.

2) *Gagal Berpisah pada Autosom*

Peristiwa gagal berpisah pada autosom menyebabkan kelainan sebagai berikut.

a) *Sindroma Down*

Biasa disebut *mongolisme* karena mempunyai mata sipit. Jumlah kromosom 47 buah, 45A + XX atau 45A + XY. Gagal berpisah pada autosom nomor 21.

Ciri-cirinya adalah sebagai berikut.

- (1) Terbelakang mental, IQ < 25 (idiot) atau 25 - 49 (imbisil) atau paling cerdas IQ 50 - 69 (moron/bodoh).
- (2) Gonad dan genitalia tumbuh kurang sempurna.
- (3) Akil balig terlambat.
- (4) Tubuh pendek, berjalan agak lambat.



Sumber: *Biology The Unity and Diversity*, Starr-Taggart

Gambar 3.32 Penderita Sindroma Down

- (5) Telapak tangan gemuk, pendek (disebut tapak tangan monyet), jari kelingking membengkok ke dalam.

Sindroma Down Pertama kali diperkenalkan oleh J.L. Down (1866). Jumlah kelahiran 1 : 60 pada wanita usia 36 tahun ke atas; 1 : 2.000 pada wanita di bawah 25 tahun, perhatikan Gambar 3.22.

b) *Sindroma Pantau*

Jumlah kromosom 47 buah, 45A + XX atau 45A + XY. Gagal berpisah pada autosom nomor 13, 14, atau 15. Kemungkinan kelahiran 0,1. Ciri-cirinya adalah sebagai berikut: kepala kecil, sumbing dan langit-langit bercelah, tuli, kelainan jantung, dan mental terbelakang.

c) *Sindroma Edward*

Jumlah kromosom 47 buah, 45AA + XX atau 45 AA + XY. Gagal berpisah pada kromosom no. 16, 17, atau 18. Kemungkinan kelahiran 0,5 ‰, sering dilahirkan oleh wanita yang berusia 35 tahun ke atas. Ciri-cirinya adalah sebagai berikut: tengkorak lonjong, telinga rendah, dada pendek serta lebar.

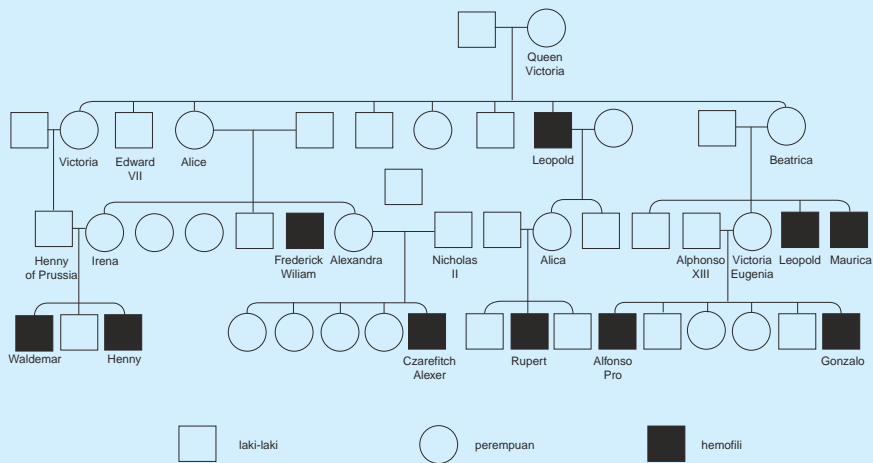
Agar pewarisan sifat keturunan yang terdapat dalam suatu keluarga dapat dirunut dan dipelajari untuk beberapa generasi, kita harus melakukan beberapa hal sebagai berikut.

1. Membuat peta silsilah (*pedigree chart*), yaitu catatan asal-usul suatu sifat dari nenek moyang hingga anak cucu beberapa generasi berturut-turut.
2. Mempelajari peristiwa penurunan sifat pada anak kembar.
3. Membandingkan dengan pewarisan sifat keturunan pada hewan dan tumbuhan.

KEGIATAN 3.4

Mengamati Peta Silsilah

Bagaimanakah peta silsilah dapat menginformasikan asal-usul hereditas pada manusia? Pelajarilah peta silsilah Ratu Victoria yang membawa sifat hemofili di bawah ini!



Gambar Peta silsilah keluarga Ratu Victoria

Pertanyaan

1. Berapa generasikah yang tergambar dalam peta silsilah tersebut?
2. Berapa persentase dari keturunan tersebut menderita hemofili?
3. Jika umur setiap generasi 50 tahun, berapa lama sifat hemofili pada keluarga tersebut dapat dirunut?

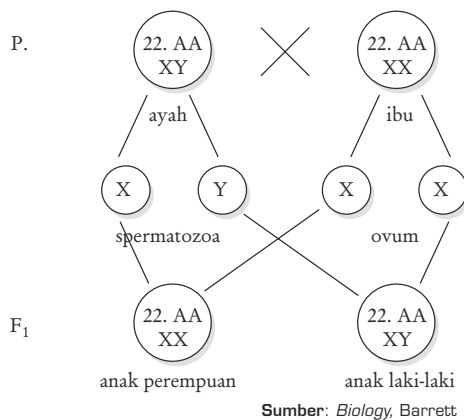
Tugas 3.10

Buatlah peta silsilah keluargamu mulai dari nenek dan kakek, ayah dan ibu, saudara ayah dan ibu, serta saudara-saudaramu dengan menggunakan simbol!

- = laki-laki
- = perempuan
- = laki-laki dengan penyakit menurun
- = perempuan dengan penyakit menurun

a. Jenis Kelamin pada Manusia

Pada bab yang lalu telah diuraikan bahwa jenis kelamin pada manusia dikendalikan oleh sepasang kromosom seks. Individu laki-laki memiliki kromosom XY dan individu perempuan memiliki kromosom XX. Dari uraian tersebut dapat diketahui bahwa laki-laki dapat membentuk dua macam spermatozoa yang mengandung kromosom X dan yang mengandung kromosom Y, sedangkan perempuan hanya menghasilkan ovum yang mengandung kromosom X. Oleh karena itu, laki-laki dikatakan bersifat *heterogametik* dan perempuan dikatakan *homogametik*. Jika spermatozoa X memenuhi ovum X, bayi yang akan lahir perempuan. Jika spermatozoa Y yang membuahi ovum, bayi yang akan lahir laki-laki, lihat diagram berikut ini.



Gambar 3.33 Diagram pewarisan jenis kelamin

Dengan demikian, seorang ibu dapat mewariskan kromosom X kepada semua anaknya sama banyak, baik perempuan maupun laki-laki. Namun, seorang ayah mewariskan kromosom seks kepada anak-anaknya tidak sama karena kromosom seksnya adalah X dan Y. Secara genetik, jenis kelamin seseorang sudah ditentukan pada saat fertilisasi.

Dari diagram dapat diketahui bahwa kemungkinan jenis kelamin anak-anak yang dilahirkan 50% laki-laki dan 50% perempuan. Akan tetapi, pada kenyataannya sering dijumpai bahwa dalam satu keluarga, jumlah jenis kelamin anak yang lahir tidak selalu 50% laki-laki dan 50%

perempuan. Hal ini dapat diterangkan dengan teori kemungkinan, yaitu perbandingan antara peristiwa yang diharapkan dan peristiwa yang mungkin terjadi terhadap suatu objek. Dalam penyelesaiannya kita gunakan rumus binomium $(a + b)^n$ atau $(I = p)^n$.

- a atau I = jenis kelamin laki-laki (kemungkinan yang pertama diharapkan).
 b atau p = jenis kelamin perempuan (kemungkinan yang kedua diharapkan).
 n = jumlah objek yang mengalami peristiwa, misalnya jumlah anak atau anak yang ke-n.

Contoh

Suatu keluarga mengharapkan mempunyai 2 anak, yaitu 1 orang laki-laki dan 1 orang perempuan atau 2 orang laki-laki atau 2 orang perempuan. Bagaimana kemungkinan anak-anak yang akan lahir?

Penyelesaian:

- a = laki-laki, dengan kemungkinan 50%
 b = perempuan, dengan kemungkinan 50%
 n = 2
 $(a+b)^n$
 $(a+b)^n$
 $a^2+2ab+b^2$

Beberapa kemungkinan anak-anak yang akan lahir sebagai berikut.

1. Kemungkinan anak yang akan lahir jika satu laki-laki dan satu perempuan adalah: $2ab=2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$ kemungkinan.
2. Kemungkinan anak yang lahir jika laki-laki semua adalah:
 $a^n = (\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ kemungkinan.
3. Kemungkinan anak yang lahir jika perempuan semua adalah: $b^2(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ kemungkinan.

Bagaimanakah dengan keluarga-keluarga yang mempunyai anak 3, 4 atau n orang? Untuk 3 orang anak dapat dijawab dengan menyelesaikan binomium $(L+P)^3$, untuk 4 orang anak $(L+P)^4$, dan untuk n orang anak $(L+P)^n$. Untuk memudahkan perhitungannya kita gunakan segitiga Pascal, sebagai berikut.

			1		1								
		1		2		1							
	1		3		4		1						
		1		4		6		3		4		1	
....		dst

b. Cacat dan Penyakit Menurun

Ada beberapa penyakit dan cacat yang diwariskan oleh orangtua kepada anak dan cucunya. Penyakit menurun memiliki ciri-ciri sebagai berikut.

1. Tidak dapat disembuhkan.
2. Tidak menular.
3. Dapat diusahakan agar terhindar pada generasi berikutnya dengan tidak mengawini penderita atau pembawa penyakit atau cacat tersebut.
4. Umumnya dikendalikan oleh gen resesif sehingga hanya akan muncul pada orang yang homozigot resesif; pada orang yang heterozigot bersifat sebagai pembawa (carier), dia sendiri tidak menderita sakit atau cacat.

Cacat dan penyakit bawaan pada manusia ada yang diwariskan melalui autosom dan ada pula yang diwariskan melalui kromosom seks. Cacat atau penyakit yang diwariskan melalui autosom diwariskan kepada laki-laki dan perempuan karena keduanya memiliki autosom yang sama. Adapun cacat atau penyakit yang diwariskan melalui kromosom seks, baik yang tertaut pada kromosom X maupun pada kromosom Y, dapat diderita oleh perempuan dan laki-laki atau laki-laki saja.

1) Cacat atau Penyakit Bawaan yang Tidak Tertaut Seks

Cacat dan penyakit bawaan yang tidak tertaut seks di antaranya albinisme (albino), gangguan mental, polidaktili, brakidaktili, sindaktili, dan thalasemia.

a) Albinisme (albino)



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.34 Anak albino

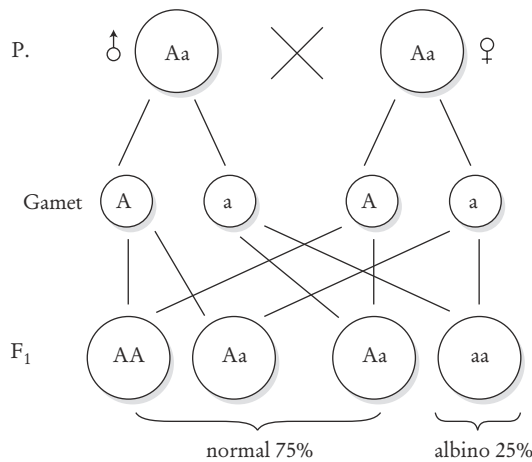
Albino disebabkan karena tubuh seseorang tidak mampu membentuk enzim pengubah tirosin menjadi pigmen melanin yang dikendalikan oleh gen resesif *a*. Dengan demikian, orang normal memiliki genotipe AA atau Aa. Orang albino memiliki gen *aa*, homozigot. Karena orang albino tidak memiliki pigmen melanin, rambutnya putih mata pun tidak berpigmen sehingga tidak tahan cahaya matahari, perhatikan Gambar 3.34.

Seorang anak albino dapat lahir dari:

- 1) pasangan suami istri normal yang keduanya heterozigot;
- 2) pasangan suami istri yang salah satu albino, sedangkan yang lain normal heterozigot;
- 3) pasangan suami istri albino.

Contoh

Perkawinan dari pasangan yang keduanya normal heterozigot.



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.35 Diagram perkawinan antara dua orang normal heterozigot untuk albino

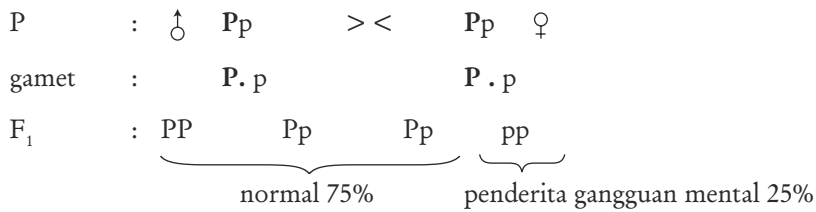
b) Gangguan Mental

Beberapa gejala kemunduran mental diwariskan orangtua kepada anak-anaknya. Salah satu penyakit gangguan mental yang disebabkan faktor genetik, yaitu ketidakmampuan seseorang membentuk enzim phenylalanin hidroksilase yang mengubah phenylalanin menjadi tirosin. Penyakit menurun ini dikendalikan oleh gen resesif penderita yang memiliki genotipe homozigot resesif pp, orang normal memiliki genotipe PP dan Pp.

Gangguan mental ini menunjukkan beberapa gejala, antara lain:

- 1) menampakkan kebodohan;
- 2) reaksi refleks lambat;
- 3) warna rambut dan kulit kekurangan pigmen;
- 4) umumnya tidak berumur panjang dan jarang dapat mempunyai keturunan;
- 5) apabila urinenya direaksikan dengan ferioksida akan berwarna hijau kebiruan karena dalam urinenya banyak terkandung derivat phenol-ketonuria (PKU).

Penderita sindroma PKU (gangguan mental) lahir dari ayah dan ibu normal:

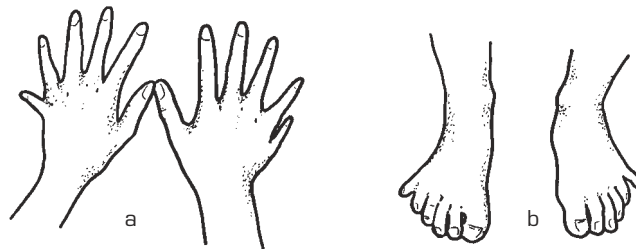


Tugas 3.11

Pada orang normal senyawa PKU (Phenyl keto Urinaria) tidak ditemukan, tetapi pada orang yang menderita gangguan mental dalam urinenya mengandung zat tersebut mengapa demikian? Diskusikan dengan teman-temanmu.

c) *Polidaktili (Jari Lebih)*

Polidaktili merupakan suatu kelainan yang diwariskan orangtua pada anak-anaknya melalui gen autosom dominan. Penderita polidaktili memiliki jari lebih (tambahan jari) pada satu atau dua tangan dan pada kakinya. Tempat jari tambahan itu berbeda-beda, ada yang dekat ibu jari ada pula yang dekat kelingking. (perhatikan Gambar 3.36)



Gambar 3.36 a. polidaktili pada kedua tangan
b. polidaktili pada kedua kaki

Sumber: *Biology*, Barrett

Individu normal bergenotipe homozigot resesif, sedangkan penderita polidaktili bergenotipe homozigot dominan dan heterozigot. Individu heterozigot, derajat ekspresi gen berbeda-beda sehingga tempat tambahan jari bervariasi.

Contoh

Jika seorang wanita normal menikah dengan seorang laki-laki polidaktili heterozigot, bagaimanakah keturunannya?

P : ♂ Pp > < pp ♀
 gamet : P p
 P P
 F₁ : Pp, Pp pp, pp
 ⏟ ⏟
 Polidaktili Normal
 50% 50%

d) *Brakidaktili (Jari Pendek)*



Sumber: *Biology*, Barrett

Penderita brakidaktili memiliki tulang-tulang palanger (ruas jari) pendek, sehingga jari-jari pendek, baik jari-jari tangan maupun jari-jari kaki, lihat Gambar 3.37.

Brakidaktili dikendalikan oleh gen dominan, yang dalam keadaan homozigot bersifat letal, dalam keadaan heterozigot menderita brakidaktili. Orang yang normal memiliki genotipe homozigot resesif.

Gambar 3.37 Jari-jari tangan penderita brakidaktili

P : Br br > < Br br
 Gamet : Br Br
 br br
 F₁ : Br Br, Br br, Br br, br br
 ⏟ ⏟ ⏟
 letal brachydactily normal

e) *Sindaktili*

Penderita sindaktili memiliki jari-jari tangan atau kaki ada yang saling berdekatan. Cacat bawaan ini dikendalikan oleh gen dominan. Penderita sindaktili dapat lahir dari perkawinan antara 2 orang yang masing-masing sindaktili atau salah satunya carier sindaktili.

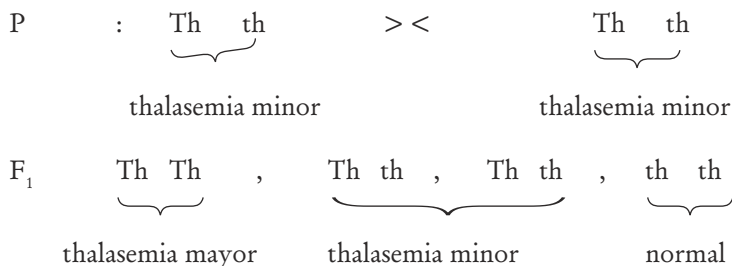
f) *Thalasemia*

Penderita thalasemia memiliki bentuk eritrosit yang bervariasi, ada yang kecil, lonjong dan karena bentuknya yang demikian menyebabkan afinitasnya terhadap oksigen sangat rendah, sedangkan kadar leukosit, bilirubin, dan Fe cukup tinggi.

Penderita thalasemia dapat dikenali dengan gejala-gejala sebagai berikut.

- Limpa dan hati membesar.
- Pertumbuhan tulang tengkorak dan muka menebal sehingga terlihat aneh.
- Wajah sembab dengan pangkal hidung terbenam.
- Daya tahan tubuh rendah.

Thalasemia dikendalikan oleh gen dominan. Individu bergenotipe homozigot dominan adalah penderita thalasemia yang parah (thalasemia mayor), sedangkan heterozigot penderita thalasemia ringan (thalasemia minor) dan individu normal bergenotipe homozigot resesif.



Cacat atau penyakit bawaan lainnya adalah sebagai berikut.

- Anemia sel sabit (*Sickle Cell Anemia*).
- Katarak.
- Cystinuria (ekskresi asam amino sistem berlebihan).

2) *Cacat atau Penyakit Bawaan yang Tertaut Seks*

Cacat atau penyakit bawaan yang tertaut seks, di antaranya hemofili, buta warna, dan anodontia.

a) *Hemofili*

Hemofili merupakan penyakit bawaan yang menyebabkan darah seseorang sukar membeku jika terjadi luka. Hal ini terjadi karena tubuh orang tersebut tidak mampu membentuk tromboplastin, yaitu suatu substansi yang diperlukan untuk pembekuan darah. Keadaan ini terjadi karena seseorang tidak memiliki zat antihemofili globulin atau komponen plasma tromboplastin.

Hemofili merupakan sifat resesif yang tertaut pada kromosom seks X. Berdasarkan hal tersebut, genotipe perempuan dan laki-laki normal atau hemofili adalah sebagai berikut.

- 1) $X^H X^H$ = perempuan normal.
- 2) $x^H X^h$ = perempuan normal heterozigot (pembawa).
- 3) $X^h X^h$ = perempuan hemofili letal.
- 4) $X^H Y$ = laki-laki normal.
- 5) $X^h Y$ = laki-laki hemofili.

Perempuan hemofili hanya ada secara teori karena perempuan hemofili mati sebelum dilahirkan (letal). Agar lebih memahami hal tersebut, pelajari contoh-contoh berikut.

Bagaimanakah kemungkinan anak-anak yang lahir dari berbagai tipe perkawinan?

- (1) Ibu normal ($X^H X^H$) dengan bapak normal $X^H Y$.

♀ \ ♂	X^H	Y
X^H	$X^H X^H$	$X^H Y$
X^H	$X^H X^H$	$X^H Y$

Kemungkinan hasil perkawinannya adalah =100% anak-anaknya normal. (Karena tidak ada yang membawa sifat hemofili).

- (2) Ibu pembawa (carier) $X^H X^h$ dengan bapak normal.

♀ \ ♂	X^H	Y
X^H	$X^H X^H$	$X^H Y$
X^h	$X^H X^h$	$X^h Y$

Kemungkinan anak-anaknya adalah:

$X^H X^H$ = perempuan normal 25%

$X^H Y$ = laki-laki normal 25%

$X^H X^h$ = perempuan carier 25%

$X^h Y$ = laki-laki hemofili 25%

- (3) Ibu normal $X^H X^H$ dengan bapak penderita $X^h Y$.

♀ \ ♂	X^h	Y
X^H	$X^H X^h$	$X^H Y$
X^H	$X^H X^h$	$X^H Y$

Kemungkinan anak-anaknya adalah:

$X^H X^h$ = perempuan carier 50%

$X^H Y$ = laki-laki normal 50%

Tugas 3.12

Bagaimanakah kemungkinan anak-anak yang dilahirkan dari perkawinan:

- 1) Ibu carier dengan bapak hemofili?
- 2) Ibu penderita hemofili dengan bapak normal?

b) Buta Warna

Buta Warna merupakan penyakit atau kelainan pada penglihatan seseorang dalam membedakan warna.

Penderita buta warna dibedakan menjadi dua, yaitu:

- (1) **Buta warna partial.** Penderita buta warna partial tidak dapat mengenal warna tertentu, misalnya warna hijau atau warna merah.
- (2) **Buta warna total.** Penderita buta warna sehingga dalam penglihatannya alam ini tampak seperti film hitam putih.

Buta warna dikendalikan oleh gen resesif *cb* (*colour blind*) yang tertaut pada kromosom seks X. Berdasarkan hal tersebut, kemungkinan genotipe yang ada sebagai berikut.

XX = perempuan normal.

XX^{cb} = perempuan carier.

X^{cb}X^{cb} = perempuan buta warna.

XY = laki-laki normal.

X^{cb}Y = laki-laki buta warna.

Dari berbagai genotipe tersebut dapat dijumpai berbagai tipe perkawinan.

Contoh

- 1) Ibu normal menikah dengan bapak normal. Kemungkinan anak-anaknya yang lahir 100% normal karena keduanya tidak membawa gen buta warna.
- 2) Ibu carier (pembawa) menikah dengan bapak normal

♀ \ ♂	X	Y
X	XX	XY
X ^{cb}	X ^{cb} X	X ^{cb} Y

Kemungkinan anak-anak yang lahir.

XX = perempuan normal 25%

XY = laki-laki normal 25%

XX^{cb} = perempuan carier 25%

X^{cb}Y = laki-laki buta warna 25%

Catatan:

Perempuan carier memiliki penglihatan normal, tetapi dia dapat menurunkan sifat buta warna.

- (3) Ibu normal menikah dengan bapak buta warna.

♀ \ ♂	X^{cb}	Y
X	XX^{cb}	XY
X	XX^{cb}	XY

Kemungkinan anak-anak yang lahir.

XX^{cb} = perempuan carier 50%

XY = laki-laki normal 50%

Tugas 3.13

Bagaimana kemungkinan anak-anak yang lahir dari pernikahan

- 1) Ibu carier dengan bapak penderita buta warna?
- 2) Ibu penderita buta warna dengan bapak penderita buta warna?

Buatlah diagram seperti pada contoh.

c) *Anodontia*

Penyakit atau cacat lain yang tertaut pada kromosom seks adalah *Anodontia* yang dikendalikan oleh gen resesif yang tertaut pada kromosom X. Penderita anodontia tidak memiliki bakal gigi di dalam tulang rahangnya sehingga giginya tidak tumbuh (ompong).

Selain gen yang tertaut pada kromosom seks X, terdapat pula penyakit atau cacat yang diwariskan kromosom seks Y, yang dinamakan gen holondrik. *Hypertrichosis* merupakan penyakit yang dikendalikan gen resesif.

Penderita *hypertrichosis* mengalami pertumbuhan rambut berlebihan di tepi daun telinga. Keadaan ini banyak dijumpai pada masyarakat India atau Pakistan, lihat Gambar 3.38.



Gambar 3.38
Penderita Hypertrichosis

c. Golongan Darah

Mengetahui golongan darah seseorang mempunyai arti penting, tidak hanya pada waktu tranfusi, lebih dari itu juga karena golongan darah bersifat herediter (keturunan). Dewasa ini telah ditemukan beberapa sistem golongan darah.

1) Sistem A-B-O

Pada tahun 1901, Dr. Karl Landsteiner menemukan 4 golongan darah pada manusia, yaitu A, B, AB, dan O, yang didasarkan atas macam antigen yang dibentuk dalam eritrosit.

Menurut *Bernstein* (Jerman) dan *Furuhata* (Jepang) bahwa golongan darah pada setiap individu dikendalikan oleh alel ganda. Alel tersebut diberi nama I (baca: i) berasal dari kata isoaglutinogen yang berarti menggumpalkan sesamanya.

Orang yang mampu membentuk antigen A memiliki gen (alel) I^A

Orang yang mampu membentuk antigen B memiliki gen (alel) I^B

Orang yang mampu membentuk antigen A dan B memiliki gen (alel) I^A dan I^B .

Adapun yang tidak mampu membentuk antigen sama sekali memiliki alel atau gen resesif i .

Interaksi antara gen I^A, I^B , dan i menyebabkan terjadinya 4 fenotipe golongan darah, seperti tertulis dalam tabel berikut.

Tabel 3.8 Genotipe golongan darah sistem A, B, O

Golongan darah (Fenotipe)	antigen dalam eritrosit	Gen dalam kromosom	Genotipe
O	-	i	ii
A	A	I^A	$I^A I^A / I^A i$
B	B	I^B	$I^B I^B / I^B i$
AB	A dan B	I^A dan I^B	$I^A I^B$

Pewarisan alel ganda tersebut serta kemungkinan golongan darah anak-anak yang dilahirkan, dapat dipelajari dari contoh-contoh perkawinan berikut.

a) Bagaimanakah kemungkinan golongan darah anak-anak yang lahir dari pasangan suami istri bergolongan darah O?

P : Golongan darah O \times Golongan darah O
 ii ii

F_1 :

♀ \ ♂	i	i
i	ii	ii
i	ii	ii

Anak-anak yang lahir 100% bergolongan darah O.

- b) Seorang laki-laki bergolongan darah A menikah dengan seorang perempuan bergolongan darah O. Bagaimanakah kemungkinan golongan darah anak-anak mereka?

Jawab:

- (1) Kemungkinan 1 (ayah homozigot)

P : Golongan darah A \times Golongan darah O
 $I^A I^A$ ii

♀ \ ♂	I^A	I^A
i	$I^A i$	$I^A i$
i	$I^A i$	$I^A i$

Anak-anak lahir 100% bergolongan darah A (heterozigot)

- (2) Kemungkinan 2 (ayah heterozigot)

P : Golongan darah A \times Golongan darah O
 $I^A i$ ii

♀ \ ♂	I^A	i
i	$I^A i$	ii
i	$I^A i$	ii

Anak-anak yang lahir 50% bergolongan darah A (heterozigot), 50% bergolongan darah O.

- c) Laki-laki bergolongan darah A menikah dengan pasangannya yang bergolongan darah B. Bagaimanakah kemungkinan golongan darah anak-anaknya yang lahir?

Jawab:

(Jika kedua ayah dan ibu homozigot)

P : Golongan darah A \times Golongan darah B
 $I^A I^A$ $I^B I^B$

♀ \ ♂	I^A	I^A
I^B	$I^A I^B$	$I^A I^B$
I^B	$I^A I^B$	$I^A I^B$

Anak-anak yang lahir bergolongan darah AB 100%.

- d) Carilah kemungkinan golongan darah anak yang lahir jika:
- Ayah golongan darah A heterozigot dengan ibu golongan darah B homozigot.
 - Ayah golongan darah A homozigot dengan ibu golongan darah B heterozigot.
 - Ayah golongan darah A heterozigot dengan ibu golongan darah B heterozigot.

2) Sistem M-N

Pada tahun 1927, Landsteiner dan Levine menemukan adanya golongan darah pada manusia, yaitu M, MN, dan N. Masing-masing disebabkan karena adanya antigen M, MN, dan N. Jika dilakukan tranfusi darah antara ketiga golongan tersebut, tidak akan terjadi penggumpalan karena ketiga antigen ini tidak membentuk zat anti-M maupun anti-N. Namun, jika antigen ini disuntikkan ke dalam tubuh kelinci, akan membentuk antibodi berupa anti-M atau anti-N. Dengan demikian, apabila serum kelinci yang mengandung antibodi disuntikkan ke dalam tubuh manusia, dapat menimbulkan penggumpalan. Oleh karena itu, antiserum dari kelinci ini dapat digunakan untuk menguji golongan darah seseorang.

Jika dilakukan tes dengan antiserum yang mengandung anti-M, tampak adanya penggumpalan, sedangkan dengan anti-N tidak orang tersebut bergolongan darah M. Jika antiserumnya mengandung anti-N terjadi penggumpalan, sedangkan dengan anti-M tidak: golongan darah orang tersebut adalah N. Akan tetapi, jika disuntikkan antiserum yang mengandung anti-M dan anti-N mengalami penggumpalan, golongan darah orang tersebut adalah MN.

Menurut K. Landsteiner dan Levine, terbentuknya antigen M ditentukan oleh gen L^M , sedangkan antigen N ditentukan oleh gen L^N dan antigen MN ditentukan oleh gen $L^M L^N$. Pada alel ini tidak dikenal dominansi sebab gen L^M dan L^N merupakan gen kodominan, tetapi genotipe $L^M L^N$ tidak menampilkan ekspresi intermedier, tetapi menampilkan fenotipe baru.

Berdasarkan uraian di atas, fenotipe dan genotipe golongan darah seseorang dalam sistem M-N adalah sebagai berikut.

Tabel 3.9 Kemungkinan fenotipe dan genotipe dalam sistem M-N

Golongan darah (fenotipe)	Antigen dalam eritrosit	Genotipe
M	M	$L^M L^M$
N	N	$L^N L^N$
MN	M dan N	$L^M L^N$

Contoh

Bagaimanakah kemungkinan golongan darah anak-anak yang lahir dari seorang ayah bergolongan N dan ibu bergolongan darah MN.

Jawab:

P : Golongan darah N \times Golongan darah M
 $L^N L^N$ $L^M L^N$

♀ \ ♂	L^N	L^N
L^M	$L^M L^N$	$L^M L^N$
L^N	$L^N L^N$	$L^N L^N$

Anak yang lahir:
bergolongan darah MN 50%
bergolongan darah N 50%

Tugas 3.14

Carilah bagaimana kemungkinan golongan darah anak-anak yang lahir apabila kedua orangtuanya bergolongan darah MN!

Dalam keadaan sehari-hari, seperti tranfusi, golongan darah yang dikenal adalah sistem A-B-O. Namun, dalam keadaan tertentu, seperti dalam analisis genetik sering digabungkan sistem A-B-O dengan sistem M-N untuk mengidentifikasi seseorang.

Penggabungan ini sangat berarti dalam bidang hukum peradilan. Karena dalam penggabungan kedua sistem A-B-O dan M-N orang yang semula hanya dapat dikelompokkan atas 4 golongan sekarang menjadi 12 kelompok. Dengan demikian, memudahkan penyelidikan karena bidang penentuannya semakin sempit.

3) Sistem Rhesus

Pada tahun 1940, K. Landsteiner dan A. S. Weiner menemukan antigen dalam darah *Macacus rhesus* (sejenis kera yang terdapat di India). Antigen ini dikenal sebagai antigen *rhesus* atau faktor *rhesus* (Rh), yang juga ditemukan dalam sel darah manusia.

Berdasarkan ada atau tidaknya antigen rhesus, darah manusia dibedakan menjadi dua golongan, yaitu:

- golongan rhesus positif (Rh⁺) yang di dalam eritrositnya ditemukan antigen rhesus;
- golongan rhesus negatif (Rh⁻) yang di dalam eritrositnya tidak ditemukan antigen rhesus.

Menurut K. Landsteiner, adanya antigen rhesus dikendalikan oleh gen Rh yang bersifat dominan terhadap gen rh alelnya.

Tabel 3.10 Fenotipe dan genotipe pada sistem rhesus

Fenotipe	Genotipe
Gol. Rh ⁺	Rh Rh atau Rh rh
Gol. Rh ⁻	rh rh

Jika dilakukan tranfusi darah dari donor yang memiliki Rh⁺ kepada resipien yang memiliki Rh⁻, akan merangsang pembentukan antibodi Rh⁺. Apabila pada kemudian hari resipien tersebut mendapat tranfusi darah Rh⁺ untuk yang kedua kalinya, akan terjadi aglutinasi dan dapat menyebabkan kematian. Hal ini terjadi karena antibodi Rh⁺ yang terbentuk akan beraglutinasi dengan antigen Rh⁺. Sebaliknya, jika orang yang memiliki Rh⁺ menerima darah dari donor yang memiliki Rh⁻, tidak menimbulkan aglutinasi karena orang yang bergolongan Rh⁻ tidak mengandung antibodi Rh⁺.

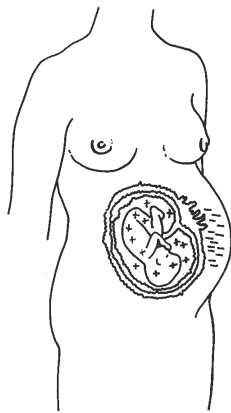
Stimulasi pembentukan antibodi dapat pula terjadi melalui perkawinan. Jika seorang wanita Rh⁻ menikah dengan pasangannya yang Rh⁺ (homozigot) akan memperoleh fetus (bayi dalam rahim ibu) yang memiliki Rh⁺ (heterozigot).

P : ♀ rh rh >< Rh Rh ♂
 (Rh negatif) (Rh positif)
 Gamet : rh Rh
 F₁ : Rh rh (Rh positif)

Perbedaan golongan rhesus antara ibu dan fetus yang dikandungnya dapat menyebabkan peristiwa *maternal foetal incompatibility*, yaitu ketidaksesuaian darah antara ibu dan fetus, akibat terbentuknya antibodi Rh⁺ pada tubuh ibu yang bergolongan Rh⁻. Antibodi Rh⁺ yang terbentuk pada tubuh ibu merupakan tanggapan (reaksi) dari masuknya eritrosit fetus ke tubuh ibu melalui plasenta. Selanjutnya jika antibodi Rh⁺ ini akan bertemu dengan antigen Rh⁺ yang terdapat pada eritrosit fetus sehingga akan terjadi aglutinasi.

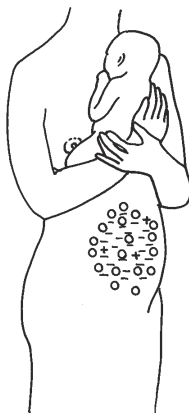
Keadaan ini dapat menyebabkan *erythroblastosis fetalis*, yaitu anemia yang parah yang disebabkan oleh hemolisis sel darah merah (eritrosit) sehingga di dalam darah beredar eritroblas, yaitu eritrosit yang belum dewasa. Jika tidak segera mendapatkan tranfusi, akan menyebabkan kematian.

Dalam keadaan normal tidak terjadi pertukaran darah antara ibu dan fetus di dalam kandungan. Pecahnya kapiler dalam plasenta karena sesuatu hal dapat menyebabkan perembesan darah fetus ke dalam peredaran darah ibu, yang memacu diproduksinya antibodi, perhatikan Gambar 3.39.

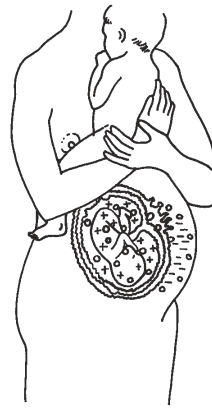


darah Rh⁺
pada fetus

darah Rh⁻
pada ibu



Ibu bergolongan darah Rh⁻ membentuk antibodi untuk melawan darah Rh⁺ antigen



Antibodi yang dibentuk ibu melintasi plasenta dan selanjutnya akan menunjukkan antigen Rh⁺ bayi

Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.39 Peristiwa terjadinya erythroblastosis fetalis

Bayi *erythroblastosis fetalis* ditandai dengan tubuh mengembung, hati dan limpa membengkak, kulit berwarna kuning akibat banyaknya empedu yang tertimbun di dalam darah yang berasal dari perombakan eritrosit menjadi bilirubin.

Pada umumnya anak yang pertama dapat lahir dengan selamat karena pembentukan anti Rh⁺ berlangsung perlahan-lahan. Akan tetapi, jika ibu tersebut mengandung lagi dengan fetus Rh⁺, jumlah anti Rh⁺ dalam serum darah sudah bertambah sehingga dapat menghancurkan eritrosit fetus yang dapat menyebabkan kematian

Contoh

- 1) Bagaimana kemungkinan golongan darah anak-anak yang lahir dari seseorang ayah yang Rh⁺ heterogen dengan seorang ibu yang Rh⁻?

Jawab:

P : Rh rh >< rh rh

♀ \ ♂	Rh	rh
rh	Rh rh	rh rh
rh	Rh rh	rh rh

Anak-anak yang lahir:
bergolongan darah Rh⁺ 50%
bergolongan darah Rh⁻ 50%

2) Jika seorang ibu mempunyai Rh⁺ (homozigot) menikah dengan pasangannya yang Rh⁻, bagaimanakah golongan darah anak-anaknya?

P : Rh Rh >< rh rh

♀ \ ♂	rh	rh
Rh	Rh rh	Rh rh
Rh	Rh rh	Rh rh

Anak-anak yang lahir bergolongan darah Rh⁺ (heterozigot) 100%

Tugas 3.15

Carilah kemungkinan golongan darah anak-anak yang lahir dari pasangan suami istri yang keduanya mempunyai Rh⁺ (heterozigot).

KEGIATAN 3.4

Membuat Peta Silsilah

1. Buatlah peta silsilah keluargamu tentang golongan darah, mulai dari kakek-nenek dari ayah; kakek-nenek dari ibu; ayah-ibu, serta beserta adik dan kakakmu sekandung.
2. Jawablah pertanyaan berikut ini.
 - a. Ada berapa macam golongan darah yang kamu temukan?
 - b. Golongan darah mana yang paling banyak?
 - c. Buatlah diagram persilangan?

d. Usaha Menghindari Penyakit Menurun

Ada beberapa macam cara yang dapat digunakan untuk menghindari terjadinya penyakit menurun, yaitu *Eugenetika* dan *Eunetika*. Eugenetika merupakan usaha menghindari penyakit menurun melalui penggunaan hukum genetika, misalnya dengan menggunakan pedigree atau peta silsilah. Eunetika adalah usaha menghindari penyakit menurun melalui perbaikan kualitas hidup, misalnya peningkatan gizi, kebersihan lingkungan, dan olahraga.

Ahli genetika juga menyarankan cara-cara praktis untuk menghindari munculnya penyakit menurun, di antaranya:

1. menghindari menikah dengan seseorang yang masih mempunyai hubungan darah dekat;
2. memeriksakan kesehatan beserta riwayatnya bagi calon pengantin;
3. menghindari terjadinya perkawinan orang-orang yang menderita penyakit keturunan;
4. mempelajari hukum-hukum pewarisan sifat.

E. Mutasi

Suatu kenyataan bahwa keanekaragaman merupakan fenomena penting dalam dunia kehidupan. Keanekaragaman berasal dari proses evolusi yang didasari oleh perubahan-perubahan genetis. Perubahan genetis tersebut diwujudkan dalam bentuk kelainan-kelainan tertentu, misalnya cacat lahir, dan kembar siam.

Perubahan dalam organisasi materi genetik yang dapat diproduksi dan diwariskan kepada generasi berikutnya disebut mutasi. Perubahan ini dapat terjadi hanya pada satu atau beberapa nukleotida dan dapat pula melibatkan seluruh set kromosom. Proses replikasi DNA sangat cermat dan teratur, tetapi kesalahan dapat saja terjadi, seperti kesalahan urutan nukleotida, pengulangan nukleotida, atau ikatan yang salah antara unit-unit sehingga dapat mengakibatkan perubahan dalam informasi genetik. Kesalahan ini digandakan pada saat replikasi dan diwariskan kepada generasi berikutnya sebagai suatu mutasi.

Mutasi merupakan sumber penting untuk semua sumber genetik. Tanpa mutasi, semua gen hanya akan terdapat dalam satu bentuk sehingga alel-alelnya tidak ada. Beberapa tingkat mutasi penting untuk mendapatkan variabilitas genetik agar makhluk hidup dapat beradaptasi terhadap lingkungan yang baru. Contoh mutasi dapat dilihat pada Gambar 3.40.



Sumber: *Exploring Biology*, Smith

Gambar 3.40
Domba hasil mutasi yang memiliki kaki yang pendek

Mutasi pertama kali dilaporkan oleh Seth Wright (1870) yang melihat adanya kelainan pada kaki anak domba. Kaki anak domba tersebut lebih pendek dibandingkan dengan kaki domba-domba lainnya. Selanjutnya domba berkaki pendek ini dapat mengembangkan keturunannya dan disebut domba jenis *Ancon*.

Hugo de Vries (1901) yang pertama kali menggunakan istilah “mutasi” dalam bukunya *The Mutation Theory*, mengemukakan adanya perubahan fenotipe yang diturunkan pada bunga *Oenothera lamarckiana*. Perubahan pada bunga tersebut, sekarang diketahui karena adanya variasi jumlah kromosom.

Penelitian ilmiah lebih lanjut tentang mutasi dilakukan oleh Morgan (1910), yang mengemukakan adanya *Drosophila melanogaster* (lalat buah) bermata putih di antara lalat jantan lainnya yang bermata merah.

Berdasarkan tempat terjadinya, mutasi pada jaringan tubuh dibedakan menjadi dua golongan.

1. Mutasi somatik, terjadi pada sel-sel somatik (sel tubuh) dan mutasi ini diwariskan pada sel-sel somatik saja.
2. Mutasi germinal, terjadi pada sel-sel kelamin (sel sperma atau sel telur). Perubahan mutasinya dapat diwariskan kepada generasi berikutnya. Jika mutasi tersebut menghasilkan sifat dominan, sifat tersebut akan terekspresikan pada keturunannya, tetapi jika resesif, ekspresinya akan tersembunyi.

1. Macam-Macam Mutasi dan Penyebabnya

Perubahan materi hereditas pada satu atau beberapa nukleotida DNA di dalam gen, disebut *mutasi gen* atau *mutasi titik (point mutation)*. Perubahan yang meliputi struktur atau jumlah kromosom disebut *mutasi kromosom* atau *aberasi kromosom (gross mutation)*, sedangkan organisme yang mengekspresikan fenotipe baru sebagai hasil mutasi disebut *mutan*. Berdasarkan tingkat terjadinya, dikenal dua jenis mutasi, yaitu mutasi gen dan mutasi kromosom.

a. Mutasi Gen (*Point Mutation*)

Mutasi gen terjadi pada susunan molekul DNA-nya bukan pada lokus atau bagian lain dari kromosom. Perubahan-perubahan dalam bentuk struktur kimia seperti disebutkan di atas, tidak mengganggu bentuk maupun jumlah kromosom, tetapi menimbulkan perubahan *RNA-m* dan sebagai akibat mengubah protein atau enzim yang disusun sehingga menghasilkan fenotipe yang berbeda, perhatikan Gambar 3.41. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan pada basa-basa yang dapat memengaruhi DNA dengan cara yang sangat berbeda, yaitu sebagai berikut.

1) *Mutasi Substitusi (penggantian basa)*

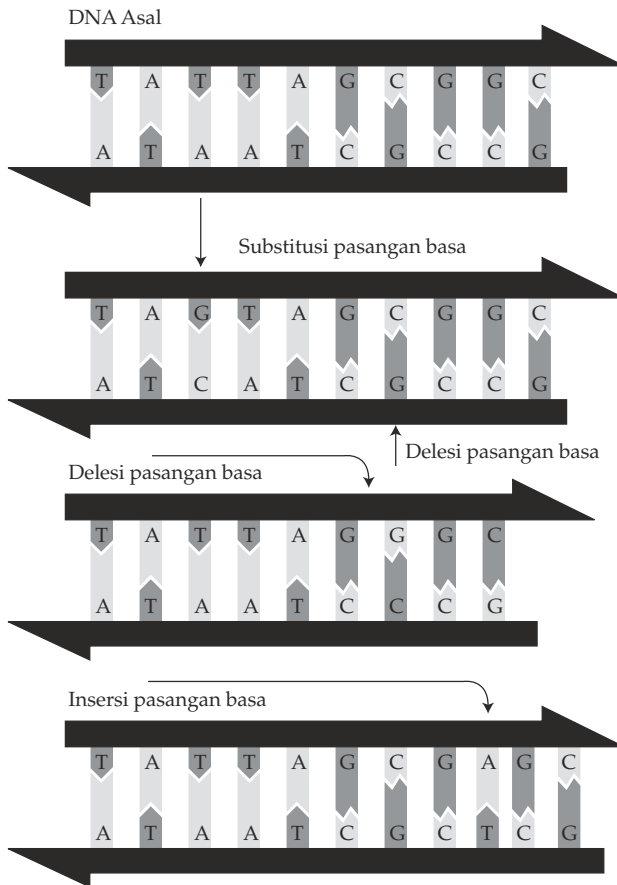
Mutasi substitusi atau penggantian basa terdiri atas:

- a) transisi, jika basa purin (Adenin) diganti dengan basa purin yang lain (Guanin) atau basa pirimidin (Timin) diganti dengan pirimidin yang lain (Sitosin);
- b) transversi, jika basa purin (Adenin, Guanin) diganti dengan pirimidin (Sitosin, Timin) atau sebaliknya.

2) *Mutasi Pergeseran Kerangka (frame shift)*

Mutasi pergeseran kerangka meliputi:

- a) delesi: jika pengurangan satu atau lebih pasangan basa nitrogen;
- b) insersi: jika terjadi penyisipan satu atau lebih pasangan basa nitrogen yang terdapat pada molekul DNA. Perhatikan Gambar 3.41.

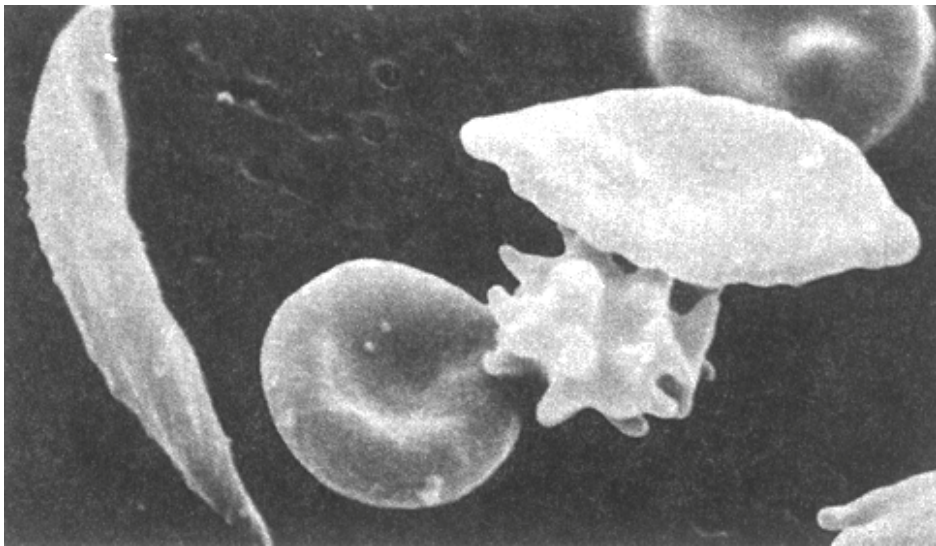


Sumber: *Biological Science*, Green

Gambar 3.41 Mutasi gen

3) *Transposon*

Transposon adalah loncatan potongan DNA ke tengah-tengah gen. Transposon mengacaukan fungsi beberapa gen. Beberapa kelainan atau penyakit akibat mutasi gen, di antaranya anemia sel sabit (*sickle cell anemia*). Penyakit *sickle cell* atau sel sabit adalah suatu bentuk abnormalitas pada eritrosit yang diturunkan oleh gen resesif. Molekul hemoglobin sel sabit mengendap apabila mengalami kekurangan oksigen, membentuk agregat kristal sehingga mengubah bentuk eritrosit menjadi sel sabit seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.42. Sel-sel ini menyumbat kapiler dan menghambat transfer oksigen ke berbagai jaringan. Hal ini dapat menyebabkan kematian.



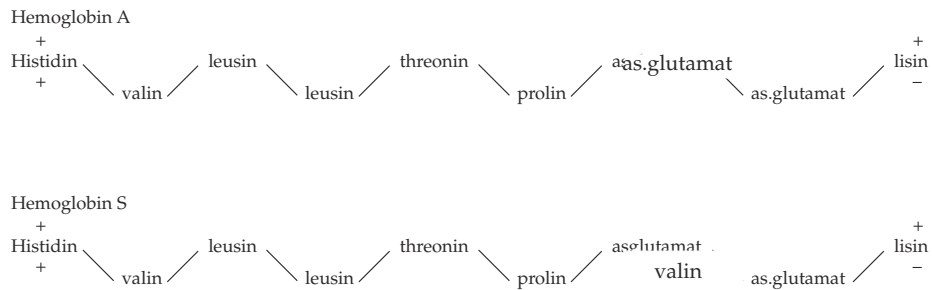
Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.42 Eritrosit pada penderita *sickle cell*

Penelitian secara kimiawi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara hemoglobin normal (hemoglobin A) dan hemoglobin penderita sel sabit (hemoglobin S). Perbedaan tersebut terletak pada satu asam amino yang menyusun molekul hemoglobin.

Asam amino yang ke-6 dari ujung terminal amino (NH_2^-) pada hemoglobin A adalah *asam glutamat* (bermuatan negatif), sedangkan pada hemoglobin S pada tempat yang sama terdapat *valin* (tidak bermuatan pada pH netral). Dengan demikian, perubahan asam amino tunggal dalam satu polipeptida dapat menimbulkan kelainan.

Jika diperhatikan kode triplet pada DNA penderita, tampak bahwa pasangan basa A - T karena mutasi berubah menjadi T - A sehingga kodon pada RNA-m berubah dari GAG (asam glutamat) menjadi GUG (valin). Untuk memahami hal tersebut, perhatikan Gambar 3.43 berikut.

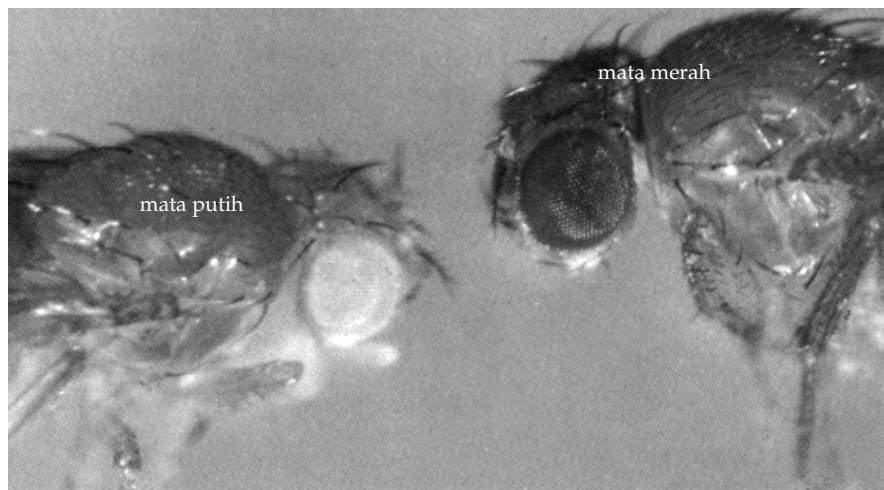


Sumber: *Biological Science*, Green

Gambar 3.43 Perbedaan antara hemoglobin A dan hemoglobin S

Contoh cacat atau penyakit lain akibat terjadinya mutasi gen, yaitu:

- 1) albinisme pada manusia;
- 2) macam-macam warna mata pada *Drosophila melanogaster* (lalat buah), perhatikan Gambar 3.44.



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 3.44 *Drosophila melanogaster* dengan warna mata yang berbeda

b. Mutasi Kromosom (*Gross mutation*)

Mutasi kromosom dapat terjadi karena adanya perubahan struktur kromosom atau perubahan jumlah kromosom.

1) *Perubahan Struktur Kromosom*

Struktur kromosom dapat berubah sehingga berbeda dengan struktur kromosom yang normal. Beberapa hal yang menyebabkan perubahan struktur kromosom adalah sebagai berikut.

a) **Delesi atau Defisiensi**

Delesi adalah peristiwa patahnya sebagian segmen kromosom. Pada peristiwa ini kromosom dapat kehilangan satu gen atau lebih. Hal ini menyebabkan terjadi sintesis protein dengan perubahan pada asam aminonya. Kromosom yang tidak memiliki sentromer akan larut di dalam plasma karena gen-gennya tidak berfungsi.

b) **Duplikasi**

Duplikasi adalah peristiwa penambahan patahan segmen kromosom lain yang homolog. Akibat duplikasi segmen, maka akan terdapat lebih dari satu segmen indentik di dalam satu perangkat kromosom.

c) **Inversi**

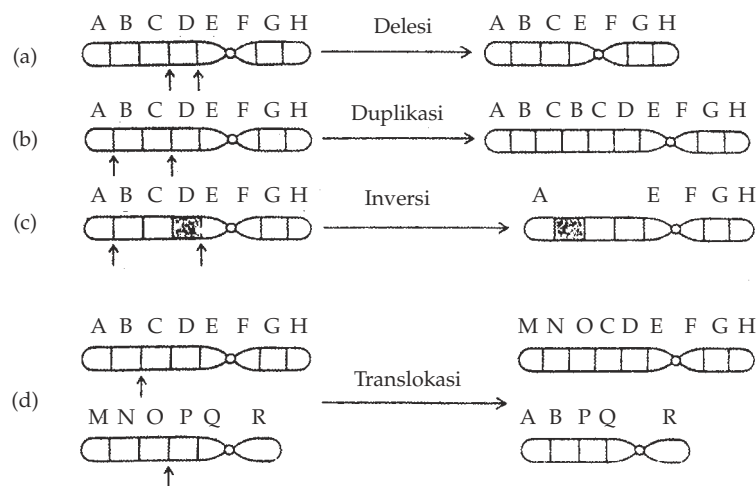
Inversi ialah peristiwa membaliknya beberapa urutan gen dalam suatu kromosom. Hal ini terjadi karena kromosom patah di dua tempat, yang diikuti penyisipan kembali gen-gen tetapi dengan urutan terbalik.

Berdasarkan letak sentromernya, inversi dibedakan atas:

- (a) Inversi parasentris adalah inversi yang terjadi karena dua bagian yang patah terletak pada satu lengan kromosom.
- (b) Inversi perisentris adalah inversi yang terjadi karena dua bagian yang patah masing-masing terletak pada lengan kromosom yang berlainan.

d) **Translokasi**

Translokasi adalah pindahnya potongan segmen kromosom yang satu ke potongan kromosom lain yang bukan homolognya. Berbagai proses mutasi kromosom dapat dilihat pada Gambar 3.45.



Sumber: *Biological Science, Green*

Gambar 3.45 Berbagai proses mutasi kromosom

Sindrom Cri-du-chat



Radiasi salah satu di antaranya sinar X, dapat menyebabkan patahnya kromosom, kalau seandainya hal ini terjadi pada kromosom nomor 5 pada manusia akan menyebabkan bentuk laring menyempit, sehingga pada saat bayi/ anak itu menangis, suaranya seperti kucing.

Sumber: *Biology The Unity and Diversity of Life*, Starr-Taggart

Perubahan struktur kromosom pada manusia sangat merugikan. Sebagai contoh, sindroma *Cri-du-chat* (*cat cry syndrome*) disebabkan oleh delesi pada lengan pendek kromosom nomor 5.

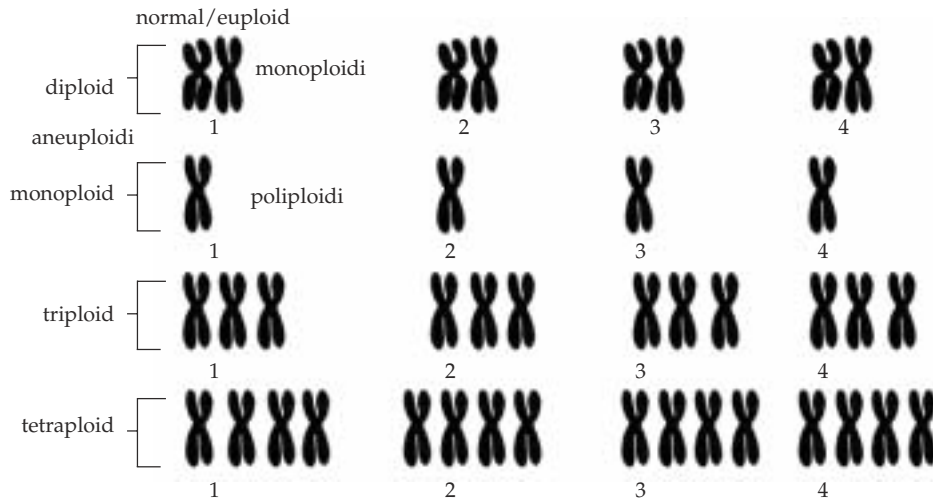
Sindroma *Cri-du-chat* memiliki karakteristik sebagai berikut. Pita suara kecil, epiglotis melengkung sehingga waktu baru lahir tangisannya mirip suara kucing, mengalami keterbelakangan fisik dan mental, bayi kecil dan lemah, otak kecil, muka lebar, hidung mengalami penebalan, IQ berkisar antara 20 – 0. Penderita *cri-du-chat* meninggal pada waktu lahir atau pada masa kanak-kanak.

2) Perubahan Jumlah Kromosom

Setiap jenis organisme memiliki seperangkat kromosom (genom) dengan jumlah tertentu. Sel somatik bersifat diploid atau mengandung *2n kromosom*, sedangkan sel gamet merupakan sel haploid mengandung *n kromosom*. Namun, kadang-kadang terjadi penyimpangan selama mitosis, meiosis, atau waktu fertilisasi sehingga menghasilkan sel-sel dengan kromosom yang lebih atau kurang dari ketentuan tersebut di atas sehingga terjadi perubahan jumlah kromosom. Perubahan jumlah kromosom dibedakan atas perubahan sel (aneuploidi) dan perubahan penggandaan (aneusomi).

a) Aneuploid (Perubahan Jumlah Ploidi)

Aneuploid, yaitu perubahan yang melibatkan seluruh set kromosom. Organisme euploid, memiliki kromosom yang lengkap. Beberapa variasi euploid dapat digambarkan pada diagram berikut.



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.46 Variasi euploid

(1) Monoploid

Organisme monoploid memiliki satu genom (n) di dalam sel tubuhnya, setiap kromosom terdapat dalam jumlah tunggal, seperti tampak dalam Gambar 3.46.

Monoploid pada hewan jarang ditemukan, misalnya pada lebah madu jantan yang tumbuh dari sel telur yang tidak dibuahi partenogenesis. Monoploid ditemukan pula pada sebagian besar mikroorganisme, seperti bakteri, alga, fungi, serta generasi gametofit lumut.

Organisme monoploid umumnya berukuran lebih kecil daripada yang normal ($2n$), viabilitas rendah, dan biasanya steril karena kromosom homolog tidak memiliki pasangan selama meiosis sehingga hasil meiosis kekurangan satu atau beberapa kromosom.

(2) Triploid

Organisme yang memiliki 3 genom ($3n$) dalam sel somatiknya dikelompokkan ke dalam triploid. Organisme triploid umumnya steril.

(3) Tetraploid

Tetraploid, yaitu jika organisme memiliki 4 genom atau 4 perangkat kromosom ($4n$) dalam sel. Individu tetraploid biasanya fertil. Pada tumbuhan tetraploid berwarna lebih gelap karena lebih banyak mengandung klorofil berukuran besar, begitu pula pada buah dan bijinya.

d) Poliploid

Poliploid, yaitu organisme yang memiliki kromosom lebih dari 2 perangkat ($2n$) seperti triploid ($3n$), tetraploid ($4n$), dan pentaploid ($5n$).

Organisme yang lebih dari tetraploid jarang ditemukan dalam populasi alami, tetapi beberapa tumbuhan budi daya ditemukan poliploid (tetraploid), misalnya apel, pisang, kentang, kacang tanah, gandum, dan kopi. Pada hewan, poliploid menimbulkan keadaan tidak seimbang dalam mekanisme penentuan jenis kelamin sehingga mengakibatkan steril.

Beberapa kasus poliploid pada manusia ditemukan, tetapi selalu mengalami keguguran spontan atau lahir mati. Menurut Stern (1973), kira-kira 15% dari kasus keguguran spontan adalah triploid dan tetraploid.

Perubahan perangkat kromosom (genom) dapat terjadi karena:

- (a) autopoliploidi: genom mengganda dengan sendirinya karena adanya gangguan pada meiosis;
- (b) allopoliploidi: terjadi pada hibrid yang berasal dari 2 spesies yang jumlah genomnya berbeda.

(5) Induksi poliploid

Perubahan perangkat dari organisme diploid menjadi organisme poliploid dapat diinduksi dengan cara menghambat pemisahan kromosom. Usaha-usaha yang dilakukan antara lain sebagai berikut.

- (a) Menggunakan suhu tinggi, seperti yang dilakukan pada jagung.
- (b) Sentrifugal (pemusingan) proses pemusingan pada kecambah dapat menyebabkan poliploid, misalnya pada tembakau.
- (c) Bahan-bahan radioaktif seperti sinar X. Radium dapat menyebabkan sel poliploid.
- (d) Senyawa kimia seperti kolkisin, etil merkuri klorida, sulfanilamide dapat menginduksi poliploid pada tumbuhan; senyawa kimia ini akan menghambat pembentukan benang gelendong sehingga kromosom tidak dapat memisah dan akibatnya terjadi duplikasi kromosom.

b) *Aneusomi*

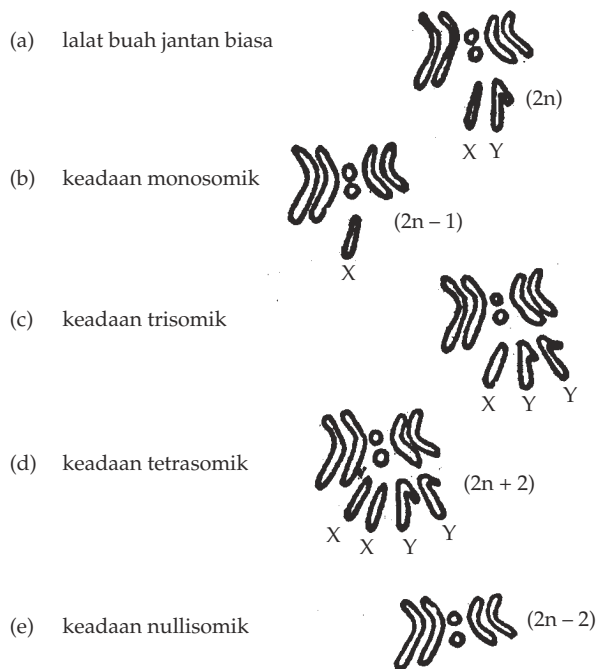
Aneusomi terjadi apabila perubahan melibatkan hanya pada salah satu kromosom di dalam satu set kromosom. Organisme aneusomi memiliki kekurangan atau kelebihan kromosom dibandingkan jumlah kromosom diploid dari spesies tersebut. Hal ini memengaruhi tingginya mortalitas dan rendahnya fertilitas.

Aneusomi dapat terjadi karena beberapa hal sebagai berikut.

- (1) Nondisjungsi (*nondisjunction*), yaitu peristiwa gagal berpisah pada kromosom homolog ketika anafase pada meiosis I.
- (2) Anafase lag, yaitu tidak melekatnya kromatid pada gelendong ketika meiosis.

Aneusomi meliputi:

- (1) monosomik ($2n - 1$): organisme yang kehilangan satu kromosom dari sepotong kromosom homolog disebut monosomi;
- (2) nullisomik ($2n - 2$): organisme yang kehilangan sepasang kromosom homolog, disebut nullisomi; individu nullisomi memiliki viabilitas dan fertilitas yang rendah;
- (3) trisomik ($2 + 1$): organisme yang memiliki satu kromosom tambahan disebut trisomi; pada waktu meiosis menghasilkan 2 macam gamet, yaitu (n) dan ($n + 1$); trisomi ditemukan pada kecubung;
- (4) tetrasomik ($2n + 2$): organisme yang memiliki dua kromosom tambahan disebut tetrasomi; agar lebih memahami hal tersebut, perhatikan gambar berbagai aneuploid pada *Drosophila* berikut ini (Gambar 3.47).



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

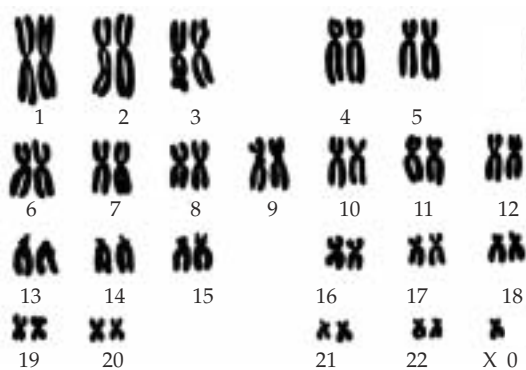
Gambar 3.47 Berbagai macam aneuploid

c) *Aneuploid pada Manusia*

Beberapa contoh aneuploid pada manusia adalah sebagai berikut.

(1) Sindroma Turner ($45, X$)

Penderita Sindroma Turner memiliki 44 autosom dan 1 kromosom X. Oleh karena itu, kariotipenya menjadi $45, X O$ atau $44A + X$. Penderita ini ditemukan H.H. Turner pada 1938. Penderita sindroma Turner berkelamin wanita, tetapi tidak memiliki ovarium, steril, perawakan pendek, pada leher mempunyai gelambir, lihat Gambar 3.48.

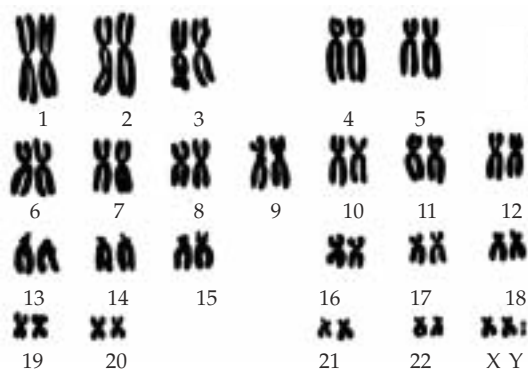


Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.48 Kromosom wanita Sindroma Turner. Perhatikan satu di antara kedua kromosom X hilang

(2) Sindroma Klinefelter (47, XXY)

Penderita mengalami penambahan satu kromosom X terhadap kromosom normal XY sehingga memiliki 44 autosom dan 3 kromosom seks (XXY) susunan kromosom XXY disebabkan fertilisasi ovum XX oleh sperma Y atau ovum X oleh sperma XY. Ditemukan oleh H.H. Klinefelter (1942). Penderita sindroma Klinefelter berkelamin laki-laki, tetapi cenderung kewanitaan, testis kecil, payudara membesar karena penumpukan lemak, mengalami keterbelakangan mental. Keterbelakangan mental selalu ditemukan jika kromosom X lebih dari dua. (Gambar 3.49)



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.49 Kromosom pria Sindroma Klinefelter. Perhatikan kromosom seks bertambah satu menjadi XXY

(3) Sindroma Jacobs (47, XYY)

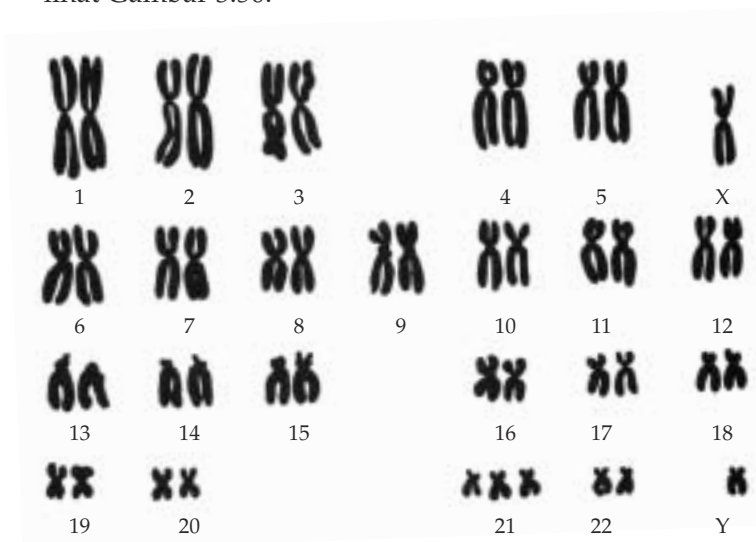
Penderita memiliki tambahan kromosom Y sehingga kariotipenya (47, XYY) atau (22 AA + XYY), ditemukan oleh P.A. Jacobs pada tahun 1965. Ciri-ciri penderita berperawakan tinggi, IQ di bawah normal (80 - 95), bersifat antisosial, agresif, dan sejak kecil menampakkan watak kriminal.

(4) Sindroma Patau

Penderita sindroma Patau memiliki tambahan satu autosom sehingga memiliki kariotipe (47, XX) atau (47, XY). Kelebihan kromosom ini disebut trisomi. Trisomi terjadi mungkin pada kromosom nomor 13 dan 14, atau 15. Karakteristik penderita sindroma Patau adalah berkelamin laki-laki atau wanita dengan kepala kecil, mata kecil, sumbing celah langit-langit, tuli, dan pertumbuhannya terbelakang.

(5) Sindroma Down

Penderita Sindroma Down memiliki satu autosom pada nomor 21 sehingga kariotipenya menjadi (47, XX) atau (47, XY). Ditemukan pertama kali oleh J.L. Down pada tahun 1866. Karakteristik penderita sindroma Down adalah berkelamin laki-laki atau perempuan, tinggi badan \pm 120 cm, kepala lebar dan pendek, lidah besar, jari pendek, dan gemuk terutama kelingking, memiliki lipatan mata mongolism, otak kecil, dan tumbuh tidak sempurna sehingga mengalami keterbelakangan mental. Penderita sindroma Down ada yang idiot (IQ < 25), imbisil (IQ 25 - 49), dan ada yang debil (IQ 50 - 69). Pada umumnya penderita sindroma ini steril, lihat Gambar 3.50.



Sumber: *Advanced Biology*, Clegg

Gambar 3.50 Kromosom pria *Sindroma Down* perhatikan autosom nomor 21

c. Mutagen

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya mutasi dikenal sebagai *mutagenic agent* atau mutagen. Pada umumnya mutagen berupa bahan fisika, kimia, dan biologi yang memiliki daya tembus kuat hingga dapat mencapai

bahan genetis di dalam sel. Namun, selain itu dijumpai pula mutasi yang tidak jelas mutagennya yang diduga berasal dari alam dan akibat kesalahan metabolisme dalam sel.

1) *Mutagen Fisika*

Beberapa mutagen fisika, antara lain sebagai berikut.

- a) Radiasi pengion sinar X, sinar- α , sinar- β , sinar- γ , yang dipancarkan oleh isotop radioaktif. Sinar X merupakan sinar berenergi tinggi yang dapat menembus ke dalam sel dan memiliki dampak sebagai berikut.
 - (1) Energinya yang tinggi jika mengenai DNA menyebabkan kerusakan pada molekul gula fosfat.
 - (2) Menghasilkan radikal bebas yang mempunyai daya reaksi tinggi sehingga dapat merusak sistem perbaikan pada DNA.
- b) Sinar ultraviolet: melepaskan energinya terhadap atom-atom yang dijumpai dan menyebabkan eksitasi sehingga molekul yang mengandung bentuk ion-ion menjadi reaktif.
- c) Sinar kosmis

2) *Mutagen Kimia*

Mutagen kimia berpengaruh terhadap DNA yang sedang bereplikasi maupun yang tidak bereplikasi, antara lain: gas mustard, nitrogen mustard, etil metan sulfonat (EMS), etil etan sulfonat (EES), HNO₂, hidroksil amino (NH₂OH), zat warna akridin, analog basa (5-Bromo urasil dan 2-Aminopurin), analog basa memiliki struktur yang mirip dengan basa normal sehingga dapat melakukan metabolisme dan terikat dengan DNA selama replikasi), pestisida: DDT, BHC, TEM, siklamat (pemanis buatan) banyak dimanfaatkan dalam industri makanan dan minuman.

Selain oleh mutagen fisika dan mutagen kimia di atas, mutasi dapat juga disebabkan oleh virus dan bakteri, yang lebih dikenal dengan sebutan *mutagen biologi*.

d. *Iradiasi*

Walaupun sebagian besar mutasi menyebabkan organisme menjadi kurang efisien karena merugikan, mutasi dan mutagen telah terbukti bermanfaat dalam beberapa hal. Pengembangan sifat-sifat baru yang diinginkan telah dilakukan melalui mutasi induksi dengan radiasi (penyinaran dengan sinar radioaktif).

Proses radiasi suatu bahan untuk tujuan tertentu dengan pancaran elektron dan neutron disebut *irradiasi*. Di antara sinar-sinar radioaktif yang sering digunakan adalah sinar gamma (γ) karena memiliki daya tembus yang besar.

Sumber radiasi dibedakan menjadi dua, yaitu:

- a. radioaktif alami, yang meliputi sinar kosmis, bumi, dan tubuh organisme itu sendiri;
- b. radioaktif buatan, yang dibuat melalui reaksi inti di dalam reaktor atom.

Sinar pengion merupakan salah satu bentuk energi yang jika diserap oleh suatu sistem akan menimbulkan pengaruh pada sistem tersebut.

Berdasarkan pengaruh radioaktivitas pada manusia, Dr. Edward Teele menyusun hipotesis sebagai berikut.

- a. Jika seluruh tubuh dikenai sinar radioaktif sebesar 1.000 Röntgen, hampir dapat dipastikan bahwa orang tersebut akan mati dalam waktu tidak lebih dari satu bulan.
- b. Jika dikenai sinar radioaktif sebesar 400-500 Röntgen, kemungkinan hidup atau mati 50%.
- c. Jika dikenai sinar radioaktif 100 Röntgen, umurnya akan lebih pendek dan segera mati; kemungkinan orang tersebut akan menderita leukemia atau kanker.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa frekuensi radiasi sangat merugikan. Walaupun demikian, pemanfaatan radiasi yang menguntungkan dikembangkan dalam berbagai bidang. Saat ini iradiasi telah dimanfaatkan dalam teknologi pangan, teknologi pertanian, dan pada bidang kedokteran.

1) Iradiasi dalam Bidang Teknologi Pangan

Iradiasi bahan pangan dilakukan dengan berbagai tujuan, antara lain: menghambat pematangan, menunda pematangan buah-buahan, desinfektan serangga, menghilangkan parasit dalam daging segar, menurunkan kandungan mikroba, membunuh mikroba patogen, dan membunuh semua mikroba yang ada.

Kelebihan yang dimiliki iradiasi jika dibandingkan dengan yang menggunakan proses pengawetan yang lain, di antaranya: tidak meninggalkan residu zat kimia pada makanan, kesegaran bahan pangan dapat dipertahankan, dapat dilakukan pada bahan yang telah dikemas, dan tidak menimbulkan polusi pada lingkungan.

2) Iradiasi dalam Bidang Teknologi Pertanian

Iradiasi dalam bidang pertanian dilakukan dengan berbagai tujuan, di antaranya: untuk memperoleh bibit unggul; dan pemberantasan hama dengan teknik jantan mandul, yaitu dengan radiasi dosis tertentu yang dapat mengakibatkan kemandulan pada serangga jantan sehingga populasi serangga hama dapat dikendalikan.

3) *Iradiasi dalam Bidang Kedokteran*

Selain dilakukan dalam bidang teknologi pangan dan pertanian, iradiasi juga dilakukan dalam bidang kedokteran. Tujuan dilakukannya iradiasi dalam bidang kedokteran antara lain untuk mendiagnosis suatu penyakit dan untuk terapi (pengobatan).

T u g a s 3.16

Carilah pemanfaatan iradiasi dalam bidang lain dari buku sumber lain yang ada di sekolah.

KEGIATAN 3.6

Mutasi

Tujuan

Menyelidiki pengaruh kolkisin sebagai penyebab mutasi pada tumbuhan.

Alat dan Bahan

1. Larutan kolkisin 0,1 %.
2. Berbagai biji yang akan diselidiki (biji kacang tanah, kacang merah, kacang kedelai).
3. Cawan petri.
4. Pinset.

Cara kerja

1. Pilih biji yang besar dan sehat, masing-masing sebanyak 20 butir.
2. Redam dalam larutan kolkisin 0,1 % selama 24 jam.
3. Tanam biji-biji tersebut pada pot tanah yang telah disediakan dan beri label.
4. Tanam juga biji yang tidak direndam kolkisin sebagai pembandingan pada pot yang berbeda dan beri label.
5. Amati pertumbuhan biji-biji tersebut secara saksama dan bandingkan antara keduanya dalam hal:
 - a. Bagaimana kecepatan tumbuhnya?
 - b. Adakah perbedaan ukuran kuncup dari keduanya?
 - c. Bagaimanakah ukuran daun, bunga atau buah?

Catatlah hasil pengamatanmu dalam tabel dan lihatlah kesimpulannya.

2. Mutasi Alami dan Mutasi Buatan

Berdasarkan kejadiannya mutasi dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu mutasi alami dan mutasi buatan.

a. Mutasi Alami

Mutasi alami atau spontan adalah perubahan materi genetik yang terjadi dengan sendirinya di alam. Mutasi alami berlangsung sangat lambat dan jarang terjadi, tetapi mutasi ini dapat terjadi setiap saat. Mutasi alami diduga disebabkan oleh berbagai hal, yaitu sinar kosmis, bahan radioaktif alam, sinar ultraviolet matahari, kesalahan sewaktu terjadi replikasi DNA, radiasi internal dari bahan radioaktif yang mungkin masuk ke dalam tubuh melalui makanan atau saluran pernapasan akibat pencernaan bahan radioaktif.

Mutasi tidak selalu harus berubah menjadi spesies baru, tetapi jika keturunan mutan tersebut mengalami mutasi-mutasi berikutnya dan dapat bertahan hidup sampai beberapa generasi, hal tersebut akan mengubah genotipe maupun fenotipenya yang berbeda dengan nenek moyangnya. Mutasi alami dijumpai pada *Drosophila*, nyamuk, dan tikus.

b. Mutasi Buatan

Mutasi buatan atau mutasi induksi adalah perubahan materi genetik yang disebabkan oleh usaha manusia. Herman J. Muller (1890 - 1967) sarjana Amerika memperkenalkan induksi mutasi dengan sinar X pada *Drosophila melanogaster*. Berdasarkan hasil pengamatannya Muller menyimpulkan bahwa makin besar dosis radiasi terhadap organisme makin banyak pula terjadi mutasi.

Penelitian ilmiah selanjutnya dilakukan oleh L.J. Stadler (1928) menggunakan sinar- γ dan sifat- γ pada jagung dan jelai. Di pihak lain, Charlotte Anerbach (1927) menggunakan gas mustard. Berdasarkan berbagai hasil penelitian ilmiah, mutasi buatan dapat dilakukan dengan berbagai cara, yaitu dengan penempatan organisme terhadap bahan-bahan penyebab mutasi, penyisipan DNA, dan mutagen.

1) Penempatan Organisme terhadap Bahan-bahan Penyebab Mutasi

Penempatan organisme terhadap bahan-bahan penyebab mutasi seperti radiasi sinar pengion (sinar α , sinar β , dan sinar γ), serta zat-zat kimia yang dapat bereaksi dengan DNA.

Mutasi induksi banyak dimanfaatkan, di antaranya untuk memperoleh bibit unggul dalam meningkatkan produksi pangan. Contoh bibit unggul hasil mutasi radiasi sinar- γ , antara lain padi varietas Atomita I, Atomita II; kedelai varietas Muria; tomat varietas Bouset dan *Money maker*; kentang varietas

Patronas, Donata, dan Radosa. Mutasi induksi dengan senyawa kimia seperti yang dilakukan pada tumbuhan umumnya menghasilkan keturunan poliploid, yang memberikan hasil lebih besar dan tidak berbiji, seperti pada semangka, anggur, jambu, dan tomat.

2) Penyisipan DNA

Dengan berkembangnya biologi molekuler, para ahli biologi dewasa ini mampu mengidentifikasi struktur kimia gen. Kemajuan teknik laboratorium memungkinkan mereka dapat mengisolasi gen dari satu organisme dan menyisipkannya ke dalam organisme lain. Pindahkan ini dilakukan pada tingkat DNA. Teknik tersebut dinamakan rekayasa genetika, yang meliputi rekayasa tingkat sel dan rekayasa tingkat DNA atau teknik rekombinasi DNA. Rekombinasi DNA merupakan suatu teknik laboratorium untuk menyusun DNA asing ke dalam molekul DNA suatu organisme. Tujuan penyisipan ini agar organisme yang disisipi dapat memiliki kemampuan mengekspresikan gen baru.

Suksesnya teknik ini didukung oleh penemuan enzim endonuklease restriksi pada bakteri dan enzim DNA ligase yang dapat memotong dan menyambungkan pada situs-situs tertentu dengan tepat. Jauh sebelumnya telah ditemukan adanya plasmid (DNA di luar kromosom yang berbentuk lingkaran) yang dapat digunakan untuk teknik rekombinasi sebagai vektor atau pembawa ruas DNA asing. Dengan teknik penyisipan gen, pembuatan hormon insulin manusia oleh bakteri berlangsung sebagai berikut.



Gambar 3.51 Proses penyisipan DNA

Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

Gen pembentuk insulin pada sel pankreas manusia dengan plasmid bakteri sehingga gen sel bakteri mampu menghasilkan hormon insulin. Agar lebih jelas, perhatikan Gambar 3.52.

3. Akibat Mutasi

Dengan terjadinya mutasi pada makhluk hidup maka akan terbentuk mutasi yang sifatnya berbeda dengan induknya. Perubahan sifat ini bisa menguntungkan bisa pula merugikan bagi manusia.

a. *Menguntungkan* dengan dihasilkan:

- 1) Buah besar tanpa biji, misalnya pada semangka, jambu biji, jeruk, anggur, dan sebagainya.
- 2) Bibit unggul:
 - Padi Atomita I, Atomita II
 - Kedelai muria
 - Tomat Bousel
 - Kentang Petronas
- 3) Tanaman budidaya yang kebal terhadap hama dan penyakit. Tanaman budidaya yang menghasilkan pupuk sendiri.
- 4) Hormon insulin sebagai obat diabetes melitus.
- 5) Umbi tidak cepat bertunas misal: kentang, bawang dan sebagainya.

b. *Merugikan*: terbentuknya mutasi yang cacat tubuh atau berpenyakit.

Rangkuman

1. Kromosom terdapat dalam nukleus setiap organisme, mengandung gen, bentuknya bermacam-macam sesuai dengan letak sentromernya, jumlahnya pada setiap makhluk hidup berbeda-beda. Pada umumnya terdapat dalam sel tubuh (diploid/ $2n$), sedangkan pada gamet haploid (n). Berdasarkan fungsinya dibedakan menjadi autosom dan gonosom.
2. Gen atau DNA di dalam sel selalu berpasangan, pasangan gen yang terletak pada kromosom homolog dan terletak pada lokus yang bersesuaian disebut alel. Gen dan alel ada yang memiliki fungsi yang sama, ada yang saling berlawanan atau saling mendukung. Gen berfungsi mengontrol atau mengatur pembentukan protein (polipeptida).

3. DNA berupa dua benang polinukleotida yang saling berpilin, polinukleotida tersusun atas banyak nukleotida (1 gula, 1 fosfat, dan 1 basa nitrogen). Basa nitrogen penyusun DNA, yaitu basa purin: adenin, dan guanin; basa pirimidin: timin dan sitosin. Pasangan basa nitrogen selalu tetap, yaitu adenin (A) dengan timin (T), sitosin (S) dengan Guanin (G).
4. kedua nukleotida dihubungkan oleh ikatan hidrogen, yaitu ikatan antara basa pada polinukleotida yang satu dengan basa polinukleotida pasangannya. Jumlah keempat basa nitrogen dalam DNA dan dalam tiap spesies berbeda. DNA mampu memperbanyak diri dengan cara replikasi dan melakukan transkripsi (penyalinan diri dalam bentuk RNA).
5. RNA merupakan satu rantai polinukleotida yang tersusun atas gula ribosa, fosfat, dan basa nitrogen (purin: adenin, guanin; pirimidin: sitosin, urasil), dibentuk oleh DNA.
6. Macam-macam RNA, yaitu RNA duta (RNAd), RNA transfer (RNAt), dan RNA ribosom (RNAr).
7. Kode genetika (kodon) berupa 3 basa nitrogen (triplet) yang terdapat pada RNAd dan pada RNAt merupakan pasangan (komplemen) dari kodon.
8. Penyimpangan semu Hukum Mendel terjadi karena adanya interaksi antara gen yang satu dan gen yang lainnya sehingga perbandingan fenotipe sel anak tidak sesuai dengan Hukum Mendel, tetapi polanya sama.
9. Tautan, yaitu beberapa gen terletak pada satu kromosom sehingga pada saat meiosis gen-gen tersebut tidak dapat memisah secara bebas sehingga macam gamet yang dihasilkan sedikit.
10. Penentuan jenis kelamin pada manusia ditentukan oleh gonosom X dan Y, jadi untuk laki-laki XY, untuk perempuan XX, pada sistem serangga menggunakan sistem XX – XO, jantan XO, betina XX. Pada burung sistem ZZ – ZW, jantan ZZ, betina ZW.
11. Tautan seks terjadi jika gen yang pada umumnya terletak pada autosom, ada yang terdapat pada gonosom, misalnya pada kromosom X atau pada kromosom Y.
12. Gen letal adalah gen yang dapat menyebabkan kematian jika dalam keadaan homozigot, bisa dominan bisa juga resesif.

13. Cacat atau penyakit menurun (genetis) umumnya dikendalikan oleh gen resesif.
14. Individu penderita memiliki genotipe homozigot resesif, sedangkan individu heterozigot sebagai pembawa (carier), tidak menampakkan cacat atau sakit.
15. Cacat atau penyakit yang tidak terkait kromosom seks, antara lain albino, gangguan mental, polidaktili, sindaktili, brachydactili, golongan darah, dan thalasemia.
16. Beberapa di antara cacat atau penyakit genetis dikendalikan oleh gen yang terdapat pada kromosom seks, misalnya hemofili dan buta warna.
17. Mutasi adalah peristiwa berubahnya struktur materi genetik sehingga generasi berikutnya dapat mengalami perubahan dan memiliki sifat berbeda dari induknya.
18. Berdasarkan bagian yang berubah pada materi genetik, mutasi dibedakan atas mutasi gen dan mutasi kromosom.
19. Mutasi gen adalah peristiwa perubahan materi hereditas pada satu atau beberapa nukleotida DNA di dalam gen. Mutasi gen meliputi transisi, transversi, delesi, insersi, dan transposon.
20. Mutasi kromosom dapat terjadi karena adanya perubahan struktur dan atau perubahan jumlah kromosom. Perubahan struktur kromosom adalah delesi, duplikasi, inversi, dan translokasi.
21. Perubahan jumlah kromosom meliputi aneuploid dan aneusomi.
22. Organisme yang mengalami mutasi disebut mutan, sedangkan penyebabnya disebut mutagen.
23. Berdasarkan prosesnya mutasi dibedakan menjadi mutasi alam dan mutasi buatan.
24. Sebagian besar mutasi merugikan, tetapi proses mutasi juga dimanfaatkan untuk beberapa hal, misalnya pengembangan sifat-sifat baru yang diinginkan.

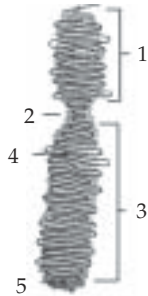
Kata Kunci

Albinisme
Alel
Alel ganda
Amitosis
Aneuploid
Aneusomi
Antikodon
Antisense
Brakidaktili
Buta warna
Defisiensi
Delesi
Diploid
Dominan
Dominan penuh
Double helix
Duplikasi
Epistasis
Eritroblastosis fetalis
Fenotipe
Fertilisasi
Filial
Gen ganda
Genom
Genotipe
Haploid
Hemofili
Heterozigot
Hipertichosis
Hipostasis
Homozigot
Homolog
Intermediet
Inversi
Kodon
Kombinasi parental
Komplemen
Kriptomeri
Kromatid
Kromatin
Kromomer
Kromomiol
Kromosom
Kromosom homolog
Letal
Lokus
Meiosis
Mitosis
Mutagen
Mutasi
Mutasi gen
Mutasi kromosom
Oogenesis
Parental
Peta silsilah
Polidaktili
Poliploid
Replikasi
Resesif
Sindaktili
Sitokinesis
Spermatogenesis
Tautan
Transkripsi
Translasi
Transisi
Translokasi
Transparan
Transversi
Triplet
Web bed toes

Evaluasi Akhir Bab

A. Pilih jawaban yang paling tepat.

1. Perhatikan gambar kromosom di berikut ini!



Bagian kromosom yang disebut sentromer adalah yang bernomor

- A. 1
B. 2
C. 3
D. 4
E. 5
2. Substansi genetika di dalam ovum dan sperma terdapat dalam
- A. sitoplasma
B. nukleoplasma
C. nukleoprotein
D. sentrosom
E. ribosom
3. Jika urutan basa nitrogen dalam rantai nukleotida DNA adalah: SSA - STA - ASA - STT - TTA, maka urutan basa nitrogen dalam rantai nukleotida pelengkapannya adalah
- A. GGU - GAU- UGU - GAA - AAU
B. SST - SAT - TST - GSS - GGT
C. TTG - TGS - STS - TGG - SSG
D. UUG - UGS - SUS - UGG - SSG
E. GGT - GAT - TGT - GAA - AAT
4. Mulai meleburnya membran nukleus dan terjadinya penebalan kromatin menjadi kromosom merupakan ciri dari pembelahan sel pada tahap
- A. profase mitosis
B. metafase meiosis I
C. metafase mitosis
D. anafase mitosis
E. telofase meiosis I
5. Dari pembastaran antara genotipe Aa dan Aa, dengan gen a bersifat letal, keturunan yang diharapkan hidup adalah
- A. 25%
B. 40%
C. 50%
D. 60%
E. 75%

6. Saat paling tepat menghitung jumlah kromosom adalah metafase karena pada fase tersebut
- terbentuk kromatid
 - kromatid berjajar di bidang ekuator
 - kromosom berubah menjadi kromatin
 - kromatin berubah menjadi kromosom
 - kromosom bergerak ke kutub yang berlawanan

7. Berikut ini data-data yang ditemukan pada sel yang sedang membelah:
- kromatid berjajar di bidang ekuator;
 - selaput inti melebur, terbentuk gelendong;
 - kromosom menduplikasi diri menjadi sepasang kromatid;
 - terjadi invaginasi membran plasma;
 - kromosom homolog saling berpasangan.

Tahap profase pada mitosis terdiri atas pernyataan nomor

- | | |
|------------|------------|
| A. 1, 2, 3 | D. 2, 4 |
| B. 1, 4, 5 | E. 2, 3, 5 |
| C. 2, 3 | |

8. Aktivitas mitosis dalam jaringan hidup terdapat pada
- ujung-ujung tulang pipa balita
 - sumsum tulang merah pada saat pembentukan eritrosit
 - mahkota bunga
 - pembentukan daging buah
 - pembentukan darah
9. Jenis kelamin ditentukan oleh sepasang kromosom seks, dalam suatu keluarga anak yang akan dilahirkan adalah
- anak laki-laki lebih banyak daripada anak perempuan
 - anak perempuan akan lebih banyak daripada anak laki-laki
 - anak laki-laki sama banyaknya dengan anak perempuan
 - mempunyai kemungkinan sama antara laki-laki dan perempuan
 - sama sekali tidak bisa diramalkan
10. Ayam berpial Pea ($rrPp$) disilangkan dengan ayam berpial walnut ($RRPP$). Kemungkinan ayam yang akan muncul dari persilangan tersebut adalah
- | | |
|---------------------|--------------------------|
| A. walnut dan bilah | D. walnut, biji, dan ros |
| B. walnut dan biji | E. seluruhnya walnut |
| C. walnut dan ros | |

11. *Linaria marocana* berbunga merah (Aabb) disilangkan dengan bunga putih (aabb) maka keturunannya adalah
- A. 50% merah dan 50% putih D. 50% ungu dan 50% putih
 B. 25% ungu, 25% merah, 50% putih E. 25% putih dan 75% ungu
 C. 50% ungu, 25% merah, 25% putih
12. Warna biji gandum merah ditentukan oleh M_1 dan M_2 . Dari persilangan gandum merah sesamanya didapat hasil perkawinan dengan perbandingan 15 gandum biji merah: 1 gandum biji putih. Genotipe parentalnya adalah
- A. $M_1m_1 \times M_2m_2$ D. $m_1m_1 m_2M_2 \times M_1m_1 M_2m_2$
 B. $M_1m_1 M_2m_2 \times M_1m_1 M_2m_2$ E. $M_1M_1 m_2m_2 \times M_1M_1 m_2m_2$
 C. $M_1m_1 M_2m_2 \times M_1m_1 M_2M_2$
13. Jika jarak antara gen A dan B adalah 40 unit Morgan, maka perbandingan fenotipe penyilangan antara AaBb dan aabb adalah
- A. 9 : 3 : 3 : 1 D. 6 : 4 : 6 : 4
 B. 9 : 1 : 3 : 3 E. 4 : 6 : 6 : 4
 C. 6 : 4 : 4 : 6
14. Jika seorang penderita *sickle cell anemia* menikah dengan wanita normal, kemungkinan anak-anak mereka adalah
- A. semua anak laki-laki memiliki gen *sickle sell anemia*
 B. semua anak wanitanya memiliki gen *sickle cell anemia*
 C. *sickle cell anemia* hanya diwariskan pada anak laki-laki
 D. *sickle cell anemia* juga diderita oleh anak wanitanya
 E. tidak ada anaknya yang menderita *sickle cell anemia*
15. Jika salah satu orangtuanya bergolongan darah O, sedangkan anak-anaknya bergolongan darah A dan B, maka kemungkinan anak yang ke-3 akan bergolongan darah
- A. A D. O
 B. B E. A atau B
 C. AB
16. Bayi penderita erythroblastosis fetalis dapat lahir dari pasangan orangtua
- A. ayah Rh⁺ dengan ibu Rh⁺ D. ayah Rh⁻ dengan ibu Rh⁻
 B. ayah Rh⁻ dengan ibu Rh⁺ E. ayah Rh⁻ dengan ibu Rh⁺
 C. ayah Rh⁺ dengan ibu Rh⁻ heterozigot

17. Dari seorang ayah normal dan ibu carier hemofili, kemungkinan anak-anak yang lahir
- sebagian anak wanitanya normal dan sebagian lagi hemofili
 - semua anak wanitanya menderita hemofili
 - semua anak wanitanya carier hemofili
 - semua anak wanitanya normal
 - sebagian anak wanitanya normal dan sebagian lagi carier
18. Jika seorang ayah mengandung sifat tertaut seks dalam kromosom X-nya, maka dia akan mewariskan sifat itu kepada
- 50% dari jumlah anaknya yang laki-laki
 - 50% dari jumlah anaknya yang perempuan
 - 25% dari jumlah anaknya yang laki-laki
 - semua anaknya yang laki-laki
 - semua anaknya yang perempuan
19. Berdasarkan gambar di bawah ini, jenis mutasi yang terjadi adalah



- delesi
- inversi
- translokasi
- katensi
- duplikasi

20. Aneusomi yang terjadi pada autosom adalah
- sindroma Edward dan sindroma Klinefelter
 - sindroma Down dan sindroma Patau
 - sindroma Turner dan sindroma Klinefelter
 - sindroma Down dan sindroma Turner
 - sindroma Patau dan sindroma Klinefelter

B. Jawab pertanyaan berikut ini dengan benar.

- Jelaskan:
 - sifat gen
 - fungsi gen
- Apakah fungsi dan ciri-ciri pembelahan meiosis serta di manakah proses ini berlangsung?

3. Apabila bunga *Linaria marocana* warna merah (Aabb) disilangkan dengan bunga warna ungu (AABb), tentukan genotipe dan fenotipe keturunannya!
4. Jika ercis biji bulat warna kuning (BbKk) disilangkan dengan induk yang homozigot resesif, dihasilkan keturunan kisut kuning 144 buah, bulat kuning 360 buah, kisut hijau 280 buah, dan bulat hijau 176 buah;
 - a. Berapa KP dan RK?
 - b. Berapa nilai pindah silangnya?
 - c. Buat peta kromosomnya!
5. Jelaskan apa yang dimaksud dengan;
 - a. aneusomi
 - b. aneuploid
 - c. inversi
 - d. mutan
 - e. mutagen

Evaluasi Akhir Semester

A. Pilih jawaban yang paling tepat.

1. Ciri makhluk hidup yang sulit untuk diukur adalah
 - A. pertumbuhan
 - B. perkembangan
 - C. reproduksi
 - D. iritabilitas
 - E. gerak
2. Daya tahan buah yang masak terhadap pembusukan bergantung pada hormon
 - A. florigen
 - B. etilen
 - C. sitokinin
 - D. rizokalin
 - E. auksin
3. Apabila tumbuhan selama perkecambahan mengalami kekurangan cahaya, tumbuhan tersebut akan mengalami
 - A. kekerdilan
 - B. klorosis
 - C. etiolasi
 - D. kematian
 - E. pembengkokan
4. Kadal yang diserang pemangsa akan memutuskan ekornya peristiwa ini dinamakan
 - A. regenerasi
 - B. degenerasi
 - C. ototomi
 - D. organogenesis
 - E. deferensiasi
5. Banyak jenis hewan memperbanyak diri dengan cara partenogenesis yang artinya
 - A. larva yang dapat menghasilkan keturunan
 - B. terjadinya individu baru tanpa melalui stadium telur
 - C. pertumbuhan sel telur yang cepat setelah terjadi pembuahan
 - D. sel telur berkembang menjadi individu normal tanpa didahului pembuahan
 - E. cara memperbanyak diri dengan regenerasi

6. Tiga faktor penting yang mempengaruhi perkecambahan biji adalah
 - A. air, udara, dan tanah
 - B. cahaya, suhu, dan kelembaban
 - C. air, udara, dan suhu
 - D. suhu, tanah, dan udara
 - E. tanah, air, dan suhu

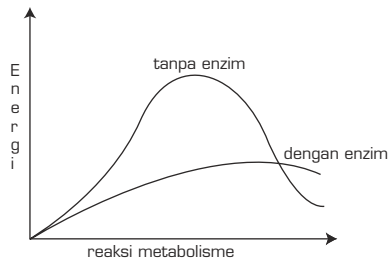
7. Pada pertumbuhan akar, zona yang sel-selnya mengalami deferensiasi adalah
 - A. meristem
 - B. elongasi
 - C. pematangan
 - D. tudung akar
 - E. meristem dan elongasi

8. Ciri tumbuhan telah dewasa salah satunya adalah
 - A. tumbuhnya akar cabang
 - B. batangnya bertambah besar
 - C. tumbuhnya tunas pada ketiak daun
 - D. kulit batang terlihat retak-retak
 - E. berbunga dan berbuah

9. Suatu zat pengatur tumbuh yang mengatur mobilisasi asam amino dan fosfor dan menghambat proses penuaan adalah
 - A. auksin
 - B. sitokinin
 - C. kaulokalin
 - D. giberelin
 - E. florigen

10. Berdasarkan respons tanaman terhadap lamanya penyinaran dapat dibedakan menjadi tanaman hari pendek dan tanaman hari panjang yang termasuk tanaman hari pendek adalah
 - A. kedelai, tembakau, stroberi
 - B. gandum, bayam, bit
 - C. jagung, kacang merah, Kapas.
 - D. kedelai, gandum, jagung
 - E. tembakau, bayam, kacang merah

11. Apakah kesimpulanmu tentang grafik di bawah ini?



- A. Reaksi metabolisme membutuhkan energi yang diberikan oleh enzim.
- B. Reaksi metabolisme tidak dapat berlangsung tanpa enzim.
- C. Enzim menurunkan energi aktivasi pada reaksi metabolisme.
- D. Enzim mempertinggi energi yang dibutuhkan dalam reaksi.
- E. Enzim menjadi penghambat laju reaksi metabolisme.

12. Perhatikan gambar di bawah ini



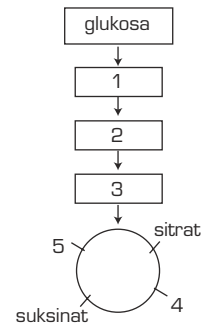
Dari data percobaan di atas kita dapat menyimpulkan bahwa

- A. enzim lebih banyak terdapat di dalam sel hati
 - B. enzim bekerja spesifik
 - C. enzim dipengaruhi oleh pH
 - D. enzim bekerja maksimal jika substrat banyak
 - E. kerja enzim dipengaruhi oleh suhu
13. Persamaan antara respirasi aerob dan respirasi anaerob terletak pada
- A. tahap Glikolisis
 - B. dekarboksilase oksidatif
 - C. siklus Krebs
 - D. energi yang dihasilkan 38 ATP
 - E. transfer elektron

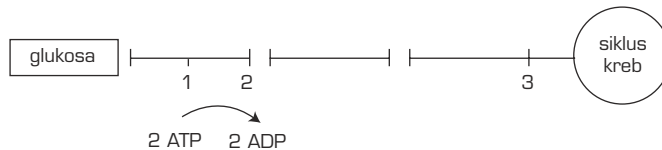
14. Perhatikan Gambar.

Produk senyawa antara dari respirasi merupakan bahan dasar untuk sintesis lemak dan sintesis protein. Senyawa antara untuk sintesis lemak, yaitu . . .

- A. 1 dan 2
- B. 2 dan 3
- C. 3 dan 4
- D. 4 dan 5
- E. 1 dan 3



15. Perhatikan diagram tentang ringkasan reaksi pada respirasi sel di bawah ini . . .



Secara berturut-turut label 1, 2 dan 3 adalah . . .

- A. asam piruvat, PGAL, Asetil KoA
- B. asetil KoA, PGAL, Asam piruvat
- C. PGAL, asam piruvat, asetil KoA
- D. PGAL, asetil KoA, Asam piruvat
- E. KoA, asam piruvat, PGAL

16. Bakteri kemosintesis yang mengubah Nitrit menjadi Nitrat dengan persamaan reaksi . . .



- A. Nitrobacter
- B. Asetobacter
- C. Nitrococcus
- D. Nitrosomonas
- E. Azotobacter

17. Reaksi terang pada fotosintesis menghasilkan . . .

- A. glukosa
- B. CO_2 dan H_2O
- C. glukosa dan O_2
- D. ATP dan Asam Piruvat
- E. ATP, NADP H_2 dan O_2

18. Reaksi terang dan siklus Calvin menghasilkan 2 zat penting yang digunakan dalam reaksi pembentukan glukosa, yaitu
- A. ATP dan Asam fosfogliserat
 - B. NADPH_2 dan Asam fosfogliserat
 - C. ATP dan Asam fosfogliserat
 - D. NADPH_2 dan ATP
 - E. NADPH_2 dan fosfoglisealdehid
19. Manakah yang merupakan peristiwa awal dari proses fotosintesis?
- A. terurainya CO_2
 - B. terurainya klorofil
 - C. tereksitasinya klorofil
 - D. terurainya molekul
 - E. tereksitasinya molekul
20. Pembuatan tape singkong dengan bantuan ragi merupakan proses
- A. fragmentasi
 - B. fermentasi
 - C. degradasi
 - D. fosforilasi
 - E. hidrolisis
21. Jumlah dan macam kromosom sel yang menyusun otot seorang laki-laki terdiri atas
- A. 22 pasang autosom dan 1 kromosom Y
 - B. 22 pasang autosom dan 1 pasang kromosom X
 - C. 22 pasang autosom dan 2 pasang kromosom X
 - D. 22 pasang autosom, 1 kromosom X dan 1 kromosom Y
 - E. 23 pasang autosom, 1 kromosom X dan 1 kromosom X
22. Apabila suatu individu mempunyai genotipe AaBBCc, akan membentuk gamet sebanyak
- A. 3 buah
 - B. 4 buah
 - C. 5 buah
 - D. 6 buah
 - E. 8 buah

23. Seorang anak mempunyai wajah mirip ayahnya, ini berarti bahwa anak tersebut mendapat kromosom
- 100% dari ayah
 - 75% dari ayah dan 25% dari ibu
 - 25% dari ayah dan 75% dari ibu
 - 50% dari ayah dan 50% dari ibu
 - 100% dari ibu
24. Bagian kromosom yang tidak mengandung gen adalah
- kromomer
 - kromonema
 - kromomiol
 - sentromer
 - sentrosom
25. Berikut ini adalah keterangan tentang struktur dan fungsi DNA dan RNA:
- terdapat dalam inti sel dan kromosom;
 - membentuk rantai tunggal dan tidak panjang;
 - berhubungan dengan sintesis protein dan kadarnya berubah-ubah;
 - mengandung pirimidin, sitosin, urasil;
 - mengandung purin, adenin, guanin;
 - komponen gulanya ribosa.

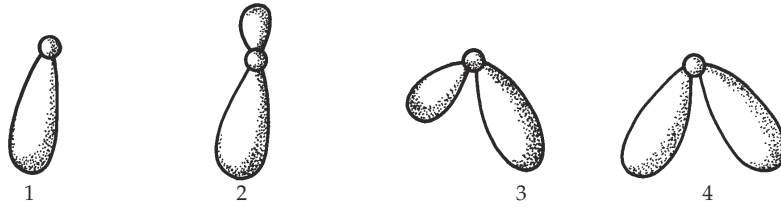
Manakah struktur dan fungsi RNA?

- | | |
|------------------|------------------|
| A. 1 - 2 - 3 - 6 | D. 2 - 3 - 4 - 6 |
| B. 1 - 2 - 4 - 5 | E. 3 - 4 - 5 - 6 |
| C. 2 - 3 - 4 - 5 | |
26. Pernyataan di bawah ini merupakan tahapan pada proses sintesis protein.
- RNA_d meninggalkan inti menuju ribosom
 - terjadi penyusunan polipeptida
 - DNA membentuk RNA_d
 - RNA_t membawa asam amino ke ribosom

Urutan yang benar adalah

- | | |
|------------------|------------------|
| A. 1 - 3 - 2 - 4 | D. 1 - 3 - 4 - 2 |
| B. 4 - 1 - 3 - 2 | E. 3 - 1 - 4 - 2 |
| C. 3 - 2 - 4 - 1 | |

27. Di bawah ini gambar berbagai macam bentuk kromosom

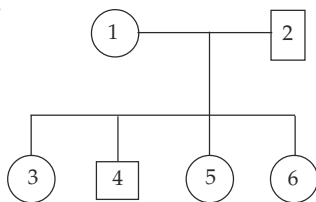


Berturut-turut tipe metasentris dan akrosentris adalah

- A. 1 dan 2
 - B. 2 dan 3
 - C. 3 dan 4
 - D. 3 dan 4
 - E. 4 dan 2
28. Profase I pada pembelahan meiosis terdiri atas beberapa tahap, yaitu (1) pakiten, (2) leptoten, (3) diakinesis, (4) zigoten, dan (5) diploten. Urutan yang benar adalah
- A. 4, 1, 3, 2, 5
 - B. 5, 4, 1, 2, 3
 - C. 1, 3, 4, 2, 5
 - D. 3, 5, 2, 1, 4
 - E. 2, 4, 1, 5, 3
29. Pada peristiwa oogenesis, setiap 1 oogonium yang mengalami meiosis akan membentuk
- A. 1 ovum fungsional dan 1 sel kutub
 - B. 1 ovum fungsional dan 3 sel kutub
 - C. 2 ovum fungsional dan 2 sel kutub
 - D. 3 ovum fungsional dan 1 sel kutub
 - E. 4 ovum fungsional yang haploid
30. Gandum berkulit hitam (Hhkk) disilangkan dengan gandum berkulit kuning (hhKK). Hitam epistasis terhadap kuning, maka keturunannya terdiri atas
- A. hitam semua
 - B. hitam : kuning = 50% : 50%
 - C. hitam : kuning = 25% : 75%
 - D. hitam : kuning = 75% : 25%
 - E. kuning semua

31. Gen untuk mata merah pada lalat buah adalah tertaut seks. Pada perkawinan lalat jantan mata merah dengan betina mata putih, jika pada yang jantan mengalami gagal berpisah dalam meiosis, macam fenotipe pada keturunannya adalah
- jantan mata merah dan betina mata putih
 - jantan mata putih dan betina mata merah
 - jantan mata putih dan betina mata putih
 - jantan mata merah dan betina mata merah
 - jantan mata putih, jantan mata merah, dan betina mata putih
32. Apabila seorang pria mengandung gen tertaut seks dalam kromosom X-nya, sifat itu akan diwariskan kepada
- 25% anak laki-laki
 - 50% anak laki-laki
 - 50% anak perempuan
 - 100% anak perempuan
 - 100% anak laki-laki
33. Wanita normal pembawa alel untuk buta warna kawin dengan laki-laki normal, kemungkinan keturunannya adalah
- semua anak perempuannya akan buta warna
 - semua anak-anaknya akan buta warna
 - semua anak laki-laknya akan buta warna
 - setengah dari anak laki-laknya akan buta warna
 - semua anak-anaknya normal
34. Pasangan orangtua manakah yang tidak memungkinkan melahirkan anak bergolongan darah O?
- Ayah A – ibu A
 - Ayah B – ibu B
 - Ayah A – ibu AB
 - Ayah A – ibu O
 - Ayah O – ibu O

35.

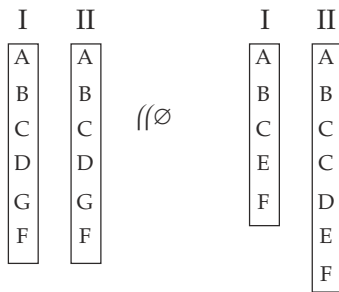


Dari perkawinan seorang ayah dan ibu dihasilkan keturunan seperti dalam bagan di samping ini.

Jika nomor 2 bergolongan darah A, sedangkan anak-anaknya bergolongan darah A, O, B, dan AB, maka yang bernomor 1 bergenotipe

- A. $I^A I^A$
- B. $I^B I^B$
- C. $I^A I^B$
- D. $I^A i$
- E. $I^B i$

36. Gen yang bermutasi akan diwariskan kepada anak cucu kita. Hal ini akan terjadi jika mutasi gen itu terjadi di dalam
- A. sel rahim
 - B. sel plasenta
 - C. sel somatik dan sel kelamin
 - D. sel somatik
 - E. sel kelamin
37. Salah satu penyebab mutasi adalah
- A. radiasi bom atom dan gas karbon dioksida
 - B. asan sitrat dan asam nitrat
 - C. gas metan dan karbon monoksida
 - D. sinar gamma dan suhu yang sangat rendah
 - E. sinar X dan suhu yang sangat tinggi
38. Berikut ini adalah gambar perubahan kromosom



Sebelum meiosis Setelah meiosis

Perubahan yang terjadi pada kromosom I seperti yang tampak pada gambar disebut

- A. inversi
- B. delesi
- C. katenasi
- D. duplikasi
- E. translokasi

39. Jika terjadi trisomi pada autosom no. 21, akan menimbulkan kelainan yang disebut
- A. sindroma Edward
 - B. sindroma Patau
 - C. sindroma Down
 - D. sindroma Klinefelter
 - E. sindroma Jacobs
40. Aneusomi yang terjadi pada gonosom adalah
- A. sindroma Edward dan sindroma Patau
 - B. sindroma Down dan sindroma Klenefelter
 - C. sindroma Patau dan sindroma Turner
 - D. sindroma Klenefelter dan sindroma Edward
 - E. sindroma Klenefelter dan sindroma Turner

B. Jawab pertanyaan berikut ini dengan benar.

41. Sebutkan 3 faktor internal dan 3 faktor eksternal yang memengaruhi pertumbuhan.
42. Metabolisme terdiri atas Anabolisme dan Katabolisme. Jelaskan masing-masing istilah tersebut dan jelaskan pula hubungan dengan penggunaan energi.
43. Sebutkan 5 macam perbedaan antara DNA dan RNA!
44. Jika seorang wanita pada saat meiosis mengalami gagal berpisah, menikah dengan laki-laki normal. Bagaimana kemungkinan genotipe dan fenotipe anak-anaknya?
45. Seorang pria normal yang ayahnya buta warna kawin dengan wanita normal yang ibunya buta warna. Bagaimanakah kemungkinan fenotipe anak-anaknya?

Bab IV

Evolusi Makhluk Hidup



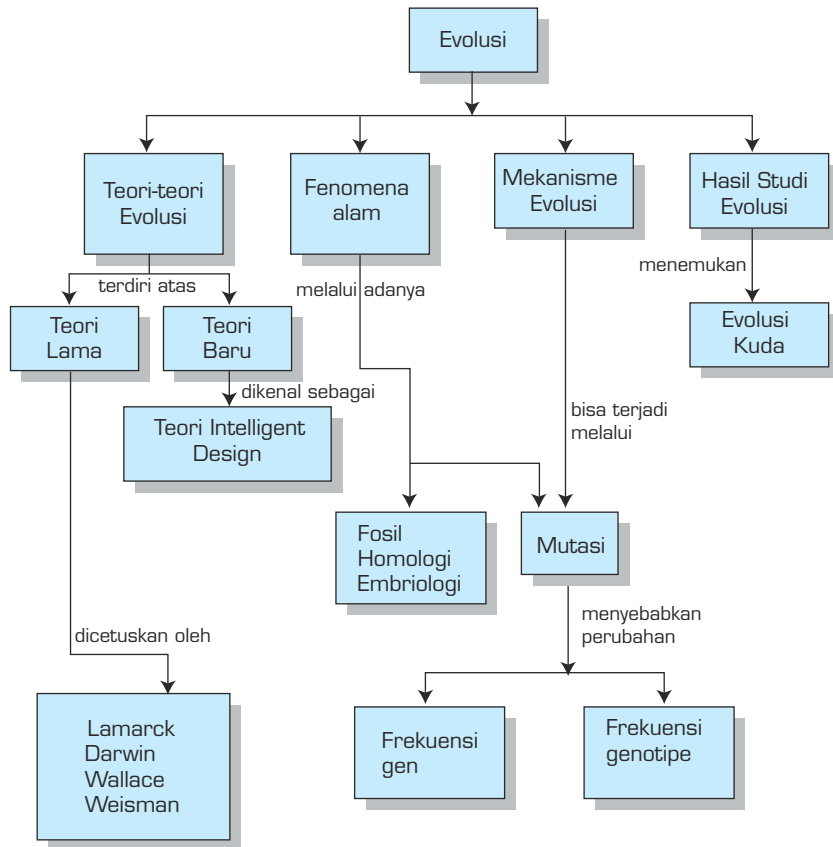
Sumber: *Biology The Unity and Diversity of Life*, Starr-Taggart

TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, siswa dapat:

1. menjelaskan berbagai teori evolusi;
2. menjelaskan pokok-pokok pikiran teori evolusi Darwin;
3. menemukan faktor-faktor dan petunjuk-petunjuk pendukung evolusi;
4. menjelaskan keterkaitan antara mutasi dan evolusi;
5. menjelaskan prinsip-prinsip dasar dan hukum Faraday-Weinberg;
6. menjelaskan studi tentang evolusi organisme tertentu;
7. menjelaskan, menganalisis, dan menyimpulkan pandangan-pandangan baru terhadap teori evolusi.

PETA KONSEP



Sudah sangat populer di kalangan ilmuwan dan masyarakat dunia tentang teori-teori evolusi. Kamu pasti pernah mendengar tentang teori Evolusi Darwin? Begitu terkenalnya, sehingga banyak opini dan teori baru yang bermunculan sebagai reaksi terhadap teori yang mengguncangkan dunia tersebut. Meskipun dihujat habis-habisan, terutama oleh kalangan religius yang meyakini isi kitab suci agama yang dianutnya, teori evolusi Darwin dan teori evolusi dari ilmuwan lainnya terus dikaji, dijadikan bahan komparasi, diluruskan, dan diperbarui sesuai dengan berkembangnya pengetahuan tentang sel dan DNA. Pada dasarnya, orang mengakui bahwa evolusi itu memang ada dan terjadi. Hanya perlu koreksi kembali, mekanisme menurut siapa yang terbukti benar. Teori evolusi merupakan kebenaran yang sulit untuk terburu-buru dipercaya sebab yang sedang dikaji adalah sesuatu yang sudah terjadi, lama berlalu, dan tidak disaksikan oleh siapa pun. Namun, harus diakui bahwa munculnya teori-teori tentang evolusi telah memacu setiap kalangan ilmuwan biologi untuk terus menggali rahasia kehidupan sampai yang sekecil-kecilnya sehingga kita telah menikmati hasil temuan mereka dan masih akan terus menikmati pengetahuan yang makin mutakhir. Pada akhirnya temuan-temuan tersebut menjadi sarana yang memuluskan penerimaan teori evolusi itu sendiri oleh berbagai kalangan.

A. Pemahaman tentang Teori Evolusi Biologi

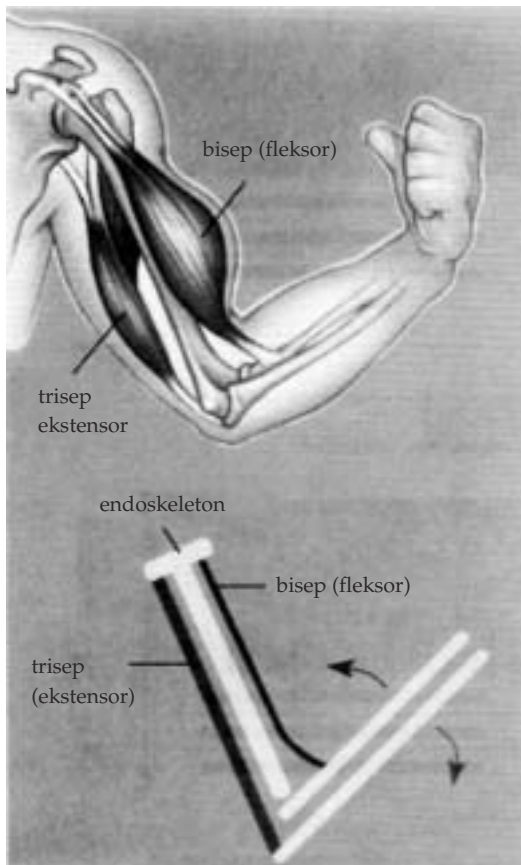
Berdasarkan perkembangan ilmu biologi dari waktu ke waktu, pendapat banyak ahli mengarah pada kesimpulan bahwa organisme yang hidup di muka bumi ini berkembang secara bertahap sejak munculnya organisme pertama yang strukturnya *uniseluler* ke arah organisme yang strukturnya *multiseluler*. Dari temuan fosil di batuan bumi, ditemukan kecenderungan kesamaan struktur tertentu yang polanya sama. Diketahui pula banyak spesies yang ada sekarang telah muncul puluhan juta tahun yang lalu, misalnya kura-kura, komodo, dan ikan *Hoelacanth*. Banyak organisme masa kini yang beberapa bagian struktur tubuhnya sama dengan struktur spesies yang telah lama punah. Tampaknya ada suatu bagian penting pada tubuh organisme yang terwaris secara estafet sehingga membentuk mata rantai kehidupan dari masa lalu sampai sekarang.

1. Teori-Teori Evolusi

Banyak temuan, simpulan, dan teori yang ternyata menjadi dasar atau perhatian bagi munculnya teori evolusi. Perhatikan pokok-pokok pikiran dari teori tentang makhluk hidup berikut ini.

- a. *Carolus Linnaeus (1707 – 1778)*, membuat sebuah ketentuan cara mencari keteraturan posisi antarmakhluk hidup dengan mencari persamaan sifat, dan mengelompokkan yang mirip ke dalam satu kelompok. Pengelompokan dilakukan secara berjenjang (diistilahkan dengan *takson*), mulai dari jenjang yang paling rendah (takson *spesies*) sampai jenjang yang paling tinggi (takson *kingdom*). Jenjang ditentukan dari pengelompokan dengan kemiripan sifat-sifat khusus, menempati takson terendah, sampai pada jenjang untuk pengelompokan makhluk hidup dengan kategori sifat-sifat umum pada takson yang paling tinggi. Linnaeus juga membuat suatu cara penamaan jenis makhluk hidup dengan sistem Binomial nomenklatur. Dengan sumbangan ilmunya ini Linnaeus disebut sebagai pendiri Taksonomi, suatu ilmu yang membahas tentang penamaan dan pengelompokan makhluk hidup yang sangat beraneka ragam.
- b. *Georges Cuvier (1769 – 1832)*, seorang ahli anatomi, tetapi sangat perhatian terhadap paleontologi (ilmu mengenai fosil). Cuvier mendukung teori *Katastropi* (catastrophism) yang menyatakan bahwa makhluk hidup setiap strata tidak ada hubungan kekerabatan karena setiap strata terbentuk akibat terjadinya bencana alam, seperti gempa, banjir, atau kemarau yang panjang. Jika strata lenyap oleh bencana, muncul strata baru lengkap dengan makhluk hidup baru, yang berpindah dari daerah lain. Dari temuan fosil di lembah Paris, Cuvier menyimpulkan bahwa batuan yang membentuk bumi ini tersusun berupa lapisan-lapisan (strata). Setiap strata dihuni oleh berbagai makhluk hidup yang unik, berbeda strukturnya dengan makhluk penghuni strata lainnya. Cuvier yakin bahwa makhluk modern di lapisan bumi paling atas sangat berbeda dengan makhluk di strata tua di lapisan bawah.
- c. *James Hutton (1726 – 1797)*, mengemukakan teori *gradualisme*, yang menyebutkan bahwa bentuk bumi dan lapisan-lapisannya merupakan hasil perubahan yang berlangsung secara bertahap, terus-menerus, dan lambat (dalam waktu lama).
- d. *Charles Lyell (1797 – 1875)*, mengemukakan teori *Uniformitarianisme* (keseragaman). Menurut Lyell, proses perubahan lapisan batuan dan bentuk permukaan bumi dari zaman ke zaman selalu sama atau tidak berubah. Charles Darwin, terinspirasi oleh teori Hutton dan Lyell dengan membuat sebuah pemikiran bahwa perubahan bumi secara lambat menunjukkan bumi sudah tua. Kemudian proses yang lambat, tetapi terus-menerus dalam waktu lama pasti menghasilkan perubahan yang cukup besar.
- e. *Jean Baptiste Lamarck (1744 – 1829)*, melihat adanya kecenderungan makhluk sederhana berubah menjadi makhluk yang lebih kompleks dengan prinsip adanya proses perubahan menuju kesempurnaan.

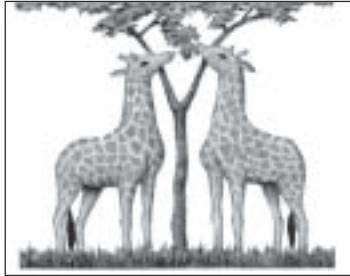
Perubahan menjadi sempurna ini menurut Lamarck karena *harus beradaptasi pada lingkungannya*. Proses adaptasi ini dijelaskan Lamarck melalui dua hal. *Pertama*, adanya proses *use* (menggunakan) dan *disuse* (tidak menggunakan) dari bagian-bagian tubuh organisme, bergantung pada kebutuhannya. Contoh yang diberikan oleh Lamarck, yaitu otot bicep (otot lengan atas) yang digunakan terus-menerus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan otot leher jerapah yang digunakan untuk menggapai dedaunan pada pohon-pohon tinggi seperti pada Gambar 4.2. Menurut Lamarck, organ tubuh yang digunakan secara luas untuk menghadapi lingkungan akan berkembang lebih besar, sedangkan bagian tubuh yang kurang digunakan akan mengalami penyusutan. *Kedua*, Lamarck berkeyakinan adanya pewarisan sifat-sifat yang diperoleh. Keadaan otot bicep yang semakin besar akibat penggunaan terus-menerus akan diwariskan kepada keturunannya. Dengan kata lain, keturunan akan lahir dengan sifat otot bicep besar dengan sendirinya.



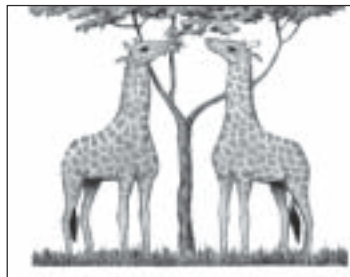
Gambar 4.1 Otot bicep yang sering dilatih akan berkembang

Sumber: *Biology*, Prentice-Hall

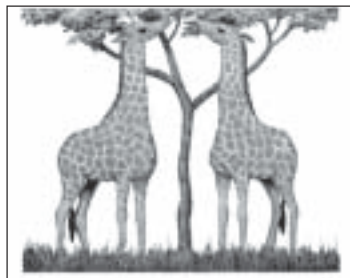
Demikian pula, leher panjang jerapah akan terwaris dengan sendirinya kepada keturunannya. Padahal perubahan organ tubuh tersebut hasil *modifikasi*, dan tidak ada bukti bahwa sifat-sifat yang diperoleh dapat diwariskan. Suatu kehormatan bagi Lamarck, adanya pengakuan bahwa memang adaptasi terhadap lingkungan merupakan produk evolusi.



- 1) Pada awalnya seluruh jerapah berleher pendek, sementara daun-daunan makanannya di pohon harus dijangkau karena letaknya yang tinggi.



- 2) Karena sering menjangkau daun, leher jerapah semakin panjang sehingga jerapah generasi berikutnya semakin tinggi.



- 3) Penyesuaian dan pewarisan hasil adaptasi ini berlanjut sehingga jerapah masa kini berleher panjang.

Gambar 4.2 Teori evolusi menurut Lamarck

Sumber: *Biology*, Prentice-Hall

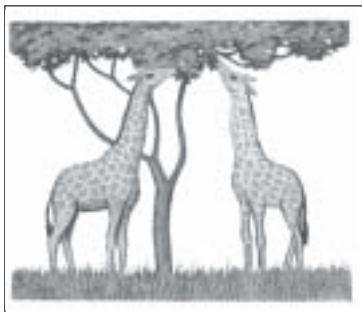
- f. **Charles Darwin (1809 – 1882)**, menjelaskan bahwa evolusi *menghasilkan keanekaragaman hayati*. Makhluk hidup mengalami evolusi melalui mekanisme seleksi alam. Organisme yang kuatlah yang akan melestarikan jenisnya. Darwin, mengemukakan pula adanya *kemampuan adaptasi* organisme agar mampu melewati seleksi alam. Darwin menggambarkan fenomena ketiga hal ini melalui contoh yang terkenal, yaitu gambar perkembangan leher jerapah (Gambar 4.3). Contoh ini menjadi komparatif terhadap contoh perkembangan leher jerapah dari Lamarck.



1) Populasi jerapah, panjang lehernya berbeda-beda, ada yang panjang ada yang pendek.



2) Terjadi seleksi alam dalam hal mendapatkan makanan. Jerapah berleher pendek mati.

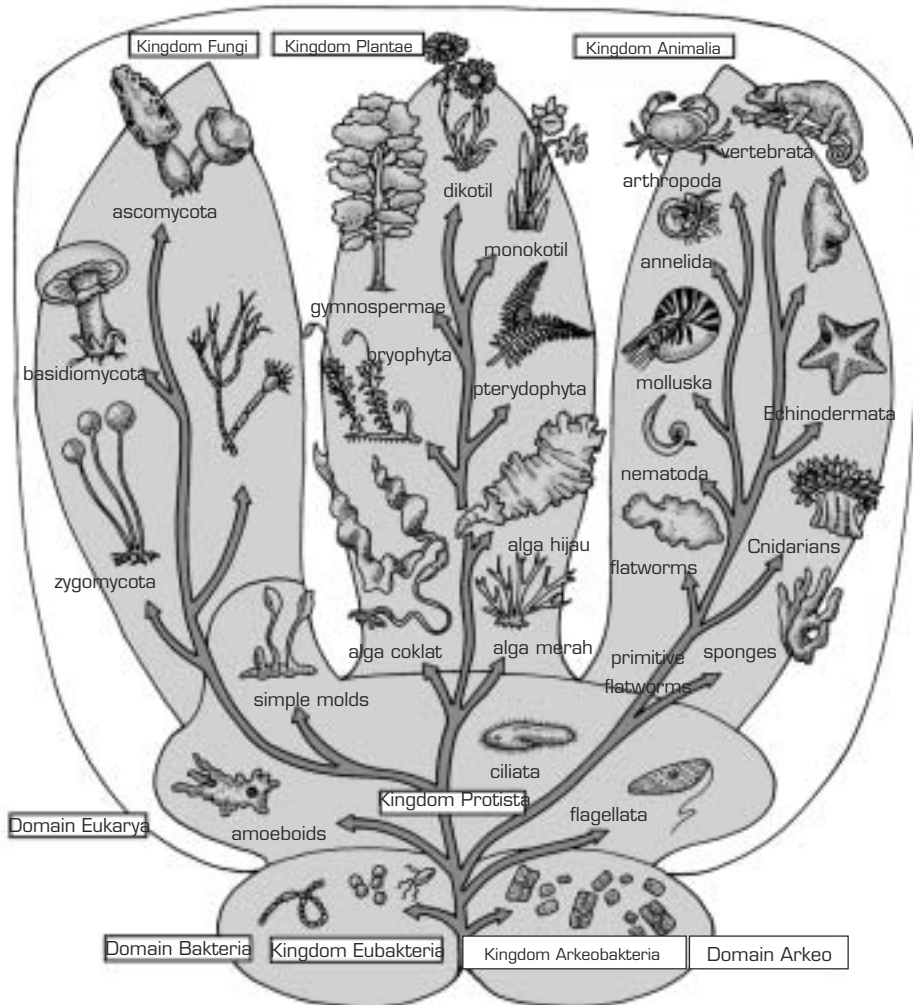


3) Seleksi alam berlanjut sehingga menghasilkan generasi jerapah seperti sekarang.

Gambar 4.3 Teori evolusi menurut Darwin

Sumber: *Biology*, Prentice-Hall

Hal berikutnya, menurut Darwin, seluruh makhluk hidup *berkerabat* melalui garis keturunan dari organisme yang hidup pada zaman purbakala. Keturunan yang berpencar ke berbagai macam habitat di muka bumi akan mengembangkan kemampuannya beradaptasi sampai setiap jenis sesuai dengan habitatnya. Dalam proses adaptasi inilah sebenarnya makhluk hidup sedang melewati fase seleksi alamiah. Karena adaptasi ke berbagai ragam habitat inilah sejarah makhluk hidup dapat digambarkan seperti sebuah pohon yang berangkat dari sebuah titik, menjalar menjadi batang, cabang, ranting, sampai ke ujung ranting, seperti pendapat Whitaker yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada tiap awal percabangan terdapat titik-titik nenek moyang bagi organisme yang berada di cabang-cabangnya. Sungguh analog dengan taksonomi dari Carolus Linnaeus.



Gambar 4.4 Pohon filogenik

Sumber: *Essentials of Biology*, Hopson

- g. **Alfred Russel Wallace (1823-1882)**, mengembangkan teori yang serupa dengan teori Darwin. Dasar teori wallace adalah penelitian Biologi perbandingan di Brasilia dan Hindia Belanda (sekarang Indonesia), dan Malaya. Buku penelitiannya berjudul "On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type". Teorinya sama dengan yang dikembangkan Darwin.
- h. **August Weismann**, menumbangkan teori Lamarck. Weismann memotong ekor tikus beberapa generasi. Menurut teori Lamarck, hal tersebut akan menyebabkan timbulnya jenis tikus yang tidak berekor. Namun, hasil percobaan Weismann menunjukkan bahwa sampai generasi terakhir ekor tikus tetap sama panjangnya.

2. Fakta-fakta yang Mendukung Penerimaan Teori Evolusi Biologi

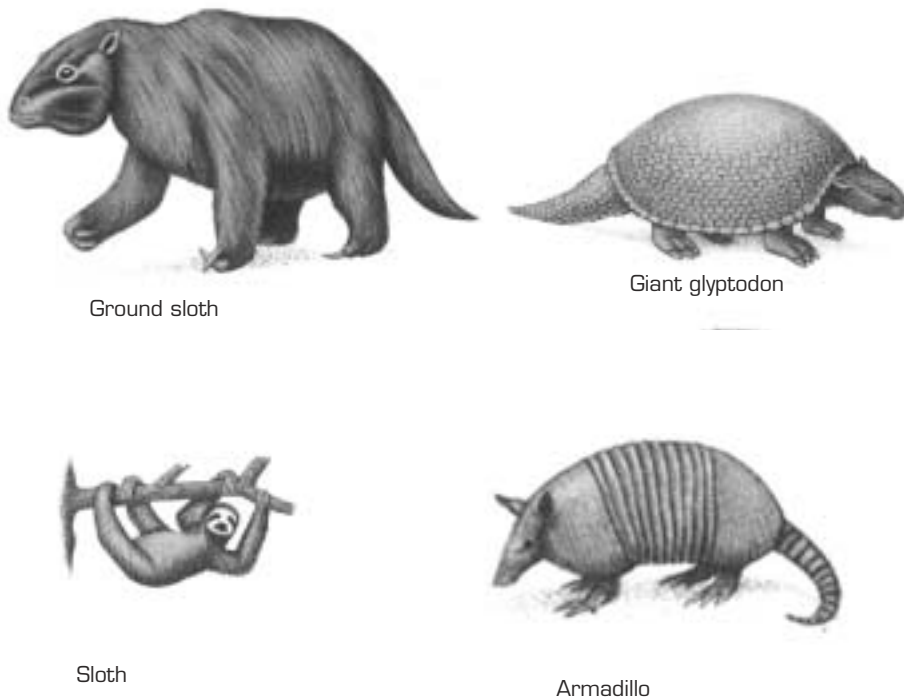
Sembilan contoh teori evolusi tersebut di atas dapat kita renungkan kebenarannya, atau ketidakcocokannya, atau yang mendekati kebenarannya. Kamu dapat membuat simpulan sementara, teori siapa yang mudah kita cari kekuatannya melalui bukti-bukti di alam yang sebenarnya.

a. Fenomena Evolusi

Coba perhatikan fenomena-fenomena yang ditengarai dapat dijadikan bukti terjadinya evolusi.

1) *Kemiripan Struktur Tubuh Hewan Masa Lalu dengan Hewan Modern.*

Dalam beberapa film cerita (misalnya film Jurassic Park) kita melihat animasi binatang-binatang purba, struktur tubuhnya mirip dengan stuktur tubuh binatang-binatang masa kini. Coba kamu lihat gambar-gambar berikut ini.



Sumber: Zoology, Storer

Gambar 4.5 Darwin menekankan bahwa ada hubungan antara hewan masa lalu dan hewan modern. Dia menemukan fosil Glyptodon raksasa, nenek moyang Armadillo

2) *Bervariasinya Struktur Tubuh Organisme dalam Setiap Kelompoknya*

Banyak contoh yang dapat kita temukan, sekelompok hewan, misalnya kucing, anjing, kera, dan lain-lain. Di antara kelompok tersebut kita melihat adanya perbedaan-perbedaan, misalnya tinggi badan, berbetuk kepala, bentuk hidung, bahkan cangkang keong pun bervariasi seperti tampak pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Variasi cangkang keong

Sumber: *Biology*, Prentice-Hall

KEGIATAN 4.1

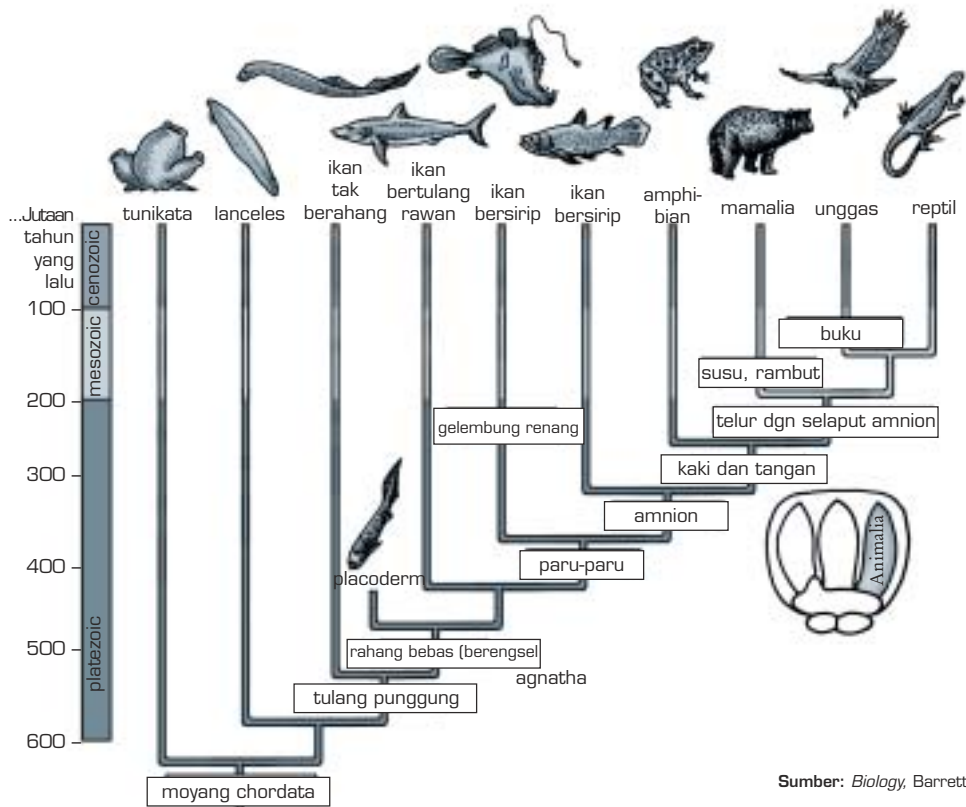
Mencari Bukti-Bukti Evolusi

Bacalah dengan saksama teori evolusi yang kamu peroleh dari berbagai sumber, kemudian cari di berbagai tempat contoh-contoh organisme yang melakukan fenomena kecenderungan sebagai bukti evolusi! Tuliskan laporannya dalam bentuk tabel, berisi informasi tentang nama organisme, fenomenanya, dan penjelasan bahwa itu menjadi bukti evolusi. Lalu presentasikan di depan kelas.

3) *Kemiripan Sifat Dasar Makhluk Zaman Dahulu dengan Makhluk Zaman Sekarang*

Sebagai makhluk hidup pada era mutakhir, kita hanya mengenal berbagai spesies yang hidup saat ini. Di sekeliling kita hidup berbagai organisme yang selama ini nama dan sifatnya kita pahami benar, yaitu kelompok hewan dan tumbuhan. Kita memahami bahwa sudah bersifat naluriah setiap jenis organisme akan saling kawin dengan sesama jenisnya sehingga keturunan mereka memiliki sifat secara konseptual tetap sama dengan induknya. Sejak kapan proses ini terjadi?

Dari fosil-fosil yang ditemukan, orang merekonstruksi morfologi organisme yang hidup pada masa lalu. Ternyata ada kemiripan sifat dasar. Apabila kemudian mengalami beberapa perubahan, itu disebabkan oleh terjadinya proses adaptasi dengan *lingkungan hidupnya* atau habitatnya yang berbeda dengan lingkungan yang dihuni oleh tetuanya. Pada gambar bagan yang disajikan berikut ini dapat dilihat adanya kecenderungan perubahan struktur tubuh berdasarkan jenis lingkungan yang dihuni pada saat jumlah populasi tetua sudah terlalu padat lalu melakukan pemencaran ke tempat-tempat baru yang berbeda karakternya dengan lingkungan lama.

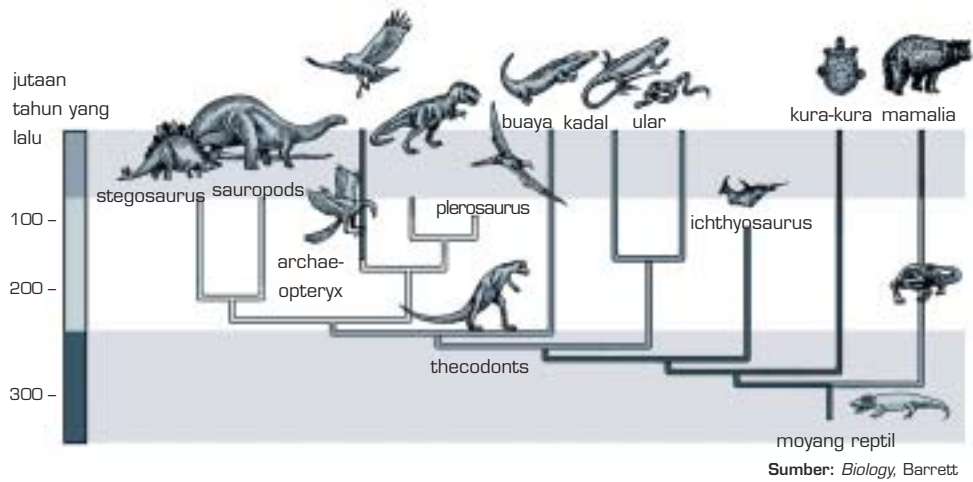


Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 4.7 Bagan evolusi vertebrata

Pada Gambar 4.7 tampak bahwa banyak variasi bentuk tubuh yang terjadi karena adaptasi terhadap bervariasinya karakter lingkungan. Sudah kita ketahui bahwa vertebrata memiliki anggota yang sangat bervariasi yang dikelompokkan menjadi enam kelas (*Chondrichthyes*, *Osteichthyes*, *Amphibia*, *Reptilia*, *Aves*, *Mammalia*). Berdasarkan alur perkembangannya, ternyata keenam kelas tersebut berasal dari tetua yang hidup di air, yaitu ikan tak berahang (*Agnatha primitif*). Nyata sekali bahwa faktor lingkungan menjadi faktor yang sangat berperan terhadap proses evolusi biologi, perhatikan pula Gambar 4.8.

Pada Gambar 4.8 tampak terbentuk berbagai ragam anggota reptilia. Secara konseptual, yang melakukan perkembangan adalah sekelompok hewan yang memiliki persamaan banyak sifat. Berlangsung dalam rentang waktu yang sangat lama, sekitar 200 juta tahun. Perkembangan dari tetuanya (*Cotylosaurus*) sangat unik dan menunjukkan sesuatu yang terus eksis dan terwaris secara estafet. Turunan yang lebih tua dan tetap eksis sampai sekarang (yaitu kura-kura, tuatara, kadal, dan ular). Namun, turunan yang lebih muda ada yang telah punah (kelompok reptil raksasa dengan nama kelompok *Saurus*), ada pula yang eksis sampai sekarang (buaya dan variannya). Dapat disimpulkan bahwa evolusi ditandai dengan adanya faktor





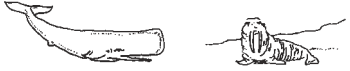





Gambar 4.8 Perkembangan reptil dan turunan berikutnya, unggas, dan mamalia sejak 300 juta tahun yang lalu

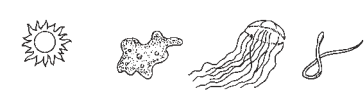
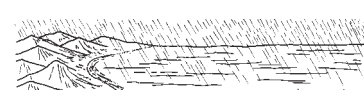


penentu sifat yang kita sebut gen yang terwaris secara turun-temurun. Jika ada keturunan, jelas didahului dengan perkawinan. Berarti semua spesies harus memiliki *kemampuan melakukan reproduksi*. Perkawinan artinya memadukan sifat-sifat yang berbeda antara induk jantan dan induk betina. Hasilnya adalah keturunan kombinasi (rekombinan) yang fenotipenya bisa berbeda dengan induk, baik morfologi, anatomi maupun fisiologinya. *Bervariasinya* keturunan merupakan potensi daya adaptasi suatu kelompok spesies di berbagai macam habitat sehingga menghasilkan variasi spesies. Artinya, proses evolusi berjalan karena adanya variasi sifat pada keturunan, kemudian sifat tersebut mampu beradaptasi dengan lingkungan itu sendiri. Perkembangan reptilia merupakan contoh adanya kekuatan gen tertentu terhadap seleksi alam sehingga kelompok reptil tetap bertahan di muka bumi saat ini, di daratan maupun di perairan. Dari penjelasan ini, ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap proses evolusi biologi, yaitu *lingkungan, gen, fertilitas, adanya variasi sifat, dan daya adaptasi*.

4) Hubungan antara Waktu dan Perubahan Sifat Organisme

Sebagai makhluk yang hidup pada era terakhir, tentu kita tidak dapat menyaksikan langsung proses evolusi biologi. Dari temuan fosil di berbagai lapisan batuan, ahli geologi menyimpulkan bahwa proses evolusi biologi berlangsung sejak dua miliar tahun yang lalu. Perhatikan tabel yang memuat data kurun waktu eksistensi setiap kelompok makhluk hidup dan waktu kemunculannya.

Tabel 4.1 Perkembangan Kehidupan di Bumi

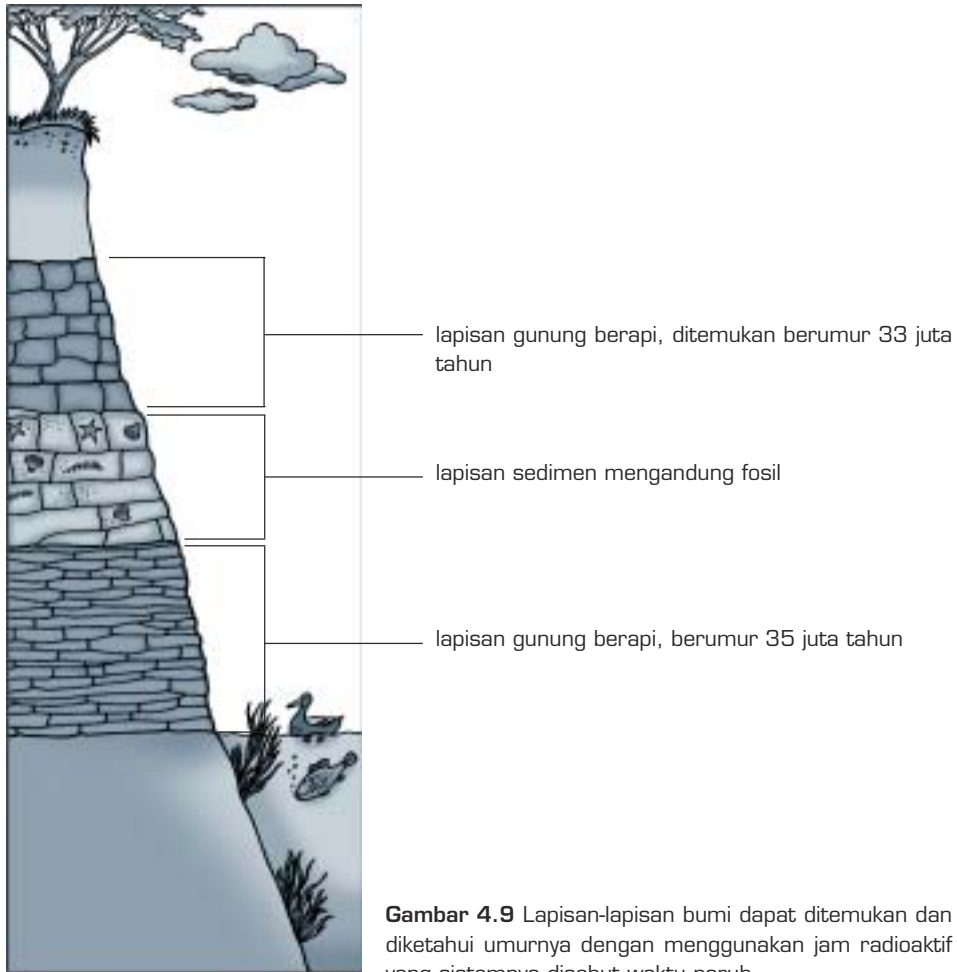
Masa (... tahun yang lalu)	Peristiwa (... tahun yang lalu)	Gambar
20-50 ribu	Manusia, tanaman, dan hewan abad modern. Disebut abad atom.	
1-60 juta	Evolusi mamalia yang lebih tinggi derajatnya, evolusi tanaman. Penyebaran tumbuhan berbunga lebih besar.	
50 juta	Beberapa mamalia memasuki samudra. Secara bertahap penyebaran tanaman berbunga.	
100-150 juta	Mamalia pertama dan burung pertama muncul. Juga menyebarnya tanaman berbunga.	
125-200 juta	Muncul reptil purba, berkembangnya hutan Gimnospermae dan munculnya tanaman berbunga.	
250-300 juta	Amfibi, insekta, lumut, dan paku mulai muncul di hutan-hutan dan rawa.	
350 juta	Mulai muncul hewan yang berhasil menembus darat, juga tumbuhan. Muncul vertebrata di laut, sejenis ikan.	
500 juta	Terbentuk kelompok besar invertebrata di lautan, juga alga, dan cacing laut.	

1 miliar	Muncul populasi organisme bersel satu dan organisme multisel sederhana, dan invertebrata laut. Awal terjadinya fotosintesis.	
2-4 miliar	Pembentukan molekul organik kompleks pada lautan primitif awal terjadinya kehidupan.	
4-5 miliar	Terbentuknya bumi dan planet lainnya sebagai anggota Tata surya.	
10 miliar	Terjadinya jagat raya.	

Sumber: *Introductory Biology*, Jones, Gaudin

Berdasarkan tabel perkembangan kehidupan di bumi tersebut, tampak bahwa untuk berkembangnya setiap spesies dibutuhkan waktu yang sangat lama, dan bertahap sifat demi sifat dalam tubuh organisme yang berevolusi. Namun, tetap harus berpijak pada prinsip-prinsip Darwin bahwa perubahan tersebut bukan tanpa tujuan, melainkan karena *kebutuhan beradaptasi terhadap lingkungan yang berubah atau lingkungan yang berbeda, adanya variasi gen, terbentuknya rekombinan, serta kecenderungan makhluk hidup untuk menyebar ke tempat yang baru akibat tekanan populasi dan kebutuhan akan makanan*. Lamanya waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya perubahan sifat pada suatu organisme itu juga tidak terlepas dari *daya toleransi yang tinggi dari gen-gen tertentu*. Jika hampir seluruh gen dalam tubuh individu memiliki daya tahan tinggi terhadap berbagai perubahan lingkungan, maka sifat-sifat organisme tersebut semakin lama eksistensinya di muka bumi. Contohnya adalah kura-kura yang muncul lebih dahulu daripada kelompok saurus, yakni sekitar 200 juta tahun yang lalu, tetapi sampai saat ini berbagai jenis kura-kura masih ada, sementara kelompok saurus sudah punah sejak 65 juta tahun yang lalu.

Bukti adanya fosil di setiap lapisan batuan bumi tidak dapat disangkal lagi bahwa perubahan sifat membutuhkan waktu lama. Dengan alat pengukur umur batuan dapat diketahui umur setiap lapisan batuan, ratusan tahun sampai miliaran tahun. Dengan sendirinya, hal ini menjadi petunjuk bahwa organisme yang terpendam dalam batuan tertentu umurnya sama dengan batuan tersebut, lihat Gambar 4.9.



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 4.9 Lapisan-lapisan bumi dapat ditemukan dan diketahui umurnya dengan menggunakan jam radioaktif yang sistemnya disebut waktu paruh

b. Bukti-Bukti yang Berkaitan dengan Teori Evolusi

Evolusi yang diyakini telah berlangsung miliaran tahun akan benar-benar dipercaya apabila kebenarannya dapat diterima dan ditinjau dari segi ilmiah. Diketahui bahwa para ilmuwan yang menaruh perhatian pada evolusi telah menggunakan sebanyak mungkin cabang-cabang ilmu pengetahuan yang dapat membantu mereka menguak tabir evolusi tersebut, seperti Arkeologi, Paleontologi, Taksonomi, Anatomi, Morfologi, Fisiologi, Geologi, Kimia, Fisika, Sitologi, dan Biologi molekuler, serta pengetahuan mutakhir tentang DNA. Melalui aplikasi ilmu-ilmu itu mereka menemukan bukti kuat tentang terjadinya evolusi, meskipun kalangan yang tidak percaya tetap tidak percaya. Apa bukti evolusi tersebut?

1) *Fosil sebagai Salah Satu Bukti Terjadinya Evolusi Biologi*

Fosil adalah bagian tubuh makhluk hidup yang telah membatu karena tertimbun lapisan batuan dan mengalami proses kimiawi dan pemanasan yang tinggi selama ribuan sampai jutaan tahun. Telah banyak fosil yang ditemukan dan menjadi petunjuk bagi para peneliti tentang sejarah makhluk hidup.

Contoh-contoh fosil yang telah ditemukan adalah sebagai berikut.

- a) Fosil sejenis domba berusia 2500 tahun.
- b) Rayap berusia 30 juta tahun.
- c) Fosil *Crinoidea* berusia 250 juta tahun.
- d) Fosil tumbuhan paku yang berusia 265 juta tahun.
- e) Berbagai tumbuhan yang berusia 150 juta tahun.
- f) Fosil capung (*Protolindenia wittei*) berusia 150 juta tahun.
- g) Fosil burung purba (*Archaeopteryx*) yang menunjukkan adanya hubungan berantai antara *reptil aves*.

Beberapa contoh tersebut dapat kamu lihat pada Gambar 4.10.



Tumbuhan membatu berusia 150 juta tahun



Domba berusia 2.500 tahun



Sisa fosil dari burung *Archaeopteryx*



Lalat dalam amber

Sumber: *Biology for You*, Gareth Williams

Gambar 4.10 Beberapa fosil yang ditemukan sebagai catatan terjadinya evolusi

INFO BIOLOGI

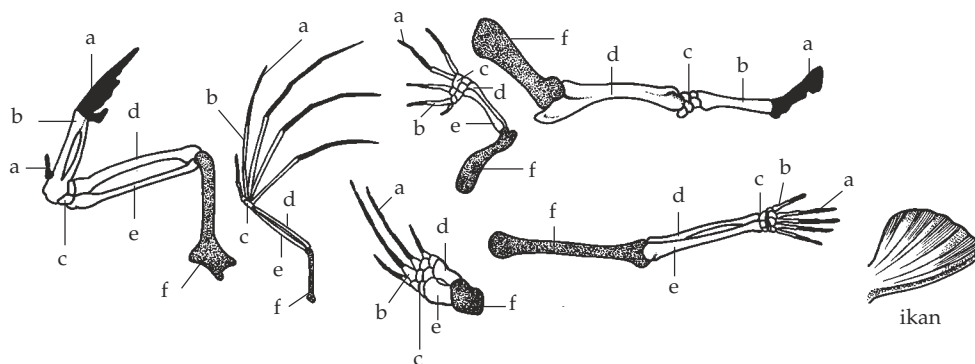
Membuat Amber Tiruan

Amber adalah batuan/fosil dari tetesan getah tanaman yang di dalamnya terperangkap makhluk hidup. Tubuh makhluk yang terperangkap tidak mengalami perubahan fisik, seolah-olah diawetkan di dalam batuan tersebut. Keistimewaan amber yaitu jernih seperti gelas, sehingga makhluk yang ada di dalamnya tampak jelas.

Kita dapat membuat amber tiruan. Caranya dengan menyiapkan bioplastik, zat yang dibuat dari bahan resin. Bioplastik dapat dibeli di toko-toko kimia. Dengan bioplastik, kita dapat mengawetkan makhluk hidup atau bagian-bagian tubuhnya. Tentu kalian sering melihat atau memiliki gantungan kunci berupa benda bulat, lonjong atau pipih, di dalamnya terdapat serangga, udang-udangan, kepiting, biji-bijian, bunga dan lain-lain. Itulah amber tiruan yang terbuat dari bioplastik.

2) Homologi Alat-Alat Tubuh

Sudah lama orang menemukan kenyataan adanya kemiripan struktur anggota badan pada organisme kelompok vertebrata. Secara morfologi sulit rasanya mengakui bahwa ada hubungan kekerabatan struktur tubuh di antara anggota vertebrata. Bagaimana mungkin kita menyatakan kesamaan lengan kita dengan sirip ikan paus dan tungkai anjing misalnya. Namun, kekerabatan yang dimaksud Darwin dapat kita lihat pada gambar perbandingan anatomi tungkai depan kelompok vertebrata



Keterangan:

- a. jari
- b. telapak tangan
- c. pergelangan tangan

- d. hasta
- e. pengumpil
- f. lengan atas

Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 4.11 Homologi alat tubuh vertebrata

Dilihat dari proporsi dan ukuran tubuh, anggota vertebrata memang berbeda-beda. Akan tetapi, struktur pokoknya sama. Secara anatomis, asal terbentuknya tungkai depan hewan-hewan vertebrata sama, yaitu *tumbuh dari lapisan mesoderm* saat bakal individu mencapai tahap gastrula pada perkembangan embrionya. Selanjutnya, karena tumbuh dan hidup di habitat berbeda, tungkai depan berkembang menjadi anggota badan yang berbeda bentuk dan fungsinya. Kesamaan asal pembentukan kemudian berbeda fungsinya ini disebut dengan *homologi*.

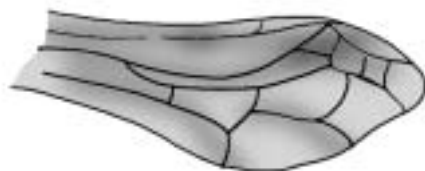
Menurut Darwin keserupaan ini berjalan dari vertebrata yang sederhana, yaitu amfibi, menuju struktur reptil, aves, kemudian mamalia, ditempuh dalam waktu ratusan juta tahun. Evolusi tungkai depan ini terjadi akibat keadaan alam yang selalu berubah-ubah menjadi daratan atau perairan. Dengan adanya ekosistem yang berbeda-beda, munculnya variasi sifat pada keturunan dan adanya kecenderungan penyebaran, maka tungkai-tungkai depan ini berbeda fungsi. Ada yang digunakan untuk berenang, yaitu pada ikan paus; untuk terbang, pada kelelawar dan burung; untuk berlari pada anjing, kuda, dan harimau; dan untuk bekerja pada manusia.

Homologi tidak hanya terjadi pada tungkai depan, tetapi juga pada tungkai belakang dan beberapa organ lainnya. Ada pula organ tubuh yang bersifat homolog juga bersifat *analog* (fungsinya sama). Contohnya sayap kelelawar dengan sayap burung, dan kaki kuda dengan kaki harimau. Coba kamu cari contoh lainnya.

Bagaimana dengan sayap burung dan sayap belalang? Perhatikan Gambar 4.12, Belalang merupakan hewan anggota insekta dan invertebrata. Sayap belalang merupakan modifikasi rangka luar tubuhnya berupa membran tipis beralur mirip vena daun. Dengan demikian, sayap burung tidak homolog dengan sayap belalang karena asal pembentukannya berbeda. Akan tetapi, fungsi sayap kedua hewan tersebut sama, yaitu sebagai alat untuk terbang. Artinya, sayap burung analog dengan sayap belalang. Struktur lain yang bersifat analog, yaitu insang ikan dengan insang udang.

Gambar 4.12

Analogi sayap serangga (a) dengan sayap burung (b)



(a)



(b)

Sumber: *Biology*, Barrett

Dari pengertian dan contoh, tampak bahwa homologi menunjukkan adanya kekerabatan yang lebih dekat di antara anggota yang bersangkutan. Adapun analogi belum tentu menunjukkan adanya hubungan kekerabatan di antara hewan yang bersangkutan.

Jika membahas homologi pada anggota tubuh vertebrata, kita akan bertanya tentang tidak adanya tungkai pada ular. Ular merupakan contoh hewan yang mengalami rudimentasi organ tubuh, yaitu rudimentasi pada tungkai. Rudimentasi disebut juga *atrofi* atau degenerasi. Ada pula hewan yang organ tubuhnya mengalami vestigial (menyusut), misalnya, mengecilnya gigi taring manusia. Contoh lainnya, yaitu sebagai berikut.

Tabel 4.2 Beberapa organ rudimen dan vestigial

Organ Rudimen	Organ Vestigial
<ol style="list-style-type: none"> 1. Kuku tunggal kuda 2. Gigi bungsu pada manusia 3. Ekor pada manusia 4. Tungkai belakang pada paus, lumba-lumba, dan duyung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lingkar panggul paus 2. Usus buntu pada manusia 3. Jari-jari pada sayap burung

Dapatkan kamu membedakan antara organ rudimen dan organ vestigial?

Tugas 4.1

Kunjungi museum zoologi atau museum geologi di kota-kota terdekat, atau suatu tempat yang telah diketahui merupakan situs tempat ditemukannya rangka makhluk purba.

Di museum dan tempat-tempat situs tersebut kamu akan menemukan hewan-hewan yang memiliki kemiripan susunan rangka. Catat nama-nama hewan di tempat tersebut yang memiliki struktur tubuh analog dan struktur tubuh homolog. Buatlah laporan dalam bentuk tabel. Jika memungkinkan, lengkapi dengan foto-foto.

KEGIATAN 4.2

Membandingkan rangka vertebrata

- Tugas 1: a. Buatlah awetan tulang-tulang hewan vertebrata, misalnya:
- 1) burung
 - 2) katak
 - 3) ayam
 - 4) kucing (jika menemukan kucing mati)
 - 5) marmut

- b. Sediakan pula tiruan rangka manusia.
- c. Beri warna cat yang sama pada bagian tulang yang sama (mirip) bentuknya, misalnya tulang paha diberi warna merah.
- d. Sumbangkan rangka-rangka tersebut untuk melengkapi sarana laboratorium biologi di sekolahmu.

Tugas 2: Catatlah nama-nama tulang yang homolog, pada karton manila, dan sertakan dekat rangka-rangka vertebrata tersebut.

3) *Perbandingan Fase Embrio pada Anggota Vertebrata*

Tidak ada satu pun organisme yang muncul begitu saja tanpa melalui induknya. Pada salah satu cara pembiakan, dimulai dengan pembuahan (masuknya sperma pada telur). Hasilnya adalah sebuah zigot yang akan mengalami tahapan-tahapan menuju embrio. Tahapan tersebut adalah zigot bersel satu, kemudian morula yang bersel banyak, blastula yang sel-selnya telah teratur, gastrula awal memiliki dua lapisan sel-sel, gastrula akhir yang memiliki garis-garis lapisan lembaga kemudian menjadi embrio. Embrio menjadi individu muda setelah didahului dengan diferensiasi lapisan-lapisan lembaga.

Perkembangan individu dari zigot sampai dewasa disebut *ontogeni*. Jika dilihat keadaan zigot sampai individu muda, kita seperti menyaksikan evolusi makhluk hidup secara singkat. Fase-fase dalam ontogeni tersebut seperti urutan munculnya filum-filum filogeni yang berlangsung jutaan tahun. Perhatikan fase-fase ontogeni dan urutan munculnya filum-filum berikut ini.

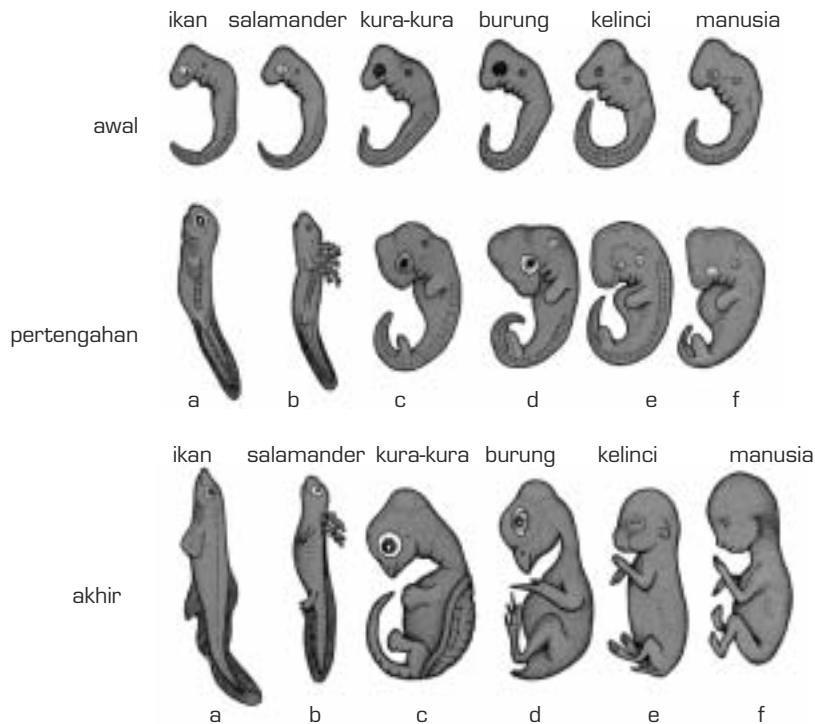
- a) Fase zigot, seperti kelompok Filum Protozoa.
- b) Fase morula seperti Protozoa berkoloni yang individunya dapat dibedakan.
- c) Fase blastula seperti koloni *Volvox*.
- d) Fase gastrula awal seperti filum *Coelenterata*.
- e) Fase gastrula akhir dengan selom dari lapisan lembaga seperti filum *Annelida*.
- f) Fase embrio sampai janin dan individu seperti munculnya filum *Cordata*.

Secara ringkas kita dapat menegaskan bahwa ontogeni itu merupakan ulangan singkat dari filogeni. Perhatikan perbandingan di bawah ini.

Ontogeni: telur – zigot – blastula – gastrula – embrio – individu

Filogeni: Protozoa – Coelenterata – Annelida – Chordata

Pendapat ini disebut *Teori Rekapitulasi* dari Von Baer. Hubungan kekerabatan di antara anggota Vertebrata ditemukan kembali pada tahap awal embrionya. Perhatikan Gambar 4.13.



Sumber: *Biology*, Barrett.

Gambar 4.13 Perbandingan embrio dari berbagai filum vertebrata

Dari Gambar 4.13 kita dapat melihat perbandingan embriologi pada zigot beberapa vertebrata lainnya, yaitu pada ikan (a), salamander (b), kura-kura (c), burung (d), kelinci (e), dan manusia (f) yang menunjukkan bahwa semakin sedikit perbedaan pada tahap-tahap perkembangan embrio, semakin dekat kekerabatannya.

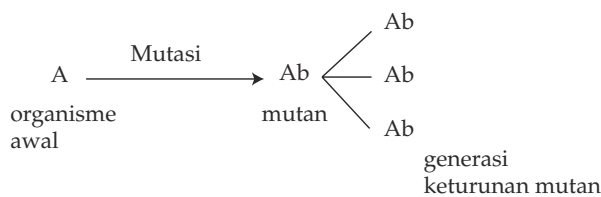
3. Kaitan Mutasi dengan Proses Evolusi

Perubahan yang bersifat evolusioner melalui seleksi alam yang dikemukakan oleh Darwin terjadi di dalam populasi suatu organisme. Berarti evolusi bersifat komunal (terjadi serempak dalam suatu komunitas). Akan tetapi, secara jelas Darwin menyatakan bahwa setiap individu dalam populasi merupakan objek evolusi. Seleksi alam terjadi pada individu yang mampu berkembang biak dan menghasilkan variasi. Dijelaskan pula bahwa setiap varian yang cocok dengan lingkungan akan melanjutkan keberadaannya di alam ini. Namun, apakah munculnya variasi selalu karena gen ayah dan ibu yang berpasangan secara acak? Apakah alam tidak berperan dalam faktor genetis?

Gejala alam yang mengarah pada bentuk dan struktur tubuh dari populasi suatu organisme sehingga mengalami evolusi disebut *mutasi*. Hal ini sesuai dengan yang dikatakan Hugo de Vries, seorang ahli botani Belanda bahwa variasi genetik merupakan akibat dari mutasi gen yang menyebabkan terjadinya evolusi.

Mutasi dapat mengubah informasi genetik terhadap individu baru dan menambah jumlah variasi dalam suatu populasi. Banyak sekali mutasi terjadi dalam organisme yang telah mampu beradaptasi dengan alam dan hanya sedikit mutasi yang mendatangkan keuntungan bagi individu-individu yang mengalaminya. Sebaliknya, banyak mutasi yang merusak dan menyebabkan kematian. Organisme yang telah mampu beradaptasi dengan alam, tiba-tiba harus memiliki bagian-bagian tubuh yang tidak harmonis dengan lingkungan. Tentu saja organisme tersebut harus tersisih dari lingkungannya.

Bagi organisme mutan yang beruntung, ia akan terus bertahan hidup, mewariskan gen mutannya turun-temurun kepada generasi baru. Hal ini dapat digambarkan dalam bagan berikut ini.



Gambar 4.14 Bagan proses evolusi karena mutasi



Sumber: *Exploring Biology*, Smith

Gambar 4.15 Varian atau mutan buatan

Bagan tersebut di atas digambarkan sebagai proses evolusi karena mutasi. Generasi baru akan semakin bervariasi apabila di antara *mutan* yang subur (fertil) dapat melakukan perkawinan dan membentuk rekombinan. Sekarang, manusia dengan kecanggihan ilmunya dapat membuat *evolusi cepat* dengan adanya rekayasa genetik sehingga mampu menciptakan varian baru atau mutan buatan dalam waktu singkat. Contohnya dapat kita lihat pada Gambar 4.15

Sebenarnya mutasi dapat dikatakan sebagai sumber terbentuknya varian karena hasil mutasi tetap dapat diwariskan. Dengan demikian, perubahan sifat pun tampak pada varian dari generasi ke generasi. Namun, tidak semua produk mutasi dapat menghasilkan keturunan (subur) sebab umumnya mutan bersifat steril. Dari hasil penelitiannya, Darwin mengemukakan

pendapatnya bahwa variasi-variasi yang dapat diwariskan merupakan bahan mentah dari perubahan struktur yang bersifat revolusioner, termasuk variasi akibat mutasi. Bukti-bukti menunjukkan bahwa mutasi terjadi secara sembarang tempat, sembarang waktu, di luar keteraturan sistem kehidupan sehingga menambah keragaman jenis makhluk hidup. Apa pun hasil mutasi, sebenarnya Sang Maha Pencipta tidak pernah sia-sia menciptakan sesuatu.

Sama halnya dengan gen-gen lainnya, gen mutan di dalam populasinya juga mengalami seleksi alam terus-menerus. Sementara melewati proses seleksi, seluruh varian memiliki risiko mutasi menjadi varian baru, yang sesuai ataupun tidak sesuai dengan kondisi lingkungannya. Namun, jangan lupa bahwa pada setiap organisme selalu ada gen yang diwariskan dari tetua kepada keturunannya dan gen ini tidak mengalami mutasi, tidak juga mengalami kepunahan akibat seleksi alam. Artinya, di sepanjang lintas evolusi ada saja gen yang eksis secara abadi, selalu adaptif terhadap berbagai perubahan alam sehingga kita dapat melihat dengan jelas adanya kekerabatan struktur tubuh di antara berbagai kelompok organisme. Persis seperti yang digambarkan oleh Linnaeus dan Darwin, evolusi biologi itu seperti sebuah pohon yang memiliki cabang utama dan ranting-rantingnya.

4. Mekanisme Evolusi

Secara umum, berbagai spesies diberi sifat-sifat dasar yang sama, sebagai alat untuk memenuhi kebutuhan dasar kehidupan, di antaranya kemampuan untuk *berkembang biak*. Berbagai cara berkembang biak merupakan kemampuan yang ditunjukkan oleh berbagai organisme. Namun, yang memberi peluang besar untuk terbentuknya kombinasi sifat yang baru (rekombinan) adalah *cara berbiak secara kawin*. Dalam perjalanan, eksistensi suatu jenis organisme yang sudah jelas harus berjuang melawan seleksi alam, terbentuknya rekombinan juga disertai dengan peluang terjadinya mutasi. Hal ini sangat kondusif bagi berlangsungnya *spesiasi* dalam suatu populasi. Dapat dikatakan bahwa spesies baru pada tiap generasi merupakan wadah terkumpulnya sejumlah gen yang bervariasi akibat perkawinan induknya dan akibat mutasi. Oleh karena itu, di dalam populasinya, spesies dikatakan sebagai *gen pool*. Bagaimana kita dapat memastikan bahwa sekumpulan individu di suatu tempat adalah sebuah populasi satu jenis organisme? Secara sederhana kadang-kadang kita menyimpulkan sebuah populasi dengan melihat sekumpulan organisme yang sama ciri-ciri morfologinya. Kemudian menyimpulkan bahwa dua individu berbeda jenis (spesies) karena morfologinya berbeda. Hal ini ternyata tidak seluruhnya benar. Untuk memastikan sekumpulan individu di suatu tempat merupakan satu spesies, mereka dapat saling kawin dan menghasilkan keturunan yang fertil (subur). Meskipun secara morfologis individu-individu itu berbeda, mereka adalah satu jenis apabila dapat membentuk keturunan fertil. Spesies seperti ini

dinamakan *polimorfik*. Bagi orang-orang yang telah memahami nukleotida dalam DNA (yang ada di dalam suatu populasi), polimorfik merupakan hal yang sangat wajar karena diketahui bahwa di dalam satu spesies terdapat gen-gen yang sangat heterogen.

a. Hukum Hardy Weinberg

Sir Goldrey Hardy (ahli statistika dari Inggris) dan Wilhelm Weinberg (ahli fisika dari Jerman) menemukan hubungan yang bersifat matematis antara fenotipe dan frekuensi pasangan gen (alel) dalam suatu perkawinan sembarang pada suatu populasi. Cara penghitungannya diselesaikan dengan menggunakan rumus yang disebut *Hukum Hardy–Weinberg*. Penjelasannya sebagai berikut.

Andaikan pada sepasang kromosom homolog di dalam individu suatu populasi terdapat dua macam alel, yaitu M dan m yang dalam rumus dilambangkan dengan p dan q , maka jumlah tiap-tiap alel dalam populasi tersebut dirumuskan $p + q = 1$. Dalam perkawinan satu sifat beda (monohibrid) secara acak, Mendel menemukan rasio genotipe $1 MM : 2 Mm : 1mm$. Jika dikonversikan ke dalam rumusan, menjadi $p^2 : 2pq : q^2$. Dalam rumus $p + q = 1$, jika frekuensi gen M dalam populasi 0,5, frekuensi gen m adalah 0,5. Jadi, frekuensi genotipe MM adalah 0,25 ($0,5 \times 0,5$); frekuensi genotipe mm 0,25 pula; dan frekuensi genotipe Mm yaitu 0,50 ($2pq = 2 \times 0,5 \times 0,5$). Jika dikaitkan dengan fenotipenya, frekuensi *sifat yang diekspresikan oleh gen dominan* 0,75 ($1 MM + 2 Mm$), dan frekuensi *sifat yang diekspresikan oleh gen resesif* adalah 0,25 ($1mm$).

Perhitungan matematis seperti dikemukakan di atas memungkinkan bagi kita untuk memperkirakan bahwa apabila kedua macam fenotipe itu memiliki peluang hidup yang sama seperti generasi induknya, frekuensi gen dan frekuensi genotipe generasi berikutnya memiliki perbandingan yang sama dengan generasi induknya. Perbandingan akan berubah jika salah satu populasi yang mengandung fenotipe yang dimaksud mengalami hal-hal yang mengganggu, di antaranya mutasi, perubahan alam, migrasi, sulit melakukan perkawinan secara acak, dan anggota populasi memiliki banyak perbedaan dalam hal daya juang hidup, dan fertilitas. Hal ini mengisyaratkan bahwa hukum Hardy – Weinberg akan berlaku apabila suatu populasi memenuhi persyaratan berikut ini.

- Tidak ada anggota populasi yang mengalami mutasi.
- Tidak terjadi migrasi dari dalam ke luar atau dari luar ke dalam populasi.
- Tidak ada perubahan alam.
- Jumlah anggota populasi banyak sehingga memungkinkan terjadinya perkawinan secara acak.

- e. Seluruh anggota populasi memiliki daya adaptasi yang sama dan fertilitas yang sama.

Dalam kenyataan, persyaratan tersebut di atas sangat sulit terpenuhi. Ketika salah satu syarat tidak dapat dipenuhi, maka terjadilah *perubahan frekuensi gen*. Perhatikanlah contoh berikut!

Di suatu kebun bunga terdapat 100 buah tanaman bunga. Sembilan puluh (90) tanaman berbunga merah, dan sepuluh (10) tanaman berbunga putih. Gen penentu warna bunga merah bersifat dominan (M), dan gen penentu warna bunga putih bersifat resesif (m). Berapa frekuensi gen dominan dan frekuensi gen resesif tersebut? Berapa frekuensi genotipnya?

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

$$MM + 2 Mm + mm = 1$$

$$P^2 + 2pq = 90\% \text{ (karena tanaman berbunga merah 90 buah)}$$

$$q^2 = 10\% \text{ (karena tanaman berbunga putih 10 buah)}$$

$$mm = 10\% = 0,10, \text{ maka frekuensi } m = \sqrt{10} = 0,32 \text{ atau } 32\%.$$

$$p + q = 1, \text{ atau } M + m = 1, \text{ maka frekuensi } M = 1 - 0,32 = 0,68 \text{ atau } 68\%.$$

$$\text{Frekuensi genotipe } MM : 2 Mm : mm \text{ yaitu } (0,68)^2 + 2 \times (0,68)(0,32) + (0,32)^2 = 46\% + 44\% + 10\%$$

Jika seluruh tanaman di kebun bunga tersebut memiliki fertilitas dan terjadi persilangan secara acak, bagaimana frekuensi perbandingan genotipe keturunannya? Anggaplah semua tanaman memiliki fertilitas, maka gamet jantan maupun gamet betina memiliki 68% M dan 32% m.

Gamet betina	Gamet jantan		Keterangan:
	0,68 M	0,32 M	
0,68 M	0,4624 ¹⁾	0,2176 ²⁾	1) MM = 0,4624 = 46%
0,32 m	0,2176 ³⁾	0,1024 ⁴⁾	2) Mm = 0,2176 = 22%
			3) Mm = 0,2176 = 22%
			4) mm = 0,1024 = 10%

Dengan demikian, tanaman generasi berikutnya memiliki perbandingan:

$$46\% MM + 44\% Mm + 10\%$$

Apabila terjadi perubahan pada anggota populasi, misalnya tanaman berbunga putih dengan alasan yang tidak jelas tidak mampu bereproduksi, maka persilangan terjadi hanya di antara tanaman berbunga merah saja. Bagaimana frekuensi gen m? Jumlah individu yang fertil adalah tanaman yang berbunga

merah = 90 buah. Persentase yang akan bereproduksi, 90 tanaman = 100%
 Genotipe tanaman yang reproduktif : 46% MM + 44% Mm = 90 tanaman = 100 %

Persentase tanaman dengan genotipe MM = $\frac{46}{90} = 51\%$

Persentase tanaman dengan genotipe Mm = $\frac{44}{90} = 49\%$

Pembentukan gamet pada induk adalah sebagai berikut:

Induk	Gamet yang Terbentuk		
	M	m	Jumlah
51% MM	51%	0%	51%
49% Mm	24,5%	24,5%	49%
Jumlah	75,5%	24,5%	100%

Tipe perkawinannya:

Gamet Jantan	Gamet Betina	
	75,5% M	24,5% m
75,5% M	56% MM	19%Mm
24,5% m	19%Mm	6%mm

Keterangan:

- 1) : MM = 56%
- 2) : Mm = 38%
- 3) : mm = 6%

Sekarang (pada generasi baru) frekuensi genotipe berubah menjadi:

MM + 2Mm + mm = 56% + 38% + 6%

Frekuensi fenotipe berubah pula:

Tanaman berbunga merah : 94%, tanaman berbunga putih : 6%

Frekuensi gen turut berubah : gen M = 75,5% dan gen m = 24,5%

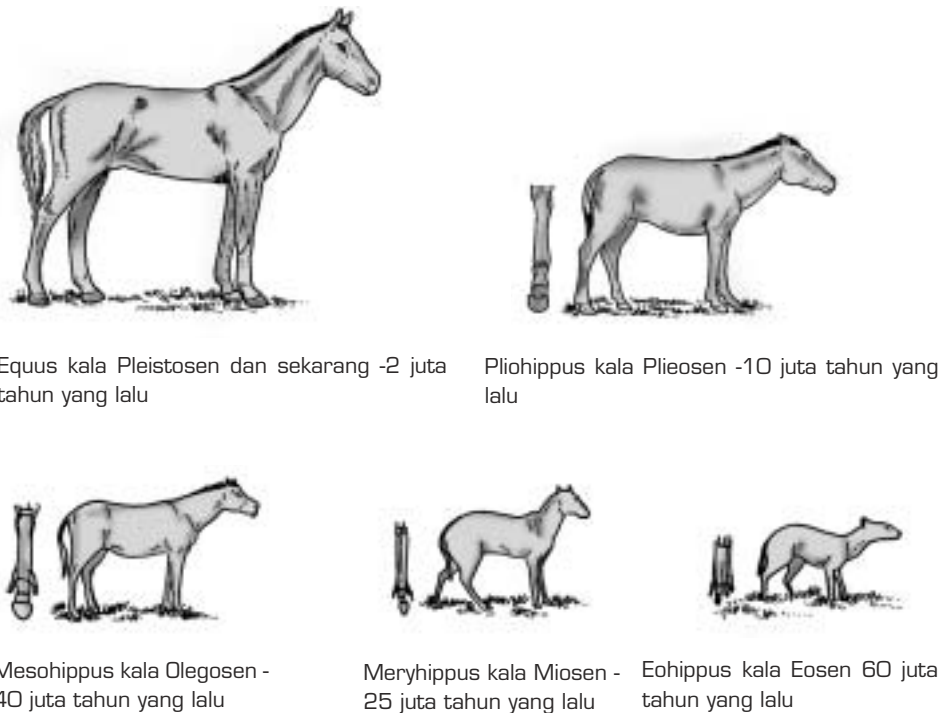
Dibandingkan dengan generasi sebelumnya, frekuensi gen M naik sekitar 7,5% dan frekuensi gen m turun sekitar 7,5%.

Jika individu dengan genotipe mm terus-menerus tidak produktif, kemungkinan gen m akan punah pada populasi tersebut.

Berdasarkan contoh soal tadi, jelaslah bahwa seleksi alam dan evolusi berjalan justru ketika hukum Hardy – Weinberg tidak berlaku. Apabila hukum tersebut berlaku pada suatu populasi akan terjadi kestabilan suatu struktur tubuh spesies dan keanekaragaman spesies cenderung tidak berkembang.

B. Informasi Ilmiah tentang Evolusi Makhluk Tertentu

Rekaman evolusi paling lengkap yang telah ditemukan, yaitu evolusi kuda. Fosil kuda ditemukan di berbagai lapisan batuan sehingga evolusi kuda dapat dilacak secara jelas. Setiap organisme mengalami perubahan struktur tubuh secara bertahap dan dalam waktu yang sangat lama, hal tersebut tergambar pada evolusi kuda (Gambar 4.16).



Sumber: *Biology*, Barrett

Gambar 4.16 Perkembangan kuda dari zaman Eosin hingga zaman modern

Berdasarkan fosil-fosil yang telah ditemukan, kuda jenis pertama diduga hidup pada zaman *Eosin* sekitar 60 juta tahun yang lalu, diberi nama *Eohippus*. Ukurannya sebesar kucing modern, berleher pendek, menghuni hutan Amerika Utara, berjalan dengan seluruh telapak kaki.

Seiring dengan perubahan iklim yang semakin panas, dan hutan yang semakin sempit karena sebagian hutan lambat laun berubah menjadi dataran rumput, kuda berevolusi menjadi gigi pengunyah rumput. Selain itu, alam juga menyeleksi tubuh kuda. Kuda yang mampu beradaptasi memiliki tubuh lebih tinggi dengan tungkai panjang dan otot kuat, yang kita namakan *Equus*, yaitu kuda yang hidup saat ini. *Equus* muncul sejak zaman *Pleistosen*, sekitar dua juta tahun yang lalu.

Berdasarkan temuan jejak evolusi kuda, orang semakin yakin bahwa makhluk hidup sekarang merupakan mata rantai dari makhluk hidup masa lalu, dan merupakan hasil seleksi alam dari generasi demi generasi. Darwin bahkan mengemukakan adanya mata rantai dari organisme bersel satu ke ikan, kemudian ke amfibi, reptil, aves, mamalia bahkan menuju primata. Hal ini berlaku tidak hanya pada hewan, tetapi juga pada tumbuhan. Fosil alga pertama menunjukkan bahwa kehidupan telah berlangsung sejak dua miliar tahun yang lalu.

C. Tanggapan terhadap Teori Evolusi Pasca-Darwin

Seluruh dunia mengakui bahwa teori evolusi dari Charles Darwin merupakan teori yang paling fenomenal, mampu menembus sikap penerimaan para ahli Biologi dan menantang seluruh ilmuwan untuk turut memikirkan evolusi. Ilmuwan berbagai disiplin ilmu turut terjun menggali kebenaran teori evolusi Darwin. Banyak yang mendukung, tetapi juga tak kurang yang menentang. Mari kita simak pendapat mereka.

1. Asal Usul Kehidupan di Bumi

Bumi merupakan salah satu dari sembilan planet yang mengelilingi matahari pada sistem tata surya kita. Menurut teori kabut dari *Kant* dan *Laplace*, bumi terbentuk dari kabut yang lama-kelamaan menjadi masif, tetapi suhunya tetap tinggi hingga ribuan derajat Celcius. Dalam kurun waktu sekitar 6 miliar tahun yang lalu suhu bumi menurun. Hal ini dipercepat dengan terjadinya hujan yang terus-menerus membasahi bumi. Sekitar tiga miliar tahun yang lalu diperkirakan organisme hidup yang pertama muncul. Saat ini, tiga miliar tahun kemudian bumi dihuni oleh sekitar dua juta spesies makhluk hidup. Timbul pertanyaan pada diri kita, bagaimana bisa terjadi organisme hidup dari sebuah tempat yang hanya terdiri atas material mati bernama bumi ini? Banyak pendapat dan banyak teori dengan dasar dan alasannya masing-masing mengemukakan asal-usul terjadinya kehidupan ini.

2. Evolusi Kimia

Evolusi kimia menjelaskan bahwa kehidupan berawal dari serangkaian reaksi kimia zat-zat anorganik menjadi zat-zat organik. Zat kimia yang sangat kecil (mikromolekul) berubah menjadi zat kimia baru yang ukurannya lebih besar (makromolekul) dan menunjukkan awal terbentuknya bahan kehidupan.

Pada waktu bumi terbentuk sekitar 10 miliar tahun yang lalu, suhunya sangat panas. Dengan berjalannya waktu selama 6 miliar tahun, suhu bumi menurun terus, diikuti dengan terjadinya hujan terus-menerus. Setiap lekukan dan dataran rendah bumi digenangi air. Banyak orang merasa yakin bahwa sebelum ada organisme hidup, bumi telah menyediakan air lebih dahulu. Seperti telah diketahui bahwa air merupakan pelarut yang paling baik dan air merupakan medium yang paling baik bagi terjadinya reaksi-reaksi kimiawi.

Ketika bumi telah mencapai suhu yang ideal bagi terbentuknya kehidupan, yaitu jauh lebih dingin daripada suhu awal, para ahli memperkirakan di atmosfer terbentuk zat-zat anorganik, yaitu amoniak (NH_3), metana (CH_4), hidrogen (H_2), dan uap air (H_2O). Uap air inilah yang turun sebagai air hujan yang turun terus-menerus mendinginkan bumi dan membuat genangan luas yang disebut dengan samudra. Selanjutnya dengan adanya air, berarti di bumi telah ada sumber hidrogen dan oksigen.

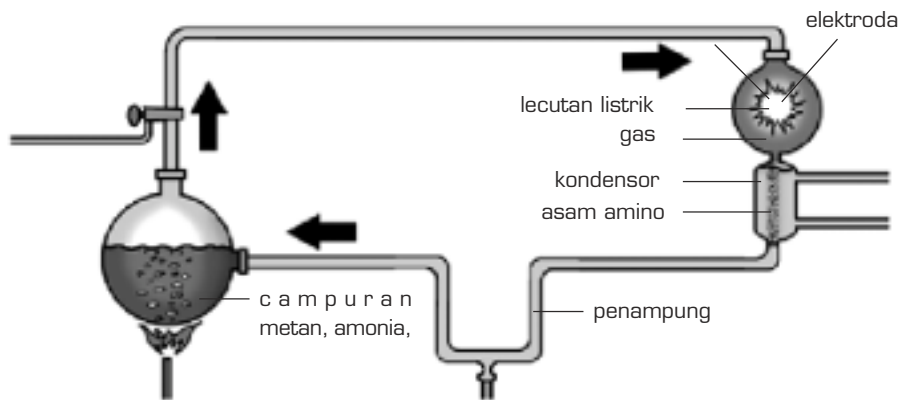
Atmosfer purba yang dipenuhi dengan sinar kosmik, halilintar, dan sinar ultraviolet dari matahari berubah menjadi tempat yang baik untuk bereaksinya senyawa-senyawa anorganik yang telah disebutkan di atas. Misalnya, reaksi antara metana dan uap air menghasilkan glukosa, asam lemak, dan gliserol. Selanjutnya reaksi antara amoniak, metana, dan uap air menghasilkan zat yang disebut *asam amino*. Reaksi lain yang menghasilkan basa organik yang mengandung nitrogen, yaitu basa purin dan pirimidin. Pada Bab 2 telah dijelaskan bahwa basa purin dan pirimidin merupakan komponen penyusun DNA dan RNA.

Zat-zat yang dihasilkan dari reaksi zat anorganik tersebut di atas merupakan senyawa organik. Senyawa organik ini turun bersama hujan dan masuk ke setiap genangan air di bumi. Dengan demikian, setiap perairan hingga samudra menjadi kaya dengan senyawa-senyawa organik sederhana ini. Alexander Ivanovich Oparin (1894) menyebut samudra yang kaya akan nutrisi ini dengan nama *Primordial Soup* atau *Sub-Primitif*.

Di samudra, senyawa-senyawa organik yang masih berbentuk mikromolekul ini melakukan reaksi-reaksi kimia membentuk senyawa makromolekul berupa polimer senyawa organik asal. Polimer yang terbentuk, di antaranya sebagai berikut.

- a. Polisakarida merupakan polimer dari glukosa.
- b. Lemak, merupakan gabungan senyawa gliserol dan asam lemak.
- c. Protein, senyawa yang merupakan gabungan antara asam-asam amino. Protein dapat menjadi sumber enzim dan bahan pembentuk sel.
- d. Asam nukleat merupakan bahan utama yang menyusun sebuah sel hidup. Asam inti ini dapat berubah susunan kimianya akibat pengaruh lingkungan. Perubahan ini merupakan dasar terjadinya evolusi.

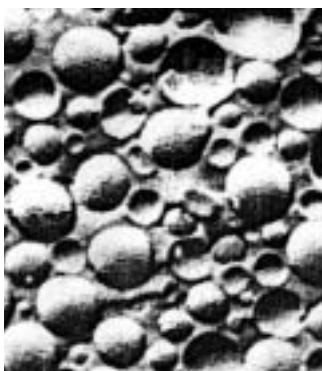
Para peneliti yang lebih belakangan muncul, ingin membuktikan teori Oparin tentang kehidupan yang dimulai dari samudra tersebut. Seorang ahli Biokimia yang bernama *Harold Urey* mengemukakan teorinya tentang atmosfer purba, yang berisi zat-zat anorganik amoniak, hidrogen, uap air, dan metana. Menurut Urey, dengan bantuan energi dari petir, sinar kosmik, dan sinar matahari, zat-zat tersebut bereaksi menjadi zat-zat organik, di antaranya asam amino, asam organik, dan asam lemak.



Sumber: *Biological Science*, Green

Gambar 4.17 Percobaan Miller

Seorang ahli biokimia bernama Stanley Miller pada tahun 1953 mempertahankan tesis untuk gelar Ph.D-nya dengan merangkai alat untuk membuktikan teori Harold Urey tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.17. Dengan bahan yang dikemukakan Urey, Miller menunjukkan secara empiris adanya zat-zat organik pada percobaan tersebut, antara lain glukosa, asam-asam organik, basa organik, dan asam-asam amino. Semua zat itu merupakan komponen biokimia penting dalam tubuh organisme.



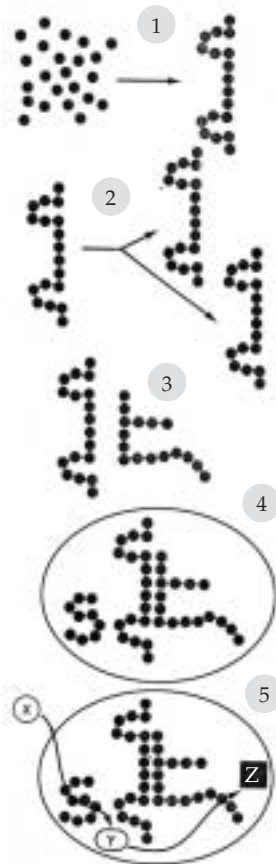
Sumber: *Biology*, Barrett.

Gambar 4.18 Selaput tipis mirip membran plasma yang mengandung asam amino dan phospholipid (ukuran diperbesar 10.000 X)

Pada Gambar 4.18 dapat dilihat struktur molekul mirip membran plasma hasil percobaan di laboratorium. Senyawa mirip membran plasma dapat dibentuk secara spontan di laboratorium, di bawah kondisi suhu khusus, kelembapan, dan keasaman. Senyawa tersebut berasal dari larutan phospholipid dingin. Para ahli menduga bahwa membran sel purba terbentuk dengan sendirinya di bawah kondisi yang serupa.

3. Evolusi Biologi

Pembentukan makromolekul akan lebih cepat jika dibantu dengan energi yang berasal dari sinar matahari secara intensif. Tempat yang baik bagi pembentukan makromolekul, yaitu pantai-pantai, laguna atau teluk, yang konsentrasi airnya tidak begitu banyak dan tempat tersebut relatif kering. Dengan demikian, energi matahari menjadi lebih tinggi. Di tempat-tempat inilah makromolekul terkonsentrasi dan memiliki peluang untuk terus bereaksi.



Sumber: *Biological Science*, Barrett.

1. Pembentukan polimer.
2. Replikasi spontan mengalami perkembangan.
3. Interaksi antarmolekul.
4. Setiap bagian menyusun diri membentuk "sel".
5. Terjadi koordinasi antarbagian "sel" koordinasi cikal bakal antarorganik sel.

Senyawa organik yang telah terbentuk, yaitu asam nukleat, lemak, karbohidrat, asam amino, energi kimia (adenosin trifosfat dan adenosin difosfat) dan mineral-mineral yang memungkinkan terbentuknya sel sederhana atau sel primitif yang kemudian menjadi nenek moyang universal atau progenot.

Pembentukan sel diduga diawali dengan terbentuknya lembaran tipis yang sifatnya sama dengan membran sel. Lembaran tipis ini membentuk ruang, yang di dalamnya terdapat asam-asam nukleat (DNA dan RNA) dan sejumlah protein. Ruang berisi asam nukleat ini dapat bereplikasi diri dan merupakan sistem pembentuk energi. Ciri-ciri ini sama dengan ciri sel prokariotik, yaitu sel yang tidak memiliki selaput inti. Terbentuknya sel semacam prokariotik ini diduga sebagai awal terjadinya kehidupan di muka bumi. Asam nukleat yang berada di dalam sel primitif ini memiliki kemampuan melakukan pembiakan dengan hasil turunan yang sifatnya sama.

Hal ini didukung dengan teori pembentukan sel purba pada Gambar 4.19.

Gambar 4.19 Teori tahap pembentukan sel purba

Tidak ada seorang pun yang tahu pasti bagaimana sebuah sel terbentuk. Namun, para ahli biologi membuat dugaan bahwa tampaknya telah terbentuk polimer sejenis polipeptida dan polinukleotida berasal dari monomer-monomer. Kemudian polinukleotida yang diduga sebuah RNA purba mulai melakukan replikasi. Berikutnya terjadi berbagai interaksi dan reaksi sehingga terbentuk cikal bakal sel sampai sekarang.

Jika teori asal-usul kehidupan ini benar, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa kehidupan berawal dari samudra atau dari perairan. Kenyataan pada masa kini membuktikan perkiraan tersebut. Kelompok Arkeobakteria dan Eubakteria sebagai prokariotik hampir seluruhnya hidup di tempat basah. Banyak jenis bakteri yang hidup di tempat yang temperaturnya ekstrem, misalnya bakteri yang hidup di mata air belerang panas. Bukankah ini suatu indikasi bahwa ketika bumi masih panas pun kehidupan telah terbentuk?

Arkeobakteria dan Eubakteria merupakan organisme yang dapat ditemukan di mana-mana, bahkan di tempat yang makhluk lain tidak mampu hidup. Sianobakteri (ganggang biru) dikenal sebagai organisme perintis dan organisme fotosintetik pertama. Terbentuknya Sianobakteri merupakan penyebab terbentuknya oksigen bebas (O_2) di atmosfer bumi. Adanya O_2 memungkinkan adanya reaksi oksidasi berbagai zat kimia yang telah terbentuk sebelumnya. Hal ini dapat menjadi petunjuk bagi kita bahwa sel yang pertama, terbentuk dan mampu beradaptasi saat bumi masih merupakan tempat yang terlalu ganas untuk suatu kehidupan. Ciri-cirinya dapat kita lihat pada sel prokariotik ini. Struktur selnya sangat sederhana, belum memiliki organel-organel secara lengkap. Akan tetapi, asam nukleat yang telah dimiliki merupakan bagian yang menyebabkan sel-sel primitif ini dapat memperbanyak diri.

Organisme-organisme yang terbentuk di perairan mengambil nutrisi di sekitarnya mengingat perairan yang ada pada saat itu adalah subprimitif. Karena kecepatan tumbuh organisme lebih cepat daripada pembentukan nutrisi di samudra, maka persediaan nutrisi tidak mencukupi. Muncul kompetisi di antara organisme yang ada, yang kuat tetap bertahan hidup.

Sejak munculnya asam nukleat yang merupakan bahan yang dapat melakukan replikasi dan juga merupakan bahan pembawa sifat organisme, sejak itu muncul peluang terjadinya mutasi. Mutasi yang terus terjadi ditambah kompetisi makanan, menimbulkan fenomena alam berupa evolusi makhluk hidup dan keanekaragaman hayati.

4. Teori Perancangan Cerdas

Ilmu pengetahuan sifatnya nisbi. Sejak Aristoteles sering meluncurkan berbagai teori tentang makhluk hidup dan gejala-gejala kehidupan, orang berlomba menggali terus-menerus pengetahuan, ada yang tujuannya

menentang, ada yang mendukung, mencari yang sifatnya mutakhir dan lebih maju. Kemajuan ilmu cenderung bertujuan menyempurnakan ilmu yang telah lahir sebelumnya meskipun belum tentu tujuan itu tercapai. Menanggapi teori evolusi terdahulu, muncul pandangan baru. *Michael J. Beche* dan kawan-kawan mengembangkan pandangan “Perancangan Cerdas” atau Intelligent Design tentang evolusi. Setiap jenis makhluk hidup diciptakan oleh Tuhan Yang Maha Kuasa secara terencana, dirancang sehingga kehidupan ini berjalan teratur dan seimbang. Semua jenis organisme diciptakan oleh Tuhan dengan sempurna, tidak setengah-setengah. Sejalan dengan Michael J. Beche dan kawan-kawan, Harun Yahya juga mengemukakan pendapat bahwa semua penciptaan sepenuhnya atas campur tangan Allah, Tuhan Yang Maha Agung; tidak ada makhluk yang terbentuk secara kebetulan. Memang benar, semua ciptaan Tuhan diciptakan dengan segala kelebihanannya untuk kemaslahatan makhluk hidup lain dan seluruh alam semesta. Apabila kita melihat kekurangan pada makhluk lain, itu karena penilaian kita sebagai manusia. Terlepas dari itu semua, wajib bagi kita untuk menyakini kebesaran Tuhan Yang Maha Perkasa. Bagi-Nya semua penciptaan itu amat mudah, termasuk peristiwa evolusi.

Tugas 4.2

Dari uraian tentang pendapat para ahli yang berkaitan dengan teori evolusi di atas, cobalah kalian melakukan suatu analisis dari pendapat-pendapat tersebut ditinjau dari segi ilmiah. Diskusikan dengan kelompok lain di kelasmu.

Rangkuman

1. Evolusi merupakan peristiwa perkembangan makhluk hidup yang telah berlangsung sejak makhluk hidup itu muncul di muka bumi. Tidak ada yang menyaksikan proses evolusi. Oleh karena itu kebenaran dan akurasi proses evolusi tidak bisa diakui secara mutlak.
2. Banyak peneliti membuat teori-teori atau pandangan-pandangan tentang evolusi. Di antaranya, Jean Baptiste de Lamarck, Alfred Wallace, August Weissman, dan Charles Darwin. Reaksi masyarakat terhadap teori mereka beragam, ada yang pro dan kontra. Di antaranya penentang teori evolusi Darwin, yaitu Harun Yahya.

3. Lamarck menitikberatkan pendapatnya pada adaptasi organ-organ tubuh, kemudian terjadi *modifikasi organ* tersebut dan hasil modifikasi tersebut diwariskan.
4. Darwin berpendapat bahwa evolusi berlangsung melalui *seleksi alam*. Makhluk hidup menyediakan berbagai sifat, alam akan menyeleksi sifat yang paling cocok dan paling baik.
5. Evolusi terjadi karena banyak fenomena alam yang menunjukkan hal itu. Misalnya, banyak kemiripan sifat di antara makhluk hidup, baik yang ada pada masa kini maupun dengan makhluk hidup pada masa lalu.
6. Banyak kenyataan di alam ini yang dijadikan bukti evolusi oleh para ahli. Di antaranya fosil, homologi alat tubuh dan perbandingan embrio.
7. Diyakini bahwa evolusi berlangsung karena adanya perubahan-perubahan DNA dan kromosom melalui proses *mutasi*.
8. Mutasi akan membentuk bermacam-macam alel. Dalam suatu populasi yang tidak mengalami gangguan apapun, frekuensi alel (gen) cenderung tetap, seperti yang dikemukakan oleh Goldrey Hardy dan Wilhelm Weinberg. Gangguan pada populasi yang dimaksud, yaitu 1) mutasi, 2) migrasi, 3) tidak ada perkawinan secara acak, 4) daya adaptasi dan fertilitas anggota populasi berbeda-beda. Karena adanya gangguan inilah frekuensi gen dalam populasi cenderung berubah.
9. Penelitian, teori, fenomena, dan bukti-bukti yang berkaitan dengan evolusi mendorong masyarakat dan ilmuwan lain turut melakukan penelitian. Maka ditemukanlah adanya rekaman evolusi berupa perkembangan struktur tubuh kuda. Ilmuwan lain (Harold Urey, Alexander Oparin dan Stanley Miller) mengemukakan berbagai teori yang bersifat menguatkan teori-teori evolusi sebelumnya.

Kata Kunci

evolusi
evolusi biologi
evolusi kimia
fosil
gen pool
homologi

isolasi geografik
mutasi
ontogeni
polimorfik
rudimentasi

Evaluasi Akhir Bab

A. Pilih jawaban yang paling tepat.

- Hal-hal di bawah ini merupakan bukti adanya keterkaitan antara makhluk hidup dahulu dan makhluk hidup sekarang, *kecuali* . . .
 - makhluk hidup zaman sekarang merupakan keturunan makhluk zaman dahulu
 - adanya persamaan jenis makanan yang dimakan hewan-hewan tersebut
 - adanya persamaan embriologis di antara berbagai macam hewan
 - banyak bagian tubuh makhluk hidup sekarang sama dengan makhluk hidup terdahulu
 - bentuk makhluk hidup dahulu mirip dengan bentuk-bentuk makhluk hidup sekarang
- Terbentuknya spesies baru disebabkan oleh hal-hal di bawah ini, *kecuali*
 - isolasi geografi
 - terjadi bencana alam yang dahsyat
 - terjadi serangkaian mutasi
 - terjadi reproduksi
 - terjadi perubahan fenotipe pada organisme
- Di antara hewan-hewan di bawah ini, manakah hewan yang berumur paling tua?
 - Dinosaur
 - Ular
 - Tuatara
 - Kura-kura
 - Buaya
- Tungkai depan buaya homolog dengan salah satu organ tubuh berikut ini, yaitu
 - sayap ayam
 - gading gajah
 - kaki manusia
 - antene laba-laba
 - ekor kura-kura

5. Pendapat Lamarck yang berbeda dengan pendapat Darwin mengenai evolusi adalah
 - A. setiap individu menghasilkan keturunan yang bervariasi
 - B. setiap individu melakukan adaptasi dengan lingkungannya
 - C. modifikasi yang dilakukan oleh setiap individu akan diwariskan
 - D. setiap saat di bumi ini terjadi seleksi alam
 - E. individu yang tidak sesuai dengan alamnya akan musnah

6. Berdasarkan fosil yang ditemukan, kemudian fosil tersebut direkonstruksi, kuda yang dinamakan *Eohippus* memiliki ciri-ciri
 - A. hidup di hutan yang tanahnya berlumpur
 - B. memiliki kuku tunggal untuk berlari kencang
 - C. makanannya berupa rumput-rumputan
 - D. gerahamnya besar dan beremail
 - E. rambut di leher tumbuh subur

7. Teori Hardy–Weinberg yang menyatakan tentang ketetapan perbandingan frekuensi gen akan terjadi *kecuali jika*
 - A. tidak terjadi mutasi
 - B. banyak pendatang yang masuk
 - C. semua penduduk fertil
 - D. terjadi perkawinan secara acak
 - E. viabilitas tiap penduduk sama

8. Kehidupan di bumi diperkirakan muncul sekitar
 - A. 5.000 tahun yang lalu
 - B. 5 miliar tahun yang lalu
 - C. 3.000 juta tahun yang lalu
 - D. 3 miliar tahun yang lalu
 - E. 10 miliar tahun yang lalu

9. Kehidupan diduga berawal dari samudra karena
 - A. di atmosfer ada amoniak dan uap air
 - B. di atmosfer ada metana yang menjadi nutrisi
 - C. uap air di atmosfer turun membawa nutrisi
 - D. di udara ada sumber energi dari kilatan petir
 - E. ada radiasi sinar matahari terhadap samudra

10. Setelah memahami apa yang terjadi selama proses pembentukan makhluk hidup di muka bumi, kita mungkin akan mengakui teori abiogenesis melalui asumsi bahwa
- A. awal terbentuknya organisme berasal dari terbentuknya asam nukleat
 - B. organisme uniseluler pertama terbentuk melalui sistem membran sel
 - C. seluruh bagian organisme tersusun dari asam amino, asam lemak, gliserol dan glukosa
 - D. asam nukleat terbentuk dari protein, fosfat, gula, dan basa nitrogen
 - E. asam amino, lemak, glukosa, dan berbagai zat penyusun tubuh terbentuk dari reaksi metana, amoniak, hidrogen, dan uap air
11. Apabila dugaan tentang “kehidupan berawal dari samudra, bergeser ke daratan” benar, urutan munculnya kelompok makhluk hidup yaitu
- A. Protozoa - Mollusca - Helminthes - Arthropoda
 - B. Protozoa - Echinodermata - Mollusca - Arthropoda
 - C. Protozoa - Porifera - Arthropoda - Mollusca
 - D. Protozoa - Helminthes - Mollusca - Arthropoda
 - E. Protozoa - Mollusca - Echinodermata - Helminthes
12. Munculnya variasi makhluk hidup lebih mungkin disebabkan oleh
- A. munculnya organisme pertama di berbagai tempat
 - B. kemampuan asam nukleat menduplikasi diri
 - C. kemampuan sel bereproduksi
 - D. munculnya keturunan dengan susunan DNA yang berbeda
 - E. adanya perubahan alam terus menerus
13. Gejala alam yang mengarah pada bentuk dan struktur tubuh dari populasi suatu organisme sehingga mengalami evolusi disebut mutasi. Hal ini sesuai dengan yang dikatakan oleh
- A. Charles Darwin
 - B. Lamarck
 - C. Hugo de Vries
 - D. Sir Godfrey Hardy
 - E. Wilhem Weinberg

14. Para penganut “Intelelegent Design” menentang teori Darwin tentang teori evolusi, bahwa
- A. semua makhluk yang tercipta merupakan hasil perencanaan Allah, Tuhan yang Maha Agung
 - B. Semua makhluk terbentuk secara kebetulan
 - C. Makhluk yang ada masa kini merupakan keturunan dari makhluk hidup di masa lampau
 - D. perubahan morfologi akibat dari adaptasi terhadap perbedaan habitat
 - E. makhluk yang tidak dapat beradaptasi akan muncul
15. Hal-hal di bawah ini benar mengenai mutasi, *kecuali*
- A. mutasi dapat terjadi melalui radiasi unsur-unsur kimia
 - B. setiap mutasi menguntungkan organisme yang mengalaminya
 - C. mutasi dapat merusak harmoni adaptasi makhluk hidup terhadap lingkungannya
 - D. mutasi dapat menambah variasi dalam suatu populasi
 - E. umumnya mutasi merugikan organisme yang mengalaminya

B. Jawab pertanyaan berikut ini dengan benar.

1. Ceritakan secara ringkas hal-hal apa atau makhluk hidup apa yang ditemukan Darwin dalam ekspedisinya sehingga Darwin menggunakan teori evolusinya dengan sangat kuat?
2. Jelaskan apa yang dimaksud dengan spesies?
3. Jelaskan perbedaan teori evolusi Darwin dan pendapat Michael J. Beche tentang intelegent Design.
4. Para ahli menyatakan bahwa diduga organisme yang muncul pertama adalah bakteri. Jelaskan alasannya!
5. Jelaskan keuntungan munculnya organisme fotosintesis!

Bab V

Bioteknologi



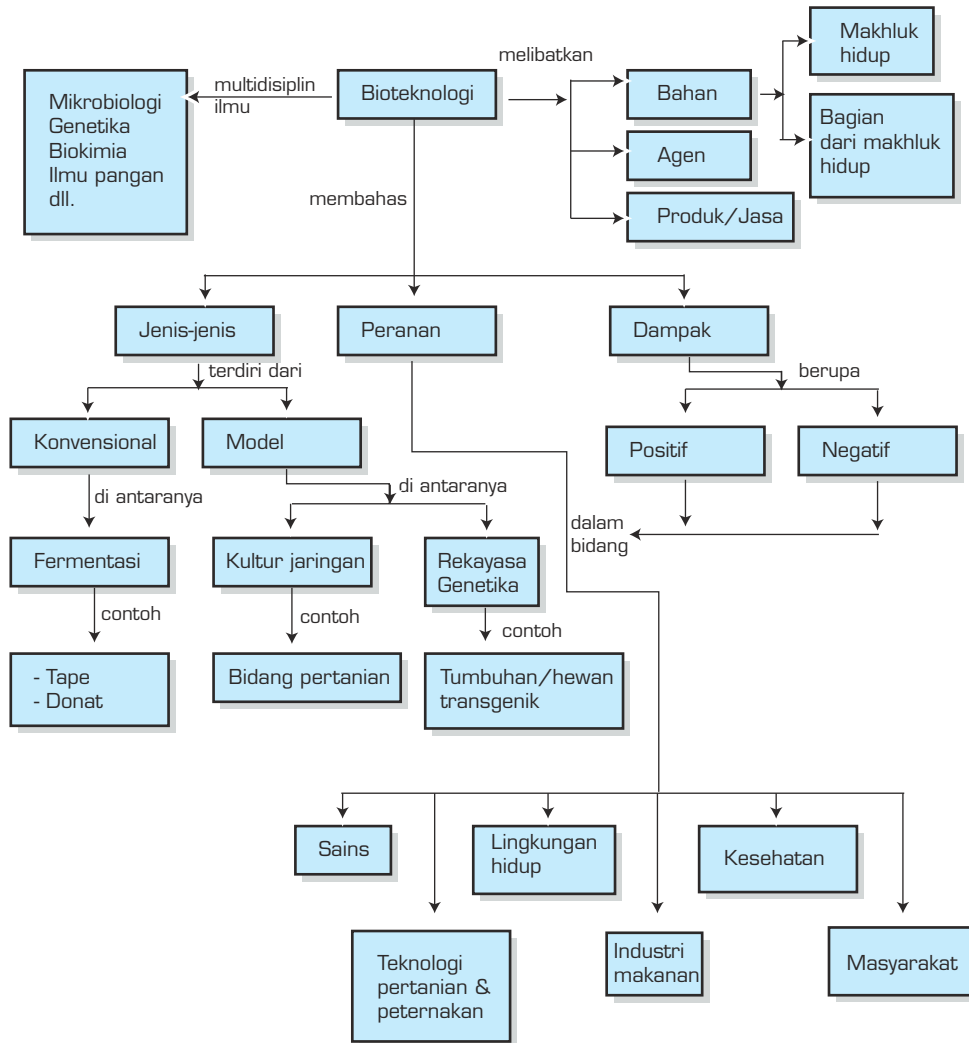
Sumber: *Biology for Life*

TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, siswa dapat:

1. menjelaskan pengertian dan ruang lingkup bioteknologi;
2. menjelaskan prinsip-prinsip dasar bioteknologi;
3. membedakan bioteknologi konvensional dan modern;
4. menyebutkan contoh bioteknologi;
5. menjelaskan proses rekayasa genetik;
6. menyebutkan sumber-sumber bioteknologi dan produk yang dihasilkan;
7. menjelaskan keuntungan dan kerugian diperoleh produk bioteknologi;
8. menjelaskan dampak pemanfaatan hasil produk bioteknologi di berbagai bidang;
9. menyebutkan hasil produk bioteknologi konvensional.

PETA KONSEP



Makanan apa yang harganya murah, tetapi bergizi tinggi? Tempe, itulah makanan tersebut. Mungkin kamu tidak menyangka bahwa tempe yang sering dimakan merupakan salah satu produk bioteknologi. Akan tetapi, bioteknologi yang digunakan masih bioteknologi sederhana atau konvensional.

Bioteknologi terus berkembang seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi. Istilah bioteknologi modern pun muncul sebagai respons dari cepatnya perkembangan bioteknologi. Lahirnya domba Dolly dengan teknik kloning dan munculnya tanaman transgenik merupakan contoh keberhasilan manusia dalam mengembangkan bioteknologi. Apakah sebenarnya bioteknologi itu? Seberapa jauh batasan bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern? Apakah dampak bioteknologi pada masyarakat? Pertanyaan-pertanyaan itu akan kamu temukan jawabannya pada bab ini.

Tempe dan tape adalah sekadar contoh suatu produk dari proses yang dikenal dengan istilah bioteknologi. Dari namanya kita bisa mengerti bahwa proses bioteknologi biasanya dibantu oleh makhluk hidup (dalam hal ini adalah mikroorganisme).

A. Arti dan Prinsip Dasar Bioteknologi

Penerapan bioteknologi sebenarnya telah dilakukan sejak zaman prasejarah, antara lain untuk menghasilkan minuman beralkohol dan mengawetkan daging. Dari minuman beralkohol, anggur mungkin merupakan produk bioteknologi tertua, kemudian disusul bir selanjutnya roti. Bagaimana prinsip dasar bioteknologi ini?

1. Konsep-Konsep yang Mendasari Bioteknologi

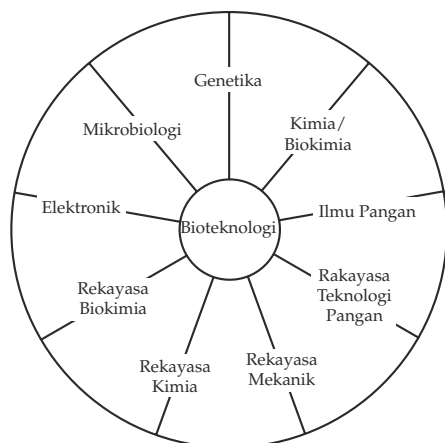
Bioteknologi boleh didefinisikan sebagai proses-proses biologi oleh organisme yang dimanfaatkan oleh dan untuk kepentingan manusia. Sebenarnya pengertian bioteknologi sangat luas. Tiap-tiap negara mempunyai definisi masing-masing. Definisi yang seragam sebenarnya penting agar terdapat pandangan yang sama dalam mendiskusikan masalah bioteknologi baik dalam lingkup nasional maupun internasional. Batasan umum yang diusulkan bagi negara anggota organisasi untuk kerja sama dan pengembangan ekonomi (OECD = Organization for Economic Cooperation and Development) adalah bahwa: *“Bioteknologi merupakan penerapan prinsip ilmiah dan rekayasa pengolahan bahan oleh agen biologi, untuk menyediakan barang dan jasa”*.

Definisi ini (Bull dkk, 1982) dengan asas ilmiah dan rekayasa yang dikaitkan dengan disiplin ilmu yang luas, tetapi ditekankan pada mikrobiologi, biokimia, genetika, rekayasa biokimia, dan kimia. Meskipun demikian, ahli bioteknologi tidak harus mampu menguasai sepenuhnya semua disiplin ilmu pendukung bioteknologi, tetapi dia dapat memulai dengan satu disiplin ilmu yang kemudian dimantapkan melalui pelatihan dan pendidikan khusus untuk memperoleh keterampilan praktis dan kemampuan kerja sama secara terpadu.

Agen biologi yang dimaksud dalam definisi di atas adalah katalisator-katalisator biologi dengan kisaran yang luas, tetapi terutama ditekankan pada mikroorganisme berenzim, sel hewan, dan sel tumbuhan. Mikroorganisme yang dimaksud biasanya bakteri, jamur, kapang, dan ragi. Bahan dalam definisi ini meliputi semua bahan baik yang organik maupun anorganik. Pengertian barang dan jasa meliputi produk industri yang berupa pangan, minuman, obat, senyawa biokimia, dan peniadaan pengaruh logam dalam mengolah limbah industri maupun rumah tangga.

2. Sifat Multidisipliner Bioteknologi

Bioteknologi merupakan ilmu yang benar-benar multidisiplin, melibatkan keahlian, pengetahuan dasar, dan kerja sama antara berbagai cabang ilmu. Cabang-cabang ilmu tersebut, antara lain biologi umum, kimia, mikrobiologi, biofisika, genetika, biologi sel, biokimia, elektronika, komputer, ekonomi, dan akuntansi.



Gambar 5.1 Sifat interdisiplin bioteknologi (menurut Higgins, dkk.)

Sifat multidisiplin bioteknologi yang luar biasa, dapat kamu lihat pada Gambar 5.1 (walaupun tidak semua produk selalu melibatkan semua disiplin ilmu yang dimaksud). Bisakah kamu mendeskripsikan konsep-konsep yang mendasari cabang-cabang ilmu bioteknologi tersebut?

Dalam perkembangannya kita mengenal produk bioteknologi yang dihasilkan secara konvensional dan secara modern. Apakah perbedaan bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern? Ikutilah uraian selanjutnya.

B. Bioteknologi Konvensional dan Modern

Para ahli antropologi sependapat bahwa bioteknologi telah dilakukan sejak zaman prasejarah. Bioteknologi yang masih bersifat konvensional ini dilakukan dengan cara yang sederhana, dengan alat-alat yang sederhana pula. Kira-kira 6000 tahun sebelum Masehi, penduduk Babylonia telah mengetahui bahwa Khamir (ragi) mampu menghasilkan bir. Kemudian sekitar 4000 tahun sebelum Masehi, penduduk Mesir telah membuat adonan roti yang mengembang menggunakan khamir.

Pada abad ke-14 penyulingan alkohol sebagai hasil proses fermentasi biji-bijian telah dipraktikkan di Cina dan Timur Tengah. Masih banyak lagi praktik-praktik fermentasi yang sudah dilakukan manusia jauh sebelum mikroskop ditemukan (abad ke-17), antara lain pembuatan susu asam (yoghurt), cuka, kefir, keju, dan kecap.

Selain praktik-praktik bioteknologi konvensional di atas, penyilangan konvensional pun sudah dilakukan oleh para petani dengan tujuan menghasilkan tanaman yang lebih besar, kuat, dan tahan penyakit. Biologi konvensional adalah praktik-praktik bioteknologi yang belum dikembangkan secara komersial dan umumnya membutuhkan waktu yang lama.

Awal bioteknologi modern mungkin sangat dekat hubungannya dengan ditemukannya teknik produksi antibiotik Penisilin pada tahun 1940-an (setelah Perang Dunia II). Penemuan tersebut kemudian diikuti dengan peningkatan penelitian mikroorganisme lain yang dapat menghasilkan antibiotik dan zat-zat lain, seperti vitamin, steroid, enzim, dan asam amino.

Kemajuan-kemajuan yang dicapai di bidang teknologi fermentasi telah memungkinkan manusia untuk mendapatkan berbagai produk yang tidak dapat atau sulit diperoleh melalui proses kimia. Teknologi fermentasi yang memanfaatkan kemampuan mikroba telah membuka lembaran baru dalam usaha manusia untuk mengubah bahan-bahan mentah yang murah bahkan tidak berharga menjadi produk-produk yang bernilai ekonomi tinggi dan berguna bagi kesejahteraan umat manusia.

Produk-produk seperti antibiotik, vitamin, dan asam amino yang sangat berguna di bidang pengobatan dan kesehatan serta berbagai senyawa organik telah memacu perkembangan industri farmasi dan industri kimia. Penelitian di bidang fermentasi makanan telah mengungkapkan bahwa melalui proses fermentasi, bahan makanan akan mengalami perubahan-perubahan fisik dan kimia yang menguntungkan, seperti aroma, flavor, tekstur, daya cerna, dan daya tahan simpan.

Perkembangan yang pesat di bidang biologi molekuler dan biologi seluler dalam beberapa dasawarsa terakhir sepenuhnya menjadi dasar ilmiah utama untuk perkembangan bioteknologi mutakhir. Teknologi enzim dan rekayasa genetika mengantarkan bioteknologi ke suatu bioteknologi dimensi baru yang berkembang dengan sangat pesat menuju bioteknologi modern.

Perbedaan utama antara cara pemuliaan tradisional dan bioteknologi modern bukan terletak pada tujuan akhir, tetapi terletak pada kecepatan, ketepatan, keterandalan, dan cakupannya.

KEGIATAN

Fermentasi

Tujuan: Melakukan kegiatan bioteknologi pada bahan pangan.

1. Carilah informasi mengenai pembuatan
 - a. Tempe
 - b. Tape
 - c. Yoghurt
 - d. Oncom
 - e. Nata de coco
2. Kerjakan salah satu proses pembuatan makanan tersebut sesuai dengan informasi yang kalian peroleh.
3. Buat laporan, dan sertakan pula hasil percobaannya sehingga jika berhasil bisa kalian pasarkan.

C. Jenis-Jenis Bioteknologi

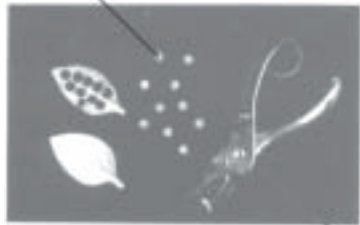
Perkembangan bioteknologi modern telah ditempuh dengan banyak cara, tetapi kita akan mengenal beberapa saja, yaitu kultur jaringan dan rekayasa genetika.

1. Kultur Jaringan

Kultur jaringan merupakan sebuah teknologi reproduksi vegetatif yang sangat populer dan sudah meluas penggunaannya. Pada teknik ini sebagian kecil dari jaringan tumbuhan dikultur dalam suatu medium yang mengandung zat-zat kimia sebagai bahan makanan untuk pertumbuhan. Zat-zat kimia tersebut, misalnya sukrosa, mineral, hormon, vitamin, dan santan kelapa. Jaringan tersebut akan tumbuh menjadi kalus (gumpalan jaringan yang belum berbentuk). Kalus tersebut membelah (tumbuh) dan terbentuklah tunas, akhirnya menjadi satu tanaman yang utuh (lengkap). Hal ini dapat dimengerti karena setiap sel mempunyai sifat *totipoten*, artinya setiap sel mempunyai informasi/kemampuan untuk membantu seluruh bagian tubuh. Tanaman yang sudah lengkap tersebut (mempunyai akar, batang, dan daun), setelah cukup kuat dapat dipindahkan ke tanah biasa. Semua jaringan bisa dikultur, tetapi biasanya diambil dari jaringan yang masih aktif, seperti ujung batang, daun, dan ujung akar. Satu lembar daun, misalnya dapat dipotong-potong menjadi puluhan potong. Setiap potongan daun tersebut dikultur (lihat kembali pelajaran SMP kelas IX). Dengan cara ini, satu jenis tanaman dapat dengan cepat diperbanyak.

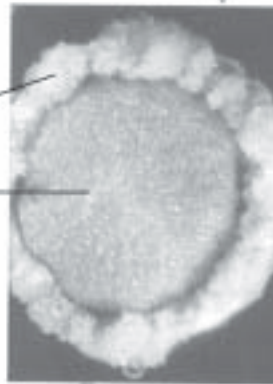
Unilever, misalnya, sebuah perusahaan gabungan antara Inggris-Belanda telah berhasil memproduksi bibit kelapa sawit hasil kultur jaringan. Perusahaan tersebut menghasilkan lebih dari satu juta anakan kelapa sawit setiap tahunnya untuk ditanam di perkebunan-perkebunannya di berbagai negara berkembang. Dengan kultur diperkirakan waktu di antara penanaman dan pemanenan dapat meningkat 30 kali lebih cepat dengan hasil berlipat-lipat. Untuk lebih jelasnya mengenai kultur jaringan ini dapat kamu lihat pada Gambar 5.2.

- Langkah awal adalah membuat potongan-potongan jaringan dari suatu organ tanaman (misalnya daun)

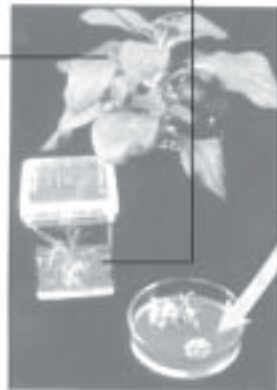


- Potongan-potongan jaringan tersebut kemudian dikultur (dibiakkan) dalam medium yang mengandung nutrisi (makanan) dan hormon.

- Di dalam kultur sel-sel tumbuh dari potongan jaringan tersebut menjadi gumpalan yang disebut *kalus*.



- Kalus kemudian tumbuh menjadi tanaman yang kecil yang kelak akan tumbuh menjadi tanaman yang lengkap seperti induknya.



- Selanjutnya kalus dipindahkan ke dalam medium yang padat.

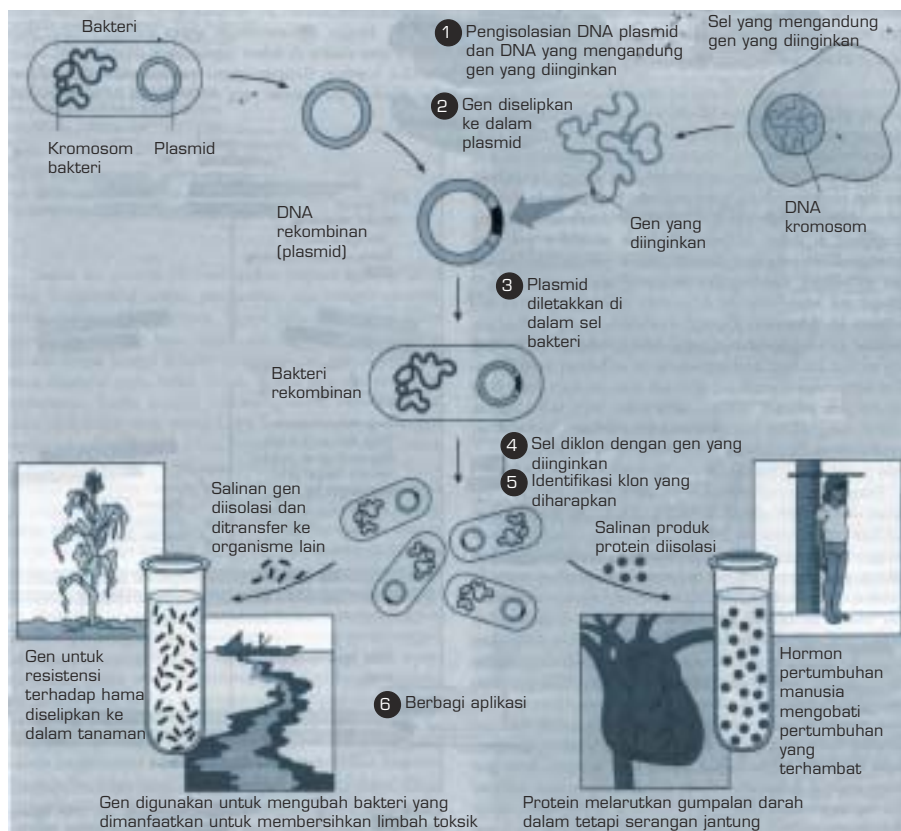
Sumber: *The Nature of Life*, Postlethwait

Gambar 5.2 Kultur jaringan

2. Rekayasa Genetika

Kamu tentu pernah mendengar “domba Dolly” bukan? Itulah nama seekor domba yang dihasilkan dari sebuah proses rekayasa genetika. Rekayasa genetika adalah upaya para ahli biologi dalam mengutak-atik atau memanipulasi gen secara langsung untuk tujuan praktis. Penggunaan teknik rekayasa genetik telah meliputi ratusan produk yang bermanfaat. Teknologi ini juga telah mengungkap pemahaman mendalam mengenai genom manusia sehingga masalah-masalah penting (khususnya penyakit) dapat diatasi.

Bagaimana prosedur atau langkah-langkah rekayasa genetika ini? Contoh yang paling klasik adalah pembuatan hormon insulin manusia. Mula-mula sel pankreas manusia diambil. Sel tersebut kemudian dianalisis sampai ditemukan gen (DNA) yang menentukan pembentukan insulin. DNA tersebut kemudian dipotong, dan disambungkan dengan kromosom kecil dari bakteri (lingkaran kecil DNA bakteri ini disebut plasmid). Plasmid tersebut kemudian dimasukkan lagi ke dalam sel bakteri dan bakteri itu dikultur. Bakteri yang dikultur akan segera memproduksi insulin. Insulin dapat dipisahkan dengan teknik biokimia dan siap digunakan untuk menyuntik penderita diabetes (kencing manis). Untuk lebih jelasnya pelajari Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Pengklonan gen

Peristiwa penyambungan potongan DNA pada DNA lain seperti yang telah diuraikan pada contoh di atas disebut pengklonan gen (*gen cloning*). Hasilnya adalah perpaduan dua molekul DNA dari dua sumber yang berbeda, dan disebut DNA rekombinan. Pengklonan gen tersebut dimungkinkan oleh penemuan enzim-enzim yang dapat memotong DNA atau menyambung DNA pada lokasi-lokasi tertentu. *Enzim restriksi* berfungsi untuk memotong, sedangkan *enzim DNA ligase* berfungsi untuk menyambung.

Pada Gambar 5.3, langkah awal adalah pengisolasian plasmid dari bakteri dan DNA berisi gen yang diinginkan, misalnya penghasil hormon. Potongan gen tersebut kemudian diselipkan ke dalam plasmid. Kemudian plasmid disuntikkan lagi ke sel bakterinya. Selanjutnya sel bakteri itu dikultur dan membentuk klon sel. Dalam contoh sebelah kiri gen yang berasal dari satu organisme lain digunakan untuk memberi organisme lain suatu kemampuan metabolik baru (tahan terhadap hama), sedangkan gambar sebelah kanan produk protein yang bermanfaat dipanen dalam jumlah besar dari kultur bakteri.

D. Produk-Produk Bioteknologi

Pernahkah kehidupan kita sehari-hari terlepas dari produk bioteknologi? Mungkin hampir tidak pernah, karena kita sering mengonsumsi tempe, tape, kecap, keju, mentega dan lain-lain. Pendek kata perkembangan bioteknologi telah memberikan manfaat di berbagai bidang dalam kehidupan manusia. Beberapa contoh manfaat bioteknologi tersebut dapat dipelajari pada Tabel 5.1 di bawah ini.

Tabel 5.1 Produk-Produk Bioteknologi

Sektor/Bidang	Produk/Manfaat
Industri kimia Farmasi dan kedokteran	Etanol, aseton, butanol, asam-asam organik antibiotik, antibodi, vaksin, interferon, vitamin, diagnosis penyakit.
Sumber energi (biokonversi) Makanan & Minuman	Gasohol, biogas, biomassa Tempe, keju, yoghurt, alkohol, sirup glukosa, nata de coco, zat aditif (esens), protein sel tunggal, mikroprotein.
Pertanian & peternakan	Pemuliaan tanaman, kultur sel, kultur jaringan, penambahan nitrogen, pembuatan pakan, kompos, pestisida, produksi embrio, produk- produk transgenik.
Pelayanan industri dan lingkungan	Penjernihan air, pengolahan limbah, penemuan minyak.

1. Bidang Industri Kimia

Pelarut organik yang biasa dihasilkan melalui proses fermentasi, antara lain etanol, aseton, butanol dan isopropanol. Etanol diperoleh dengan cara fermentasi gula oleh khamir (ragi) dalam keadaan anaerobik. Bahan baku gula yang murah biasanya digunakan *tetes* (molase) yaitu ampas tebu.

Aseton dan butanol biasanya menggunakan bahan baku pati dalam keadaan anaerobik pada suhu 30°C–32°C selama 40 – 80 jam. Mikroba yang berperan contohnya *Clostridium acetobutylinum*. Butanol banyak digunakan dalam pembuatan *Plastik* dan *minyak rem*.

Asam-asam organik penting hasil fermentasi contohnya adalah *asam asetat*, *asam laktat*, *asam sitrat*, dan *glukonat*. Asam asetat (asam cuka) berasal dari fermentasi etanol secara aerobik oleh bakteri *Acetobacter aceti*. Asam laktat merupakan bahan yang rasa dan baunya sedap dan mempunyai daya pengawet. Asam ini digunakan sebagai penyedap minuman ringan, pengharum, sari buah, selai dan sirup, juga dalam pengalengan buah dan ikan. Bahan yang difermentasi biasanya gula, dengan bantuan *Lactobacillus* Sp. Asam sitrat juga diperoleh dari fermentasi gula, dengan bantuan *Aspergillus niger* atau *Aspergillus wentii*. Asam sitrat banyak digunakan dalam pembuatan minuman, selai, manisan, dan sirup.

2. Bidang Farmasi dan Kesehatan

Tidak perlu diragukan lagi, bahwa kemajuan bioteknologi dapat meningkatkan upaya pemeliharaan kesehatan masyarakat. Penerapan industri biologi dalam bidang kesehatan mengalami kemajuan yang mengagumkan. Berbagai aspek biologi telah dijadikan dasar pembuatan rancangan-rancangan untuk memerangi penyakit seperti produksi berbagai obat, antibiotik, vaksin, hormon, enzim, dan antibodi.

a. Antibiotik

Antibiotik adalah senyawa kimia yang dihasilkan oleh mikroorganisme. Senyawa ini mampu membunuh atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain.

Antibiotik digolongkan menjadi empat kelas utama, yaitu *penisilin*, *tetrasiklin*, *sefalosporin*, dan *eritromisin*. Penisilin dapat menghentikan infeksi oleh bakteri-bakteri yang umumnya sangat berbahaya. Sefalosporin adalah senyawa lain yang dapat membunuh bakteri yang resisten (tahan) terhadap penisilin. Sefalosporin, misalnya digunakan untuk melawan *Staphylococcus* (bakteri penyebab pneumonia).

Streptomisin bekerja dengan mencegah pembentukan protein pada bakteri. Antibiotik yang dihasilkan oleh jamur *Streptomyces griseus* ini ditemukan oleh Selman Waksman (1944). Streptomisin digunakan untuk mengobati tuberculosis (TBC).

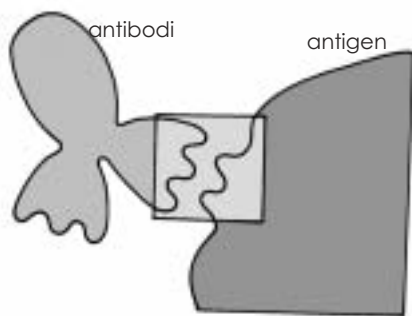
Antibiotik-antibiotik di atas dapat mengakibatkan sifat resistensi (tahan) sehingga mendorong para ahli untuk melakukan pencarian antibiotik baru. Rekayasa genetik dapat digunakan untuk menciptakan antibiotik yang termodifikasi. Sebuah teknik yang dikenal sebagai “Fusi Sel” memberi harapan besar untuk mendapatkan antibiotik dalam jumlah besar bahkan yang lebih baik

b. Antibodi

Tubuh manusia dan hewan terus-menerus menghadapi serangan virus, bakteri, jamur, dan senyawa kimia yang terdapat dalam lingkungan. Untuk mengatasi serangan tersebut, tubuh membutuhkan golongan protein yang disebut *antibodi*. Antibodi tersebut dibentuk oleh sel khusus bernama *limfosit-B* yang terdapat dalam limpa, darah, dan kelenjar limfe. Antibodi bersifat mengenali substansi asing (disebut *antigen*) dan menyerangnya atau menghancurkannya. Bagaimana jika tubuh diserang antigen secara berlebihan, sementara tubuh mempunyai kemampuan yang terbatas dalam menghasilkan antibodi?

Suatu teknik pembentukan antibodi telah dikembangkan berkat kemajuan bioteknologi. Para pakar bioteknologi telah dapat mengembangkan produksi antibodi secara besar-besaran. Sebuah antibodi yang disebut *antibodi monoklonal* telah mampu mengatasi berbagai penyakit pada manusia, mulai dari penyakit kanker dan kegagalan ginjal sampai dengan penyakit infeksi oleh virus atau bakteri. Antibodi monoklonal juga meningkatkan keberhasilan pencangkokan organ.

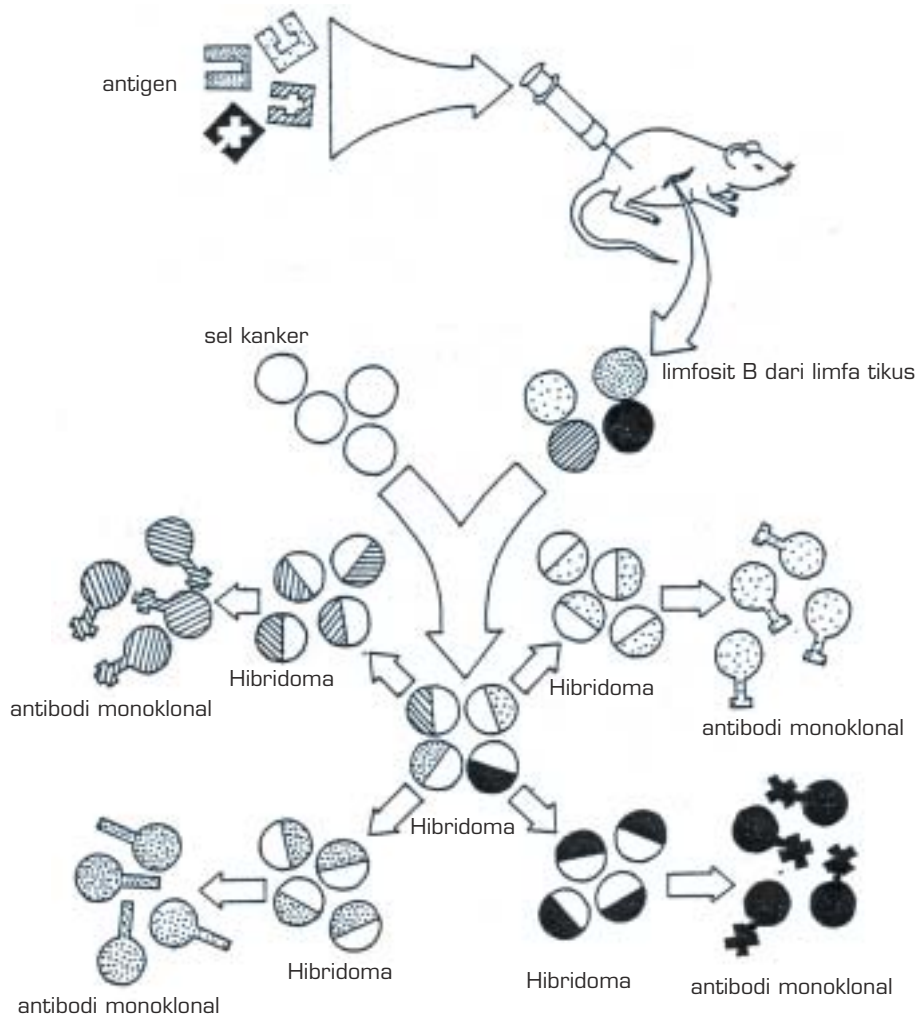
Antibodi monoklonal adalah kelompok antibodi yang identik dengan bentuk lekuk yang sama sehingga hanya mengenali antigen yang sama (perhatikan Gambar 5.4).



Sumber: *Biotechnology in School*

Gambar 5.4 Antibodi (juga dinamakan imunoglobulin merupakan protein berbentuk Y. Di ujung setiap tangan terdapat dua kantung identik, bentuknya bervariasi dari satu molekul antibodi ke molekul antibodi lainnya. Apabila antibodi berdekatan dengan antigen yang bentuknya sesuai dengan kantung, antibodi dan antigen akan saling berkaitan.

George Kohler dan Cesar Milstein, berhasil menemukan cara membuat antibodi monoklonal pada penyakit kanker, penemuan ini memberikan harapan besar dalam pengobatan kanker. Dengan menggabungkan kemampuan sel B dalam membuat antibodi dan sifat sel kanker yang dapat dikatakan terus-menerus hidup pada lingkungan luar, dapat diproduksi sejumlah antibodi monoklonal. Cara ini dilakukan dengan memfusi sel B dengan sel kanker sehingga dihasilkan sel hibrid (Teknologi hibridoma) yang memiliki sifat kedua sel tersebut, yaitu sel yang dapat membuat antibodi dan hidup dalam jangka waktu yang lama. Untuk lebih jelasnya pelajari bagan berikut ini!



Sumber: *Biotechnology in School*

Gambar 5.5 Pembuatan antibodi monoklonal

Produksi sel hibridoma yang membuat antibodi monoklonal mengenali dan melekat pada molekul antigen. Tikus diinjeksi dengan campuran bahan yang mengandung sejumlah kecil antigen. Beberapa hari setelah injeksi itu limpa tikus dipindahkan dan sel-sel B-nya, beberapa di antaranya akan membuat antibodi mengenali antigen, dibiarkan berfusi dengan sel myeloma kanker untuk menghasilkan hibridoma. Klon hibridoma dipisahkan satu dengan lainnya dan diuji untuk melihat mana yang menghasilkan antibodi monoklonal.

c. Vaksin

Pada tahun 1067 lebih dari sepuluh juta penduduk dunia terserang penyakit cacar, dan penyakit ini bersifat endemik bagi lebih dari 30 negara. Sekarang penyakit ini telah dapat diatasi sejak program vaksinasi masal WHO dilakukan. Vaksinasi juga telah dilakukan untuk memerangi penyakit rabies, dipteri, tetanus, batuk kering, radang sum-sum tulang belakang, radang paru-paru, radang selaput otak, TBC, polio, hepatitis, dan lain-lain. Meskipun demikian, penyakit akibat infeksi virus masih banyak melanda masyarakat, hal ini disebabkan oleh belum tersedianya vaksin yang efektif dan harganya murah.

Metode baku pembuatan vaksin adalah membiakkan mikroba patogen (misalnya virus) dalam binatang yang cocok atau membiakkan sel dalam laboratorium. Virus kemudian dikumpulkan, dimatikan atau dilemahkan sebelum diinjeksikan ke dalam tubuh manusia. Tubuh kemudian membuat antibodi untuk menyerang mereka. Cara ini memerlukan waktu, tetapi yang merupakan masalah utama sebenarnya adalah sering kali tidak ditemukannya metode konvensional untuk membiakkan virus dalam jumlah banyak. Untuk mengatasi hal ini vaksin telah dibuat dengan rekayasa genetika dengan teknik "Kloning".

d. Interferon

Sejarah interferon dimulai pada tahun 1957, ketika *Alick Isaacs* dan *Jean Lindenmann* meneliti tanggapan tubuh terhadap infeksi virus. Mereka menemukan bahwa suatu substansi yang disekresikan oleh sel yang terserang dapat membantu sel lain untuk menentang virus penyerang. Senyawa tersebut dinamakan interferon. Interferon digunakan untuk mengobati penyakit oleh virus dan beberapa penyakit kanker.

Sampai tahun 1980, sumber interferon dunia berasal dari laboratorium *Karl Cantell* di Helsinki, di sini sel darah putih dari donor darah dalam jumlah banyak, kemudian sengaja diinfeksi dengan virus untuk menghasilkan interferon. Jumlah interferon yang dibuat sangat kecil dan sangat sukar dipisahkan dari bahan lain yang terdapat dalam darah. Darah dari 90.000 donor hanya dapat menghasilkan 1 gram interferon, yang harganya dapat mencapai 50 juta (per gram).

Hal yang sangat menggembirakan *Charles Weissman* (Swiss, 1980) bersama kerabat kerjanya mengumumkan telah berhasil mengklonkan gen pengendali pembuatan satu tipe interferon manusia dengan menyisipkannya ke dalam bakteri, lalu sel bakteri tersebut segera membuat interferon. Kini interferon telah dapat diproduksi secara besar-besaran dan digunakan untuk mengobati berbagai infeksi virus (herpes, hepatitis, rabies) dan kanker.

INFO BIOLOGI

Pluripotensi

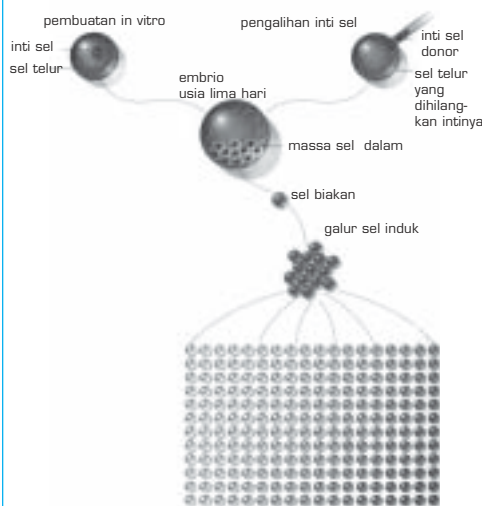
Kemajuan bioteknologi senantiasa ditunjukkan pada berbagai tujuan. Di tengah perdebatan etika, ilmuwan di seluruh dunia berlomba mendapatkan teknik tercepat untuk pengobatan medis.

Kemampuan sel induk embrio berkembang menjadi beragam tipe sel – disebut *pluripotensi* – telah membuka cakrawala baru di bidang kedokteran.

Tubuh orang dewasa memiliki sejumlah kecil sel induk dalam banyak jaringan dan organ – di mana mereka bersembunyi hingga tergerak oleh penyakit atau cedera. Tak seperti sel induk embrio, sel induk dari orang dewasa belum terbukti mampu menjadi beragam macam sel. Sel induk dewasa di dalam otak misalnya, dapat menjadi sel saraf atau sel glia – keduanya sel saraf – tetapi tak menjadi sel tulang.

Begitu pula sel induk dari darah tali pusar bayi yang baru lahir menghasilkan sel darah saja. Namun baru-baru ini, jaringan tali pusar terbukti mengandung sel mesansin yang dapat menghasilkan tulang dan tulang rawan.

Dengan teknik ini diharapkan berbagai tipe jaringan bahkan organ tubuh manusia dapat dikloning (dibuat) untuk keperluan pencangkokan organ. Sel induk embrio tersebut disimpan di lemari pembeku di laboratorium hingga diperlukan.



Sumber: *National Geographic*, 2006

3. Bidang Energi

Energi mutlak diperlukan manusia sebagai bahan dasar melakukan berbagai aktivitas. Sumber energi terbesar di dunia saat ini adalah bahan bakar fosil. Sementara bahan bakar fosil ini semakin hari semakin berkurang. Mau tidak mau manusia harus berpikir keras untuk mencari bahan bakar alternatif. Di antara berbagai alternatif penggunaan energi, biomassa merupakan suatu pilihan yang banyak mendapat perhatian.

Biomassa merupakan sumber energi kimia yang selalu dapat diperbarui. Bahan ini dapat dibakar atau dengan mudah diubah menjadi bahan bakar cair atau gas (metan, alkohol atau hidrogen) oleh mikroorganisme. Biomassa mempunyai pengertian produksi bahan bakar mutu tinggi dan senyawa kimia tertentu dari hasil budi daya tanaman dengan sengaja atau limbah biologi seperti yang dihasilkan dalam pertanian dan kehutanan atau limbah pengolahan pangan.

Di Brasil (1975), alkohol digunakan sebagai bahan bakar pengganti minyak bumi. Kendaraan bermotor menggunakan alkohol yang dicampur dengan bensin menjadi gasohol. Alkohol tersebut diperoleh dari fermentasi tebu. Di Amerika, gasohol merupakan campuran 10% alkohol dan 90% bensin, bahan pembuatan alkoholnya adalah jagung. Kebanyakan fermentasi etanol skala komersial dilakukan oleh khamir (*Saccharomyces* sp). Bahan yang digunakan bisa glukosa, fruktosa dan maltosa.

Bahan bakar lain adalah *metan*. Metan berasal dari penguraian bahan organik oleh bakteri anaerobik. Bahan organik yang dimaksud dapat berupa limbah ternak, limbah panen, atau limbah manusia. Untuk lebih jelasnya pelajari tabel berikut!

Tabel 5.2 Bahan organik yang potensial untuk menghasilkan metan

1.	Limbah panen	Sampat tebu, pangkal dan daun jagung, jerami.
2.	Limbah ternak	kotoran hewan, sampah.
3.	Limbah manusia	tinja, kencing, sampah
4.	Produk sampingan	sekam, ampas tebu, limbah sayuran
5.	Serasah hutan	daun, ranting, cabang
6.	Limbah tumbuhan air	ganggang laut, gulma air (eceng gondok)

4. Bidang Makanan dan Minuman

Kisaran hasil pangan yang pembuatannya melibatkan mikroorganisme adalah sangat lebar, dari produk yang difermentasikan secara konvensional seperti tempe, oncom, kecap, mentega, keju, roti, yoghurt, anggur, bir, tape, terasi, nata de coco, sampai yang modern seperti protein sel tunggal (PST)

dan mikroprotein. Protein sel tunggal (“Single Cell Protein”) adalah sel mikroorganisme yang dikeringkan seperti ganggang, jamur, bakteri, ragi, dan kapang.

Di bawah ini adalah daftar nama mikroba peranannya dalam mengubah bahan mentah menjadi suatu produk yang bernilai tinggi.

Tabel 5.3 Mikroba dan Peranannya

No.	Mikroorganisme	Bahan Mentah	Produk yang dibentuk
1.	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	tepung gula	roti alkohol
2.	– <i>Bacillus subtilis</i> – <i>Aspergillus niger</i> – <i>B. coagulans</i>	pati jagung, gandum, kentang, singkong	sirop glukosa
3.	– <i>Streptococcus thermophyllus</i> – <i>S. lactis</i> – <i>S. cremoris</i> – <i>Lactobacillus bulgaricus</i> – <i>L.lactis</i> – <i>Propionibacterium shermanii</i>	Susu	keju
5.	<i>Streptococcus thermophyllus</i> <i>L. bulgaricus</i>	Susu	yoghurt
6.	<i>Acetobacter</i>	Alkohol	cuka
7.	<i>Aspergillus wentii</i>	kedelai	kecap
8.	<i>Rhizopus oryzae</i> <i>R.oligosporus</i>	kedelai	tempe, oncom
9.	<i>Neurospora</i>	Ampas tahu	oncom
10.	<i>Monascus purpureus</i>	Nasi	angkak (nasi merah)
11.	<i>Streptococcus diacetylactis</i> <i>Leuconstoc citrovorum</i>	– Susu	mentega
12.	<i>S. cerevisiae</i> <i>Spirulina (ganggang)</i> <i>Candida utilis</i>	Sel itu sendiri	protein sel tunggal
13.	<i>Fusarium graminearum</i>		mikroprotein

Cita rasa dan aroma sangat penting agar makanan/minuman menjadi lebih enak dan menarik. Saat ini cita rasa dan aroma tidak hanya mengandalkan sumber dari bahan alami, tetapi sudah dapat disintesis di laboratorium.

Beberapa contoh senyawa penimbul flavour dan aroma yang mempunyai potensi untuk dikembangkan secara komersial dapat dilihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 5.4 Senyawa Penimbul Cita rasa/Aroma

No.	Cita rasa/Aroma	Senyawa Kimia	Mikroba
1.	Kacang tanah, aroma bakar	Tetramethyl pyrazine	<i>Bacillus subtilis</i>
2.	Buah-buahan, tanaman dan bunga mawar	Geraniol Citronellal Linalool terpineol terpen	<i>Cerato eytis</i> spp <i>Kluyveromyces lactis</i>
3.	Buah-buahan, kelapa	Lactone	– <i>Sacharomyces</i> .
4.	Buah-buahan	Ester	– <i>Pseudomonas</i> spp – <i>Streptococcus</i> spp
5.	Mentega	Diacetyl	– <i>Lactobacillus</i> spp

Contoh-contoh enzim dalam industri makanan yang telah diproduksi melalui fermentasi adalah sebagai berikut.

Tabel 5.5 Enzim dalam industri makanan

No.	Enzim	Mikroba	Kegunaan
1.	Glukosa isomerase	<i>Baccillus coagulan</i> (bakteri)	Pembuatan sirup jagung
2.	Glukosa oksidase	<i>Aspergillus niger</i> (jamur)	Pembuangan oksigen pada pembuatan sari buah
3.	Rennin	Mucor (jamur)	Pembuatan keju
4.	Protease	<i>Aspergillus oryzae</i>	Pelembut roti
5.	Invertase	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Pelembut coklat

Tugas

Untuk menganalisis produk-produk bioteknologi di tempat-tempat tertentu. Buatlah rencana kunjungan ke berbagai tempat (pasar, apotek, rumah sakit, industri dan lain-lain). Carilah data sebanyak-banyaknya mengenai produk-produk bioteknologi yang dimanfaatkan sebagai bahan makanan, minuman, obat-obatan, industri kimia, dan perbaikan kualitas lingkungan.

Buatlah laporan secara tertulis mengenai: macam-macam produk, bahan dasar mikroba atau agen yang berperan dalam pembuatannya.

5. Bidang Pertanian dan Peternakan

Bertambahnya penduduk dari waktu ke waktu tentu saja menuntut tersedianya bahan pangan yang lebih banyak. Dalam beberapa dasawarsa terakhir, produksi hasil pertanian telah meningkat melebihi kebutuhan. Hal ini mendorong manusia untuk selalu meningkatkan teknologi pangan. Bioteknologi mempunyai potensi besar untuk meningkatkan produksi tanaman yang lebih tinggi, tahan terhadap herbisida tertentu, tahan terhadap penyakit, mengurangi kebutuhan terhadap pupuk, dan lain-lain.

a. Pemuliaan Tanaman

Penyilangan konvensional oleh para petani dilakukan dengan tujuan menghasilkan tanaman yang menjadi besar, kuat, dan lebih tahan penyakit. Selama puluhan tahun bahkan ratusan tahun lalu para petani dan para pemulia tanaman telah berhasil memuliakan tanaman padi, jagung, dan tebu, sehingga tanaman tersebut memiliki kualitas panen yang baik.

Pemuliaan tradisional telah banyak membantu meningkatkan produksi pertanian dalam kurun waktu 50 tahun terakhir. Data FAO tahun 1992 menunjukkan adanya peningkatan hasil biji-bijian dari rata-rata 1,1 ton per hektar pada tahun 1950 menjadi 2,8 ton per hektar pada tahun 1992. Namun, karena jumlah penduduk masih jauh lebih besar dibandingkan jumlah produksi pangan, peningkatan hasil pangan melalui proses pemuliaan ini masih terus dikembangkan.

Pada tahun 2030 diperkirakan penduduk dunia mencapai 8 miliar atau meningkat 2 miliar dari populasi sekarang. Di Indonesia sendiri diperkirakan pada tahun 2010 penduduk mencapai 245,71 juta atau bertambah sebesar 33,78 juta jiwa dari sekarang. Pada saat itu kebutuhan beras diperkirakan 36,42 juta ton, padahal produksi hanya 29,42 juta ton, sehingga defisit produksi mencapai 6,72 juta ton (Suryana A., 2002).

Akibat dari pembangunan yang sangat pesat di berbagai bidang dalam beberapa tahun terakhir ini lambat laun lahan produktif semakin banyak

terkonversi menjadi lahan nonpertanian. Pada tahun 1950 lahan yang dapat dimanfaatkan untuk aktivitas per orang sekitar 0,24 hektar, tetapi lahan tersebut hampir separuhnya (0,12 hektar) pada tahun 1993 dan diperkirakan hanya akan tinggal 0,08 hektar pada tahun 2030 (Suranto, 1999).

Dari data di atas Indonesia diperkirakan akan mengalami krisis pangan yang dapat mengganggu ketahanan pangan nasional. Untuk mencukupi kebutuhan pangan penduduk yang populasinya terus bertambah dengan pesat ini, diperlukan lahan yang luas, sementara lahannya semakin berkurang. Oleh karena itu, diperlukan terobosan-terobosan di bidang teknologi pertanian untuk meningkatkan produktivitas pertanian.

Seperti diyakini para pakar rekayasa genetika merupakan salah satu teknologi pertanian yang berpeluang dapat meningkatkan produktivitas pertanian. Pada pemuliaan tradisional diperlukan sedikitnya lima generasi penyilangan balik untuk menghilangkan gen-gen yang tidak dikehendaki sehingga pemuliaan tradisional memerlukan waktu yang lama.

Dengan kemajuan ilmu genetika molekuler pada tahun 1970-an, dimungkinkan usaha mencari gen yang diduga bertanggung jawab terhadap karakter unggul satu tanaman. Saat ini secara umum ada dua cara untuk mencari gen tanaman itu, yakni isolasi gen dalam skala kecil dengan menargetkan satu gen saja (strategi ini disebut *map-based cloning*) dan dalam skala besar dengan menggunakan proyek genom, yaitu dengan membaca (dalam istilah khususnya menyekuen) semua urutan DNA suatu organisme untuk mendapatkan semua gen yang ada.

Pada tahun 1920 istilah genom telah lahir, dipakai untuk menunjukkan keseluruhan kode genetika pada kromosom yang ada pada suatu organisme. Baru pada tahun 1944 diketahui bahwa materi dari kode genetik itu adalah DNA yang ada pada setiap organisme. Sekarang ini istilah genom telah begitu dikenal luas oleh masyarakat. Keunggulan rekayasa genetika adalah mampu memindahkan materi genetika dari sumber yang sangat beragam dengan ketepatan tinggi dan terkontrol dalam waktu yang lebih singkat. Usaha yang dilakukan untuk menanggulangi krisis pangan di Indonesia dengan pendekatan biologi molekuler, antara lain dengan merakit tanaman yang resisten terhadap serangan hama dan penyakit, toleran terhadap cekaman lingkungan serta bergizi tinggi.

b. Transgenik

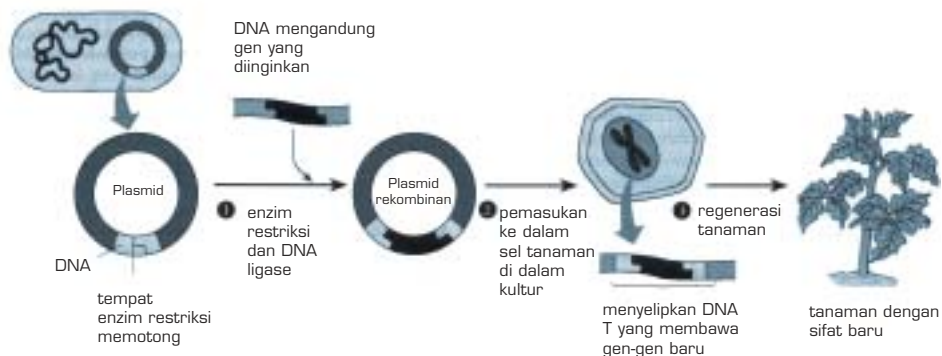
Rekayasa genetika dalam bidang tanaman dilakukan dengan mentransfer gen asing ke dalam tanaman. Hasil rekayasa genetika pada tanaman seperti ini disebut tanaman *transgenik*. Pernahkah kamu berpikir bahwa sepotong jagung dan sebuah tomat dapat menyembuhkan penyakit? Atau hanya dengan memakan pisang kita dapat melindungi diri dari hepatitis?

Prodi gene Inc. of College station, Texas menjadi perusahaan pertama yang berhasil memodifikasi tanaman untuk menghasilkan protein tertentu yang berfungsi sebagai obat. Protein tersebut adalah trypsin, insulin, dan obat penting lainnya yang akan dimasukkan ke dalam jagung. Mereka juga mengujinya pada kentang, tomat dan wortel untuk menghasilkan vaksin hepatitis B. Para peneliti juga memodifikasi tomat, bayam, dan melon untuk menghasilkan vaksin rabies.

Kedelai transgenik muncul menjadi obat untuk herpes. Sebuah tim ilmuwan dari Purdue University dan Departemen Pertanian AS (USDA) telah mengembangkan tomat yang tiga setengah kali lebih banyak mengandung lycopene dan antioksidan untuk melawan kanker. Kemajuan ini sangat penting dan dalam kenyataan jumlah tanaman transgenik yang diproduksi setiap tahun semakin meningkat. Hingga tahun 1988 yang asalnya hanya ada 23 tanaman transgenik, meningkat menjadi 30 pada tahun 1989 dan lebih dari 40 pada tahun 1990.

Pencangkokan (kloning) adalah transplantasi/transfer gen ke gen lainnya, misalnya gen pankreas babi ditransplantasikan ke bakteri *E. Coli* sehingga dihasilkan insulin dalam jumlah besar. Sebaliknya gen bakteri yang menghasilkan toksin pembunuh hama ditransplantasikan ke tanaman jagung, maka akan diperoleh jagung transgenik yang tahan hama tanaman. Gen dari sel kelenjar susu domba ditransplasikan ke sel telurnya sendiri yang kemudian ditumbuhkembangkan di dalam kandungan induknya sehingga lahirlah Domba Dolly. Demikian pula gen tomat ditransplantasikan ke ikan transgenik sehingga ikan menjadi tahan lama dan tidak cepat busuk dalam penyimpanan.

Vektor DNA yang digunakan untuk memindahkan gen ke dalam tumbuhan, misalnya plasmid dari bakteri *Agrobacterium tumefaciens*. Perhatikan gambar berikut ini.

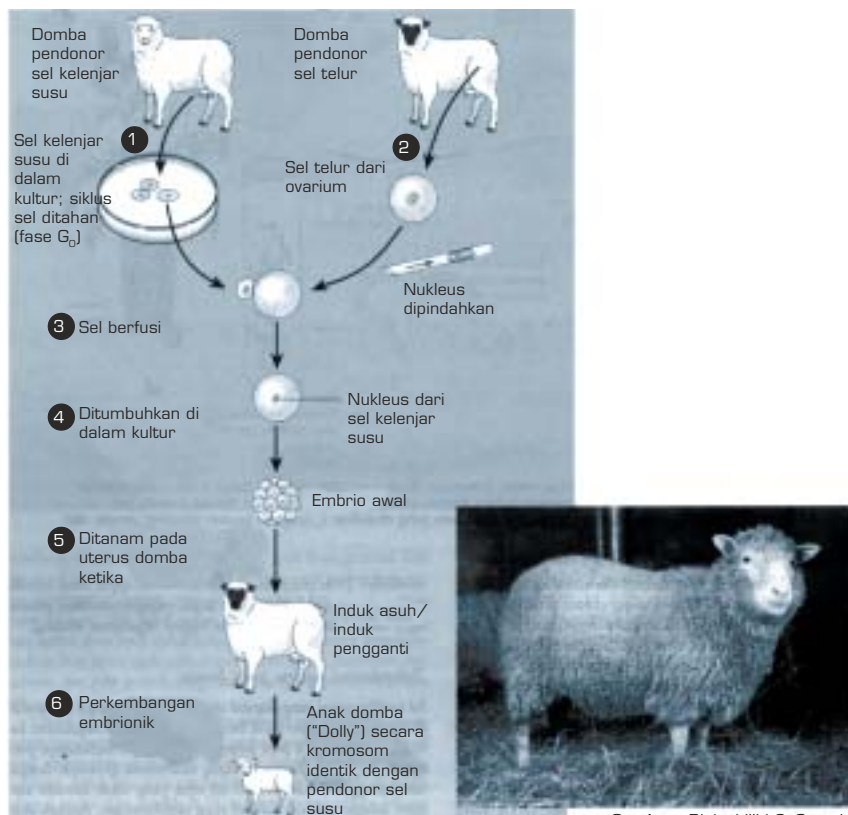


Gambar 5.6 penggunaan plasmid pada transgenik

Tanaman membutuhkan unsur N yang cukup. Kemampuan tanaman untuk memperoleh nitrogen sangat penting. *Rhizobium* merupakan penambat nitrogen yang sangat populer dan banyak ditemukan pada akar kacang-kacangan. Telah lama diketahui bahwa enzim utama yang berperan menambat nitrogen tersebut adalah *nitrogenase*. Ternyata lebih dari selusin gen yang terlibat dalam menghasilkan enzim tersebut. Gen tersebut dinamakan gen nif (Nitrogen fixation). Rekayasa genetik telah berhasil untuk mentransfer gen nif dari bakteri penambat nitrogen ke dalam *Escherichia coli* sehingga bakteri *E. coli* kemudian mampu menambat nitrogen. Bakteri ini kemudian dapat dijadikan inokulan untuk diberikan pada tanaman budi daya.

c. Transplantasi nukleus pada hewan

Pada tahun 1997 seorang peneliti Skotlandia, Ian Wilmut dan rekan-rekannya menguasai pokok pemberitaan di berbagai media bahwa mereka telah mengklon seekor domba dewasa dengan mentransplantasi nukleus dari sel puting susu kambing ke dalam suatu sel telur domba lain yang tidak di buahi. Hasilnya adalah domba "Dolly" yang DNA-nya sungguh-sungguh identik dengan domba pendonor nukleus, perhatikan Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Pengklonan seekor mamalia

Sumber: *Biologi jilid 2*, Campbell

1. Sel kelenjar susu diambil dari kambing seekor domba dan ditumbuhkan di dalam kultur dengan nutrisi rendah. Kondisi nutrisi rendah (setengah-kelaparan) ini menahan siklus sel tetap berada pada G_0 dan tampaknya membiarkan sel untuk berdediferensiasi.
2. Sementara itu sel telur diambil dari domba lain dan nukleusnya dipindahkan.
3. Sel kelenjar susu dalam fase G_0 berfusi dengan sel telur yang tak bernukleus dengan cara memberikan getaran arus listrik ke kedua sel tersebut, yang juga merangsang agar mulai melakukan pembelahan.
4. Setelah ditumbuhkan dalam kultur selama 6 hari.
5. Embrio ditanam pada uterus domba ketiga, yang mirip seperti pendonor sel telur.
6. Hasilnya setelah kehamilan berupa anak domba (Dolly) yang identik dalam penampakan dan susunan kromosomnya dengan domba yang mendonorkan sel kelenjar susu. (Namun, gen Dolly tidak identik secara keseluruhan dengan domba pendonor sel kelenjar susu karena DNA mitokondria Dolly berasal dari pendonor sel telur). Dolly ini merupakan kasus pertama yang laporannya disebarluaskan tentang mamalia yang “diklon” menggunakan nukleus dari suatu sel terdiferensiasi. Fotograf pada Gambar 5.7 memperlihatkan Dolly ketika sudah menjadi seekor domba dewasa.

INFO BIOLOGI

Bayi Tabung

Teknologi mutakhir lain dalam bidang reproduksi adalah pembuatan bayi tabung. Sudah tidak asing lagi bukan? Apakah sebenarnya bayi tabung? Apakah bayi yang dibuat di dalam tabung? Ternyata bukan.

Istilah bayi tabung sebetulnya digunakan karena proses pembuahan tidak terjadi sebagaimana “lazimnya”, yaitu di dalam tubuh ibu, melainkan terjadi di luar tubuh. Pembuahan tersebut tepatnya terjadi di dalam sebuah tabung yang telah dipersiapkan sedemikian rupa di laboratorium. Dengan kata lain, bertemunya sperma dan sel telur tidak terjadi secara alamiah, tetapi dengan campur tangan ahli (dokter). Tabung tersebut dibuat sedemikian rupa, baik suhu dan situasinya, hingga menyerupai pembuahan di dalam rahim. Prosedur ini disebut “fertilisasi in vitro”.

Mula-mula dengan alat bantu khusus, sel telur wanita yang baru saja mengalami ovulasi, diambil. Proses selanjutnya adalah melakukan

pembuatan dengan spermatozoa yang sudah disiapkan untuk kemudian dimasukkan ke dalam tabung yang suasananya sama persis dengan rahim. Setelah terjadi pembuahan, hasil pembuahan tersebut dipelihara kurang lebih 3 hari di dalam tabung (diinkubasi). Kemudian dimasukkan ke dalam rahim sang ibu hingga melahirkan.

Di Indonesia, sejak lahirnya bayi tabung pertama yang lahir di Makmal Terpadu Imunoendrokrinologi FKUI dan RSAB Harapan Kita pada tahun 1988 program ini segera banyak diminati oleh pasangan suami istri yang sudah rindu mendapatkan keturunan. Banyak faktor yang menyebabkan tidak terjadi kehamilan antara lain: ada infeksi dan penyumbatan pada saluran reproduksi, gangguan kontraksi uterus, tidak terjadi ovulasi, kelainan letak uterus maupun bentuk uterus.

Adapun kelemahan-kelemahan pria yang tidak mampu membuat kehamilan, antara lain: impotensi, kualitas sperma dan jumlah sperma kurang, serta adanya infeksi pada saluran reproduksi. Tonggak sejarah bayi tabung sebenarnya adalah sejak dilahirkannya, Louis Brown di Inggris pada tahun 1978. Sepuluh tahun kemudian tepatnya tanggal 2 Mei 1988 lahir Nugroho Karyanto di RSAB Harapan Kita Jakarta.

Sumber: Majalah Ayah Bunda, 2005

d. Proyek Genom

Tanaman menyediakan materi untuk kebutuhan industri seperti minyak, tekstil, bahan bakar dan obat-obatan. Nenek moyang kita dahulu meningkatkan kualitas tanaman dengan menyeleksi tanaman berdasarkan sifat dan karakter yang diinginkan melalui proses persilangan yang panjang. Sifat unggul dari satu tanaman liar digabungkan ke tanaman lain sehingga terbentuk tanaman baru dengan beberapa karakter yang lebih bagus. Proses panjang ini telah memungkinkan lahirnya revolusi hijau, dalam hal ini produk pertanian teroptimalkan sampai menyamai pertumbuhan penduduk dunia. Meskipun demikian, ledakan penduduk dunia terutama di negara-negara berkembang yang diikuti oleh berkurangnya lahan-lahan pertanian untuk pemukiman menyebabkan pertanian tidak seimbang lagi. Dengan demikian, usaha persilangan yang memakan waktu lama dengan sendirinya tidak mampu meningkatkan hasil produksi untuk mencukupi kebutuhan pangan pada masa mendatang. Untuk itu diperlukan satu teknologi baru guna meningkatkan produksi pangan secara lebih cepat.

Salah satu penemuan spektakuler telah dikembangkan, kita kenal dengan istilah *Proyek Genom* ("Genom Project"). Strategi ini ditopang dengan majunya perkembangan teknologi marker DNA, pemetaan genetika dan perpustakaan genom (genome library), teknologi sekuen DNA secara otomatis, serta analisis komputer (computerized analysis). Selain itu juga teknik kultur jaringan untuk

mentransfer gen-gen yang ditemukan. Dengan demikian, bisa dikatakan ada dua tahap revolusi pertanian, yang *pertama* dicapai dengan persilangan tanaman secara tradisional yang memakan waktu dan yang *kedua* adalah melalui aplikasi ilmu genetika molekuler.

Proyek genom adalah proyek menyekuen urutan DNA setiap kromosom dari ujung ke ujung. Proyek genom pada tanaman sangat menjanjikan untuk mendapatkan informasi terlengkap tentang seluruh sifat biologis tanaman. Informasi ini akan membantu kita memahami bagaimana gen-gen menyebabkan tanaman mampu melaksanakan segala aktivitasnya sebagai makhluk hidup.

Inilah target umum proyek genom tanaman. Adapun target khususnya adalah untuk mengisolasi gen-gen yang memberikan sifat unggul, seperti sifat tahan penyakit, sifat toleran pada tanah bergaram, dan sifat alami lainnya, di antaranya gen yang mengatur pembentukan minyak biji-bijian atau waktu berbunga yang semuanya berdampak pada hasil panen. Usaha ini nantinya akan memungkinkan rekayasa genetika untuk menghasilkan tanaman baru yang lebih berkualitas.

Besarnya proyek genom serta teknologi yang mendukung untuk penyelesaiannya melahirkan genomika sebagai ilmu baru. *Genomika* diartikan sebagai usaha mendalami struktur dan fungsi gen dalam skala besar. Genomika dibagi dalam dua bagian, yaitu *structural genomics* (genomika struktur) dan *functional genomics* (genomika fungsi). Berikut ini beberapa contoh mikroba yang telah selesai pembacaan genomnya dan prospek yang diharapkan saat ini dan masa yang akan datang.

1) *Pengubahan Zat Pati*

Clostridium acetobutylicum adalah bakteri yang dapat mengubah zat pati menjadi pelarut organik aseton dan butanol yang sangat bermanfaat untuk industri.

2) *Tahan Radioaktif*

Deinococcus radioduran adalah mikroba yang dapat bertahan di lingkungan radioaktif berdosisi tinggi yang membunuh hampir semua makhluk hidup lain. Bakteri ini dapat bertahan hidup pada tingkat radiasi 1,7 juta rad yang membuat *E. Coli*, kecoa, dan manusia tak mungkin bertahan hidup.

Informasi genom bakteri ini sangat potensial untuk proses “bioremediasi” seperti pembersihan lingkungan dari limbah radioaktif, logam berat atau senyawa kimia organik. Saat ini para peneliti di Amerika Serikat sedang mengeksplorasi kapabilitas bakteri *D. radioduran* dengan menambah gen dari organisme lain. Tambahan gen ini mengodekan protein yang bisa mengubah logam berat menjadi biomassa yang lebih netral

dan menguraikan zat organik berbahaya, seperti toluena. Diharapkan pula dengan mempelajari genom mikroba, manusia dapat lebih memahami proses terjadinya sel kanker sekaligus menemukan obat dan cara pengobatan kanker tersebut sebab bakteri ini sanggup memperbaiki DNA-nya sendiri yang rusak karena pengaruh radiasi.

3) *Penghasil Gas Metan*

Arkeo *Methanococcus jannaschii* adalah mikroba yang dapat menghasilkan gas metan. Mikroba ini ditemukan di lingkungan berasap hidrothermal, tanpa cahaya, tanpa oksigen, tanpa sumber zat karbon. Sifat yang sangat tidak biasa yang dimiliki oleh mikroba ini membawa pada kesimpulan bahwa makhluk hidup tidak hanya “prokariot” dan “eukariot”, tetapi ada kelompok baru yang berbeda dengan prokariot dan eukariot. Para ilmuwan mengelompokkan mikroba ini ke dalam kelompok baru yaitu *Archeae* (Arkeo). Dengan berhasilnya pembacaan genom mikroba ini diharapkan masalah mengenai bahan bakar dapat dipecahkan.

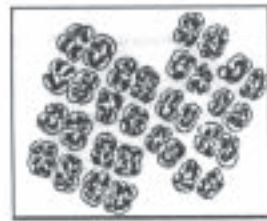
Aplikasi dahsyat dan kemajuan sains yang dijanjikan oleh proyek ini memang di depan mata. Proyek genom mikroba ini sampai saat ini memang hanya milik negara-negara maju yang bermodal besar. Namun, mudah-mudahan masa depan yang cerah ini bukan hanya milik negara-negara bermodal besar. Indonesia tak kalah kaya dengan mikroba yang potensial untuk kehidupan masa depan.



Clostridium botulinum



Clostridium acetobutylicum



Deinococcus radiodurans

Sumber: Kompas

Gambar 5.8 Mikroba penghasil gas metan

4) *Menstabilkan Jumlah Karbon Dioksida di Atmosfer*

Mikroba lain seperti *Nitrosomonas europaea*, *Prochlorococcus marinus*, *Rhodospseudomonas palustris* adalah organisme yang menjadikan karbon dioksida sebagai satu-satunya sumber nutrisi zat karbonnya. Mikroba-mikroba ini diduga mempunyai peranan penting dalam perubahan iklim. Dengan demikian, informasi yang didapat dari genom mikroba-mikroba ini mampu berperan mengatasi pemanasan global dengan menstabilkan jumlah CO₂ di atmosfer.



Methanococcus jannaschii



Prochlorococcus marinus



Rhodospseudomonas palustris

Gambar 5.9 Berbagai jenis bakteri

Sumber: Kompas

Pada tahun 1998 *Arabidhopsis thaliana* dikukuhkan menjadi tanaman pertama yang disequon genomnya oleh konsorsium internasional dari Jepang, Eropa dan Amerika. *Arabidhopsis* merupakan model yang cocok bagi kelompok tanaman berbiji belah yang termasuk di dalamnya tomat, kentang, tembakau, dan sayur-sayuran. Di antara kelebihan model ini adalah ukuran genomnya yang kecil. Tanaman diploid yang terdiri atas 5 set kromosom mudah ditanam karena kecil dan cepat menghasilkan biji untuk regenerasi, latar belakang genetika memadai, serta mudahnya proses transformasi.

Padi memiliki nilai ekonomi tinggi karena menjadi makanan pokok lebih dari setengah jumlah penduduk di planet ini. Padi merupakan tanaman berbiji tunggal, diploid dengan 12 kromosom, dan mempunyai ukuran genom yang lumayan kecil, yaitu 450 juta base. Latar belakang genetika padi sangat kuat dengan adanya peta genetika yang terlengkap di antara tanaman lain, yaitu adanya lebih dari 2.000 molecular marker DNA yang terbagi merata sepanjang kromosomnya serta proses transformasinya padi yang sudah berkembang. Secara evolusi, padi mempunyai hubungan sangat erat dengan tanaman pangan yang masuk dalam jenis rumput-rumputan. Berdasarkan studi perbandingan, ternyata pada konservasi *gene collinearity* (persamaan urutan gen) dalam kromosom antara padi dan anggota keluarga rerumputan, seperti barley, oats (keduanya adalah jenis gandum), jagung, dan gandum.

Untuk itu, dengan menyekuen genom padi, semua gen dari tanaman berbiji tunggal yang notabene adalah bahan pokok hidup manusia sedunia bisa diketahui. Pada tahun 1998, dalam pertemuan *Internasional Society of Plant Molecular Biologist* (ISPMB) di Singapura, padi dari jenis *nipponbare* disetujui sebagai tanaman model kedua untuk proyek genom setelah *Arabidhopsis* oleh konsorsium internasional yang beranggotakan Jepang, Cina, Korea, Amerika, dan Uni Eropa.

Selain pada tumbuhan proyek genom juga dilakukan pada manusia. Hanya dalam tempo tiga belas tahun, lebih cepat dua tahun dari target tahun 2005 para ilmuwan dunia yang bergabung dalam *The Human Genom Project* mengumumkan keberhasilan mereka memetakan genom manusia. Karena

genom adalah suatu cetak biru informasi genetik yang menentukan sifat setiap makhluk hidup, maka pemetaan ini bakal menjadi kunci pembuka babak baru dalam memahami penyakit dan bagaimana mengobatinya.

Informasi genetika setiap makhluk hidup disandi dalam bentuk pita molekul asam deoksiribonukleat yang dikenal sebagai DNA. Dengan pengumuman di atas, berarti proyek genom manusia telah berhasil memetakan tiga miliar nukleotida yang menyusun 100.000 gen dalam tubuh manusia. Dengan demikian, setiap individu memiliki kurang lebih 100.000 gen untuk diturunkan. Varian-varian dari gen inilah yang kemudian menentukan tinggi badan, warna mata, sidik jari, golongan darah, maupun kerentanan terhadap penyakit.

Lembaga pertama “*The Human Genom Project*” membangun peta susunannya dari DNA yang diambil dari 24 individu anonim dari berbagai grup ras dan etnisitas. Dari situlah dipahami adanya perbedaan rata-rata tiga juta antara satu orang dan orang lainnya. Proyek riset genom memang masih akan berlanjut dengan upaya mencari mutasi gen-gen penyebab kanker yang mematikan maupun gen yang terlibat dalam pemunculan diabetes, leukemia, bahkan juga eksim yang suka muncul pada usia kanak-kanak.

Seperti yang diberitakan *Reuters*, para peneliti di Amerika Serikat, Prancis, Jerman, Jepang, dan Cina mengungkapkan, mereka sebenarnya juga berminat menguak misteri protein yang menyusun jaringan dan mengatur fungsi metabolisme tubuh. Namun, kode genetiknya ternyata lebih kompleks dari yang dibayangkan. Memang harus diakui, masih perlu jalan panjang untuk mengaplikasikan hasil pemetaan genom manusia ini. Pekerjaan memetakan genom manusia tentulah pantas dipandang sebagai ikhtiar ilmiah yang mengagumkan.

6. Bidang Lingkungan Hidup dan Pengolahan Limbah

Limbah rumah tangga, pertanian, dan aktivitas industri telah banyak mengubah lingkungan kita, membuat pencemaran yang sangat merusak dan membahayakan ekosistem. Limbah tersebut dapat berupa senyawa kimia cair (asam, basa) dan senyawa kimia padat (logam-logam berat), tumpahan minyak, pestisida, pupuk, dan lain-lain.

Bioteknologi yang berperan penting dalam pemeliharaan lingkungan ditujukan pada proses mengatur dan membuat produk buangan tersebut menjadi aman untuk dibuang ke lingkungan. Banyak bakteri dapat mengekstraksi logam-logam berat, seperti tembaga, timbal, nikel, dan besi.

Kelompok bakteri yang diduga bersifat aktif dalam proses pengolahan air limbah dikenal sebagai *zoogles*, meskipun sejumlah organisme lain juga ikut terlibat, seperti ganggang biru, ganggang hijau, cacing tanah, dan serangga. Saat ini banyak pabrik yang mengelola limbah cairnya dengan

pengaktifan lumpur (lumpur aktif). Sejumlah mikroorganisme yang terlibat dalam lumpur aktif ini adalah *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas moraxella*, *Thiobacillus*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* dan *Ferrobacillus* sp.

E. Dampak Bioteknologi terhadap Sains, Lingkungan, Teknologi, dan Masyarakat

Kita telah membicarakan contoh-contoh, peranan, dan manfaat bioteknologi dalam kehidupan manusia. Tidakkah kita bertanya, “Adakah dampak negatif dari perkembangan bioteknologi yang demikian pesatnya?”

Kalau kita rajin membaca informasi serta peka terhadap isu-isu mengenai kemajuan bioteknologi, tentu kita tahu bahwa banyak “Pro dan Kontra” di antara berbagai kalangan, baik kalangan penelitian mahasiswa, maupun masyarakat. Berikut ini kita akan membahas beberapa pendapat tersebut.

1. Transgenik

Seperti yang telah dikemukakan pada bagian sebelumnya, bahwa produk transgenik yang dikenal juga dengan istilah GMO = *Genetics Manipulation Organism* merupakan produk bioteknologi yang spektakuler. Dengan transgenik (gen suatu species disisipi dengan gen tertentu) memungkinkan terbentuknya suatu jenis hewan atau tumbuhan yang mempunyai sifat-sifat unggul, seperti lebih besar, lebih kuat, tahan lama, dan kandungan gizi tinggi.

Pertanyaannya sekarang adalah “Seberapa aman produk teknologi reproduksi tersebut?” Sejauh ini terdapat sejumlah pernyataan aman dari lembaga resmi internasional, seperti WHO dan FAO. (Masih ingat kepanjangan WHO dan FAO?). Masyarakat AS sejak tahun 1996 telah mengonsumsi kedelai transgenik dan tidak ada laporan dampak negatif yang timbul. Masyarakat Eropa yang awalnya menentang produk transgenik kini sudah mulai menerima. Hal ini ditandai dengan adanya pernyataan dari Komisi Pusat Masyarakat Eropa di Brussel pada bulan Oktober 2001.

Akan tetapi, ada juga yang berpendapat bahwa terdapat beberapa kemungkinan risiko mengonsumsi makanan transgenik ini, seperti keracunan, risiko kanker, dan alergi makanan. Hal ini disebabkan antara lain produk transgenik tersebut bersifat “kebal antibiotik”, dan mengundang “residu pestisida”. Beberapa produk transgenik yang sudah dilepas di pasaran negarane-negara maju, sepanjang penelitian ilmiah dengan teknologi dan pengamatan yang ada sekarang, tidak ada masalah dalam hal keamanan terhadap lingkungan ataupun tubuh manusia. Demikian kesimpulan Departemen Kesehatan Inggris dalam laporannya tahun 1999.

Sejak 20 tahun lalu, teknologi ini dimanfaatkan hingga kini karena belum ada laporan ilmiah yang memaparkan efek negatif produk rekayasa genetika yang telah dievaluasi sesuai standar Jepang adalah aman. Ini kesimpulan Departemen Pertanian dan Kehutanan Jepang tahun lalu. Di Indonesia sendiri, meskipun mengundang banyak protes dari banyak pihak, pengembangan kapas transgenik telah ditanam di tujuh kabupaten Sulawesi Selatan. Namun, penelitian yang dilakukan oleh dua mahasiswa Pascasarjana Program Studi Bioteknologi IPB (Institut Pertanian Bogor), Marhamah Nadir dan Reza Indriadi membuktikan bahwa kapas transgenik di Indonesia ternyata mengontaminasi kapas non-transgenik di sekitarnya. Penelitian tersebut dilakukan selama setahun (September 2001–Agustus 2002).

Adanya kontaminasi (pencemaran genetik) dapat menyebabkan antara lain kebalnya hama (sehingga dapat memicu ledakan hama), mengganggu kesehatan bahkan tanaman transgenik tersebut menjadi gulma. Gulma adalah tanaman liar yang mengganggu tanaman budi daya. Jadi, sebenarnya mengelola tanaman transgenik itu tidak gampang, karena itu, perlu pengkajian yang benar, peraturan dan pengawalan yang ketat pula.

Dengan tetap berprinsip pada pendekatan kehati-hatian (*precautionary approach*) bahwa OHM (organisme hidup hasil modifikasi) yang secara nyata dapat memberi manfaat bagi manusia, tetapi tetap perlu waspada untuk mencegah hal-hal yang dapat merugikan bagi kesehatan manusia, pelestarian lingkungan, dan keanekaragaman hayati, maka Indonesia bersama dengan 133 perwakilan pemerintah, LSM, organisasi industri, dan masyarakat ilmiah, telah menyepakati suatu kesepakatan internasional mengenai pengaturan tata cara gerakan lintas batas negara (termasuk penanganan dan pemanfaatan) OHM, atau yang terkenal dengan *Cartagena Biosafety Protocol*, pada tanggal 29 Februari 2000, di Mountreal, Kanada.

Cartagena Biosafety Protocol (cartagena Protocol) adalah kesepakatan antara berbagai pihak yang mengatur tata cara gerakan lintas batas negara secara sengaja (termasuk penanganan dan pemanfaatan) suatu organisme hidup yang dihasilkan bioteknologi modern dari suatu negara ke negara lain oleh seseorang atau badan. Tujuan dibuatnya *Cartagena Biosafety Protocol* adalah untuk memberikan kontribusi dalam memastikan tingkat proteksi yang memadai dalam hal transfer, penanganan, dan penggunaan yang aman dari organisme hidup hasil bioteknologi modern. Hal itu untuk menjaga adanya kemungkinan pengaruh yang merugikan kelestarian dan pemanfaatan yang berkelanjutan pada keanekaragaman hayati, dengan mempertimbangkan risiko terhadap kesehatan manusia, dan khususnya berfokus pada pergerakan lintas batas. Sebenarnya sebelum tanaman transgenik disetujui untuk dikomersialisasi, tanaman tersebut telah diuji melalui proses evaluasi makanan bioteknologi.

Kelompok konsiderasi dari badan internasional dunia Food and Agriculture Organization (FAO) memberikan beberapa rekomendasi mengenai bioteknologi dan keamanan pangan, yaitu:

- a. Peraturan mengenai keamanan pangan yang komprehensif dan diterapkan dengan baik merupakan hal penting untuk melindungi kesehatan konsumen. Semua negara harus dapat menempatkan peraturan tersebut seimbang dengan perkembangan teknologi.
- b. Penilaian kesamaan untuk produk rekayasa genetika hendaknya berdasarkan konsep substansi ekuivalen.
- c. Pemindahan gen dari pangan yang menyebabkan alergi hendaknya dihindari kecuali telah terbukti bahwa gen yang dipindahkan tidak menunjukkan alergi.
- d. Pemindahan gen dari bahan pangan yang mengandung alergen ke organisme lain tidak boleh dikomersialkan.
- e. Senyawa alergen pangan dan sifat alergen yang menetapkan *immuno genicity* dianjurkan untuk diidentifikasi.
- f. FAO akan mengadakan lokakarya untuk membahas dan memutuskan bilamana ada beberapa gen *marka* ketahanan antibiotika yang harus dihindarkan dari tanaman pangan komersial.
- g. Perlu ada pangkalan data (data base) tentang pangan dari tanaman, mikroorganisme pangan, dan pakan.
- h. Validasi metode sangat diperlukan.
- i. Negara berkembang harus dibantu dalam pendidikan dan pelatihan tentang keamanan pangan dan komponen pangan yang ditimbulkan oleh modifikasi genetik.
- j. Perlu ditingkatkan riset pengembangan metode untuk meningkatkan kemampuan dalam melakukan penilaian keamanan pangan untuk produk rekayasa genetik.

Di Indonesia sendiri dalam rangka pengaturan keamanan hayati dan keamanan pangan suatu produk pertanian hasil rekayasa genetik seperti tanaman transgenik telah dikeluarkan keputusan bersama Menteri Pertanian, Menteri Kehutanan dan Perkebunan, Menteri Kesehatan dan Menteri Negara Pangan dan Holtikultura tentang Keamanan Hayati dan Keamanan Pangan Produk Pertanian Hasil Rekayasa Genetik Tanaman No.998.1/Kpts/OT.210/9/99;790.a/Kptrs-IX/1999;1145A/MENKES/SKB/IX/199;015A/Nmneg PHOR/09/1999. Keputusan ini dimaksudkan untuk mengatur dan mengawasi keamanan hayati dan keamanan pangan pemanfaatan produk pertanian hasil rekayasa genetika agar tidak merugikan, mengganggu dan membahayakan kesehatan manusia, keanekaragaman hayati, dan lingkungan. Tanggapan masyarakat dalam menyikapi produk bioteknologi beraneka ragam sesuai dengan informasi yang didapatnya. Umumnya mengambil sikap anti dan tidak menerima, tetapi sebaliknya ada yang menerima dan ada juga yang menerima tetapi dengan kehati-hatian.

2. Bayi Tabung

Bagi pasangan suami istri yang tak kunjung dikaruniai anak, program bayi tabung ini tentu sangat membantu. Terlebih di masyarakat masih tertanam kuat bahwa perkawinan tanpa anak dikatakan tidak sempurna. Tidak jarang berbagai masalah akan muncul karena alasan yang satu itu, tetapi tidak jarang masyarakat yang berpendapat tidak setuju dengan program bayi tabung ini. Hal tersebut dapat dimengerti sebab dikhawatirkan sel telur maupun sel sperma tidak berasal dari pasangan suami istrinya yang sebenarnya, melainkan sperma dari donor. Dari segi agama tentu hal ini tidak dibenarkan.

Walaupun dirasakan manfaatnya, program ini masih menimbulkan perdebatan. Perdebatan ini terfokus pada segi agama, etika, legalitas dan sosial, baik menyangkut prosedur maupun produk yang dihasilkan. Sebagian kelompok agamawan menolak “fertilitas in vitro” pada manusia karena dianggap memperlakukan Tuhan sebagai sang pencipta. Hal ini dapat dimengerti sebab dikhawatirkan sel telur maupun sperma tidak berasal dari pasangan suami istri yang sebenarnya. Sperma bisa saja dari donor (bank sperma). Dari segi agama tentu hal ini tidak dapat dibenarkan karena individu baru tersebut dapat kehilangan nasabnya (keutuhan keturunannya).

Di Indonesia sendiri sebenarnya program bayi tabung ini diatur berdasarkan undang-undang, yaitu UU No. 23/1992, tentang kesehatan. Undang-undang ini menjelaskan pelaksanaan program bayi tabung harus dilakukan sesuai dengan norma hukum, agama, kesusilaan, dan kesopanan. UU ini juga mengatur bahwa dalam pelaksanaan program bayi tabung di Indonesia tidak diizinkan menggunakan rahim milik wanita yang bukan istrinya.

Selain Undang-undang di atas, program bayi tabung di Indonesia, saat ini juga mengacu pada peraturan Menteri Kesehatan RI No.73/Menteri Kes/Per/11/1999 tentang Penyelenggaraan Pelayanan Teknologi Reproduksi Buatan. Peraturan ini mengatur penyelenggaraan teknologi reproduksi buatan hanya dapat dilakukan di Rumah Sakit Umum Pemerintah Kelas A, B dan Rumah Sakit Umum Swasta kelas utama. Penyelenggaraan penelitian dan pengembangan teknologi reproduksi buatan hanya dapat dilakukan oleh Rumah Sakit Umum yang menyelenggarakan teknologi reproduksi buatan. Rumah Sakit yang diberi izin penyelenggaraan dan pelayanan, penelitian dan pengembangan adalah RSUP Cipto Mangunkusumo, RSAB Harapan Kita, RSUD Dr.Soetomo Surabaya. Dalam pasal 4 disebutkan pelayanan teknologi reproduksi buatan hanya dapat diberikan kepada pasangan suami istri yang terikat perkawinan yang sah dan sebagai upaya akhir untuk memperoleh keturunan.

3. kloning

Kloning sebenarnya penting untuk menghasilkan organisme unggul baik pada tumbuhan maupun hewan. Di bidang pengobatan, klon hewan dipakai sebagai media membuat obat yang sangat langka dan mahal harganya, seperti yang dilakukan oleh Ian Wilmut yang menghasilkan Dolly, domba kloning pertama yang lahir pada tanggal 5 Juli 2003 di Skotlandia. Ian Wilmut berhasil membuat klon domba dengan sel donor dari kelenjar susu domba jenis “findorset” yang berumur 6 tahun. Findorset sebagai donor berbulu putih, sedangkan telurnya diambil dari domba betina jenis *blacface*, yang mukanya berbulu hitam, hasilnya Dolly yang berbulu putih bersih.

Setelah Dolly, sebenarnya secara teknik, klon manusia juga dapat dilakukan. Kloning dilakukan dengan cara mengeluarkan inti telur betina dan menggantinya dengan inti dari orang dewasa. Kalau berhasil, telur hasil rekayasa yang mulai berkembang tersebut ditanam di dalam rahim seorang perempuan. Nantinya telur tersebut akan tumbuh menjadi duplikat orang dewasa yang menyumbangkan intinya itu.

Secara medis infertilitas ketidaksuburan digolongkan sebagai penyakit. Salah satu cara yang sudah lazim ditempuh adalah teknik invitro (bayi tabung). Namun demikian, invitro tidak dapat menolong semua pasangan infertil, misalnya bagi seorang ibu yang tidak dapat menghasilkan sel telur, dan pria yang tidak dapat menghasilkan sperma.

Dalam hal ini, teknik kloning merupakan hal yang “revolusioner” sebagai pengobatan infertilitas karena penderita tidak perlu menghasilkan sperma atau telur. Mereka hanya memerlukan sejumlah sel dari manapun diambilnya. Pengklonan juga dapat dilakukan terhadap anggota badan untuk mengganti jaringan sel yang rusak di dalam tubuh.

Bagaimana tanggapan masyarakat mengenai hal ini? Ternyata masih merupakan kontroversi. Berbagai usulan melarang kloning manusia. Banyak kalangan menganggap bahwa “pengklonan manusia secara utuh tidak boleh dilakukan sebab anggapan sebagai intervensi karya ilahi dan tidak bermoral.”

4. Dampak Bioteknologi pada Petani Dunia Ketiga

Negara dunia ketiga adalah negara-negara berkembang yang umumnya terletak di belahan bumi bagian selatan. Semula sumber daya alam, seperti cokelat, vanili, kina, minyak sawit, tembakau, dan gula dihasilkan secara tradisional oleh negara-negara berkembang. Umumnya negara-negara berkembang ini bertindak sebagai pemasok negara-negara maju. Kini dengan kemajuan bioteknologi beberapa sumber daya alam di atas diproduksi di dalam pabrik-pabrik industri.

a. Penggantian Gula

Gula tadinya dihasilkan oleh negara-negara di Selatan. Kini gula bit telah dihasilkan oleh negara-negara Utara, terutama Eropa. Masyarakat Ekonomi Eropa (MEE) beralih dari pengimpor menjadi pengekspor gula pada pertengahan dasawarsa 70-an. Kelebihan produksi gula di pasar dunia telah mengakibatkan turunnya harga. Dengan bioteknologi, hasil panen tebu dapat ditingkatkan menjadi tiga kali lipat, yang tampaknya menguntungkan negara berkembang, tetapi sebetulnya justru menekan lebih jauh harga gula di pasar dunia. Apalagi zat pemanis sudah dapat diekstraksi dari tanaman tertentu, atau lebih jauh lagi seluruhnya telah dapat dibuat di pabrik dengan menggunakan teknik enzim.

Menurut sebuah studi yang dilakukan di Amerika Serikat, sekarang gula disaingi oleh lebih dari 30 perusahaan. Sampai sekarang telah lebih dari 30 karyawan minuman ringan di Amerika Serikat (Coca Cola, Pepsi Cola, 7-up, Sunkist) mengganti penggunaan gula dengan HFCS (*High Fructose Corn Syrup*) yang dibuat dari jagung.

Lebih jauh lagi zat pemanis telah dapat dibuat dengan bioteknologi di dalam pabrik dan tidak membutuhkan lahan sama sekali. Aspartam misalnya, yang rasanya 200 kali lebih manis dari gula telah diproduksi; Aefulsame-k, 130 kali lebih manis daripada gula, dan Thaumatin 250 kali lebih manis daripada gula.

b. Penggantian Cokelat

Cokelat merupakan komoditi pertanian kedua bagi kawasan tropika dengan nilai ekspor tahunan kira-kira US\$ 2,6 miliar. Sekitar separuh dari produksi cokelat dunia dihasilkan oleh petani-petani kecil di negara-negara Afrika yang miskin.

Sekarang beberapa perusahaan di negara industri sedang menggantikan cokelat ini sepenuhnya. Ajinomoto, sebuah perusahaan makanan Jepang telah berusaha memodifikasi minyak nabati yang murah (misalnya minyak sawit) sehingga dapat diolah menjadi mentega cokelat. Bersamaan dengan itu perusahaan cokelat terkemuka seperti Hersey dan Nestle, menyelenggarakan riset untuk menghasilkan cokelat melalui teknik kultur sel di pabrik-pabrik mereka. Setiap sel yang dibiakkan di pabrik akan menghasilkan cokelat yang serupa dengan cokelat yang ditanam di perkebunan.

c. Penggantian Vanili

Beberapa perusahaan bioteknologi Amerika Serikat telah menyelidiki cara bagaimana pembuatan vanili di pabrik-pabrik industri. Selama ini vanili dihasilkan oleh negara-negara berkembang, seperti Madagaskar, Reunion,

Komoro, dan Indonesia. Dengan demikian, sebenarnya kemajuan bioteknologi menyebabkan peran negara berkembang yang miskin sebagai penghasil bahan baku telah diperkecil.

d. Paten dalam Bioteknologi

Kemajuan-kemajuan dalam bidang bioteknologi menyebabkan semakin meningkatnya nilai sumber daya genetika dan saran-saran pengolahannya. Tekanan-tekanan ditujukan untuk menjadikan perlindungan hak cipta atas varietas-varietas baru sehingga varietas-varietas baru tersebut dapat dimasukkan ke dalam sistem paten industri yang umum, dan penguasaan monopolinya dapat mempunyai jangkauan lebih jauh. Kini kalangan industri sedang giat mendapatkan paten-paten produk atas gen dan bibit. Pemegang paten dapat menguasai semua varietas, gen miliknya dipadukan, dan juga dapat melarang orang lain untuk tidak menggunakan gen tersebut. Bagaimana dampak sistem paten ini terhadap negara-negara sedang berkembang? Pada kenyataannya paten menjadi alat untuk memuaskan dan menguasai pasar. Jadi, sebaiknya negara-negara sedang berkembang bersikap “menolak sistem paten”.

Rangkuman

1. Bioteknologi adalah penerapan prinsip ilmiah dan rekayasa pengolahan bahan oleh agen biologi untuk menyediakan barang dan jasa.
2. Bioteknologi bersifat multidisiplin.
3. Bioteknologi dapat dipraktikkan secara konvensional maupun modern.
4. Jenis-jenis bioteknologi modern, antara lain kultur jaringan dan rekayasa genetika.
5. Bioteknologi telah memberikan manfaat dalam berbagai bidang misalnya bidang industri kimia, farmasi dan kesehatan, makanan dan minuman, sumber energi, pertanian dan peternakan, pengolahan limbah, dan lingkungan hidup.
6. Dampak bioteknologi, antara lain keamanan produk kadang-kadang diragukan, menimbulkan polusi genetika, dan menimbulkan polemik (pro dan kontra) di kalangan masyarakat.

Kata Kunci

Bioteknologi

Totipoten

Antibodi

Vaksin

Antibiotik

Genom

Plasmid

DNA rekombinan

Kloning

Transgenik

Interferon

Pluripotensi

Evaluasi Akhir Bab

A. Pilih jawaban yang paling tepat!

- Penggunaan makhluk hidup dalam bioteknologi adalah sebagai berikut, *kecuali* . . .
 - mudah bereproduksi
 - produk yang dihasilkan bervariasi
 - dapat dikloning
 - mudah diperoleh
 - harga relatif murah
- Berikut ini adalah cabang-cabang ilmu yang berperan dalam perkembangan bioteknologi, *kecuali* . . .
 - Biologi sel
 - Elektronika
 - Komputer
 - Ekonomi
 - Agama
- Makanan-makanan berikut yang bukan berasal dari hasil fermentasi adalah . . .
 - oncom
 - kecap
 - brem
 - tape
 - tahu
- Makanan khas Indonesia yang merupakan hasil bioteknologi adalah . . .
 - keju
 - yoghurt
 - sake
 - tempe
 - anggur

5. Mikroorganisme yang dapat membantu pembuatan yoghurt adalah
 - A. *Lactobacillus bulgaricus*
 - B. *Streptococcus lactis*
 - C. *Saccharomyces cereviceae*
 - D. *Acetobacter xylinum*
 - E. *Xanthomonas* sp

6. Berikut ini adalah bidang-bidang yang dapat memanfaatkan hasil bioteknologi, *kecuali*
 - A. lingkungan hidup
 - B. industri kimia
 - C. agrikultur
 - D. farmasi
 - E. elektronika

7. Bibit-bibit tanaman tidak harus diperoleh dengan menyemai biji, tetapi mengkultur sepotong jaringan dalam suatu medium. Hal ini karena setiap sel memiliki sifat
 - A. regenerasi
 - B. iritabilitas
 - C. reproduksi
 - D. totipoten
 - E. eksistensi

8. Bioteknologi modern adalah bioteknologi yang dikembangkan dengan memanfaatkan
 - A. kultur jaringan
 - B. teknik DNA rekombinan
 - C. fermentasi
 - D. kawin silang

9. Bayi pertama yang lahir sebagai “bayi tabung” bernama
 - A. Louis Band
 - B. Kate Bonie
 - C. James Brown
 - D. Louis Brown
 - E. Nugroho Karyanto

10. Tanaman transgenik yang dikembangkan untuk menghasilkan vaksin hepatitis B adalah
 - A. bayam
 - B. melon
 - C. tomat
 - D. kedelai
 - E. jagung

11. Negara yang saat ini tengah mengembangkan penelitian mengenai bioteknologi terbesar di dunia adalah
 - A. Amerika Serikat
 - B. Inggris
 - C. India
 - D. Cina
 - E. Thailand

12. Republik Korea telah mencanangkan “Tahun Bioteknologi” bagi negaranya pada tahun
- A. 1984
 - B. 1988
 - C. 1999
 - D. 2000
 - E. 2002
13. Berikut adalah contoh produk bioteknologi dalam bidang pertanian, *kecuali*
- A. inokulasi
 - B. tanaman gulma
 - C. pembacaan genom tanaman padi
 - D. tanaman tahan hama
 - E. diperoleh tanaman transgenik
14. Sifat-sifat unggul tanaman “transgenik” antara lain sebagai berikut, *kecuali*
- A. sudah pasti aman
 - B. tanaman menjadi besar
 - C. tanaman lebih kuat
 - D. kandungan vitaminnya banyak
15. Rekayasa genetika melibatkan penyisipan informasi genetika baru ke dalam organisme (yang biasanya adalah bakteri) untuk memberi kemampuan baru. Penerapan bioteknologi rekayasa genetika terdiri atas tahap-tahap berikut, *kecuali*
- A. memperoleh gen yang mengandung sifat yang akan diproduksi
 - B. menyisipkan gen ke dalam mikroba
 - C. melakukan fusi protoplasma
 - D. menginduksikan mikroba untuk mulai melakukan sintesis produk asing
 - E. mengumpulkan produk tersebut
16. Salah satu cara memperbanyak tanaman secara vegetatif dari berbagai bagian tanaman (pucuk, daun dan sebagainya) secara cepat adalah
- A. Kultur jaringan
 - B. Pengklonan gen
 - C. Teknologi DNA rekombinan
 - D. Teknologi hibrida
 - E. Pembuatan interferon

17. Pernyataan yang tidak benar tentang Antibodi monoklonal yaitu
- hanya mengenali antigen yang memiliki lekukan sama
 - dapat dipergunakan untuk mendeteksi adanya virus, bakteri, dan infeksi lain
 - dihasilkan sel B dari kelenjar limfa, darah, dan limfa
 - setiap antibodi dapat berkaitan dengan berbagai antigen
 - mempunyai kemampuan menghancurkan antigen
18. Berbagai aktivitas yang menggunakan kemampuan dasar organisme terutama mikroba atau sel yang diperoleh dari tanaman atau hewan merupakan Bioteknologi. Mikroba sering digunakan dalam kegiatan bioteknologi sebab hal-hal berikut, *kecuali*
- dapat ditemukan hampir di setiap tempat
 - mempunyai kemampuan dan daya tahan yang tinggi
 - mahluk ini dapat tumbuh dengan cepat
 - dapat dimanfaatkan untuk mengubah bahan mentah menjadi suatu produk yang mempunyai nilai tambah yang tinggi
 - mampu menimbulkan proses fermentasi bahan mentah
19. Jamur *Aspergillus oryzae* merupakan mikroorganisme yang digunakan dalam pembuatan
- | | |
|----------|---------|
| A. keju | D. tahu |
| B. kecap | E. tape |
| C. tempe | |
20. Suatu bahan tertentu yang dikeluarkan dari sel yang terinfeksi oleh virus, dan bahan tersebut membantu sel-sel lain untuk menolak pengaruh virus dengan memacu pembentukan antibodi disebut
- | | |
|---------------|-------------------|
| A. hibrida | D. DNA rekombinan |
| B. interferon | E. jaringan kalus |
| C. plasmid | |

B. Jawab pertanyaan berikut ini dengan benar.

- Jelaskan pengertian bioteknologi.
- Berilah contoh-contoh pemanfaatan bioteknologi dalam bidang farmasi.
- Menurut pendapatmu, “kloning” itu bermanfaat atau tidak bermanfaat? Jelaskan alasanmu.
- Mengapa “proyek genom” mikroba perlu dikembangkan?
- Jelaskan dampak negatif yang mungkin timbul dengan pengembangan transgenik.

Evaluasi Akhir Tahun

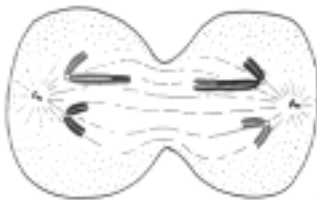
A. Pilih jawaban yang paling tepat.

- Dari hasil percobaan penanaman biji kacang, yang termasuk data kualitatif adalah . . .
 - tinggi kecambah
 - tumbuhnya daun pertama
 - mulai tumbuhnya akar
 - kotiledon mulai menyusut
 - ada tidaknya cahaya
- Pernyataan di bawah ini adalah tahap-tahap dari Metode Ilmiah . . .
 - Merumuskan masalah.
 - Membuat hipotesis.
 - Melaksanakan eksperimen.
 - Mengumpulkan data.Urutan yang benar untuk tahapan metode ilmiah adalah
 - 1 - 2 - 3 - 4
 - 2 - 3 - 4 - 1
 - 3 - 4 - 1 - 2
 - 4 - 1 - 2 - 1
 - 1 - 4 - 2 - 3
- Perlakuan suhu dingin merangsang untuk pembentukan bunga, peristiwa ini dinamakan . . .
 - Vernalisasi
 - Thermoperiodisme
 - Fototrofisme
 - Thermotrofisme
 - Thermonastik
- Apabila tumbuhan selama perkecambahan mengalami kekurangan cahaya, tumbuhan tersebut akan mengalami . . .
 - kekerdilan
 - klorosis
 - etiolasi
 - kematian
 - pembengkokan
- Tumbuhan yang hidup pada tempat tumbuhnya kekurangan unsur Fe dan Mg, akan mengalami klorosis yang berarti . . .
 - terhambat proses pertumbuhan
 - perkembangan yang terhambat
 - rendahnya kandungan klorofil
 - tidak mampu berfotosintesis
 - tidak mampu membentuk organ reproduksi

6. Hormon yang merangsang pembentukan pembuluh angkut floem dan xilem adalah
- A. Auksin
B. Giberelin
C. Sitokinin
D. Etilen
E. Asam absisat
7. Enzim merupakan sebuah senyawa
- A. karbohidrat
B. lemak
C. protein
D. asam inti
E. glikoprotein
8. Fungsi enzim dalam suatu reaksi biokimia adalah
- A. membuat reaksi kimia kembali ke semula
B. mengubah laju reaksi kimia
C. mengendalikan keseimbangan reaksi
D. mengubah arah reaksi
E. meningkatkan energi aktivasi reaksi
9. Manakah dari pernyataan berikut ini termasuk reaksi katabolisme
- A. penyusunan protein dari bahan asam-asam amino
B. $ADP + \text{Phosfat} + \text{Energy} \rightarrow ATP + H_2O$
C. $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{energi}$
D. $6CO_2 + 12H_2O + \text{energi} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$
E. pemecahan molekul air oleh energi cahaya
10. Molekul gula ditulis
- A. $C_3H_6O_3$
B. C_3H_5OH
C. $C_6H_{10}O_5$
D. CH_4
E. $C_6H_{12}O_6$
11. Pengertian anaerobik, yaitu
- A. dengan glukosa
B. dengan oksigen
C. tanpa gula
D. tanpa oksigen
E. tanpa gula dan oksigen
12. Tahap berikut yang menggunakan oksigen secara langsung adalah
- A. glikolisis
B. fermentasi
C. siklus Krebs
D. transpor elektron
E. siklus asam sitrat

13. Jika manusia tidak menimbulkan polusi, kadar CO_2 di atmosfer relatif stabil karena
- pada organisme fotoautotrof, laju fotosintesis seimbang dengan laju respirasi sel
 - pada tumbuhan, fotosintesis berlangsung siang hari, respirasi sel berlangsung malam hari
 - selama berlangsung fotosintesis, CO_2 dimanfaatkan, O_2 dibebaskan
 - laju fotosintesis organisme fotoautotrof seimbang dengan laju respirasi sel seluruh organisme
 - tumbuhan hanya memerlukan CO_2 , sedangkan hewan dan manusia hanya memerlukan O_2
14. Terbentuknya NADPH pada kloroplas terjadi selama
- fotofosforilasi siklik
 - fotofosforilasi nonsiklik
 - seluruh rangkaian fotofosforilasi
 - hari mendung
 - aktivitas fotosistem I

15. Gambar berikut ini merupakan tahap meiosis yang diberi nama



- Prophase 1
- Metafase 2
- Anaphase 1
- Telophase 2
- Telophase 1

16. Suatu tempat terjadinya *crossing over* antara kromosom homolog disebut
- chiasmata
 - sentromer
 - kompleks sinapsis
 - interkinesis
 - sinapsis
17. Berapa macam gamet yang dihasilkan dari individu dengan genotipe Aa BB Cc ?
- 3
 - 4
 - 6
 - 9
 - 16

Untuk soal nomor 18 dan 19 bacalah wacana berikut:

Tanaman galur murni dengan sifat tinggi (TT) berbuah bundar (BB) disilangkan dengan tanaman galur murni pendek (tt) berbuah keriput (bb), terbentuklah F_1 . Jika F_1 disilangkan sesamanya.

18. Berapa jumlah genotipe yang terbentuk pada F_2 ?
 - A. 32
 - B. 16
 - C. 9
 - D. 6
 - E. 4

19. Berapa peluang terbentuknya F_2 dengan sifat pendek berbuah keriput?
 - A. 0
 - B. $\frac{1}{4}$
 - C. $\frac{1}{2}$
 - D. $\frac{1}{16}$
 - E. $\frac{9}{16}$

20. Anak dengan golongan darah bergenotipe $I^A I^B$ dilahirkan dari ibu bergenotipe $I^B I^B$. Ayahnya tidak mungkin bergenotipe
 - A. $I^O I^O$
 - B. $I^A I^A$
 - C. $I^A I^B$
 - D. $I^A I^O$
 - E. $I^B I^O$ atau $I^A I^O$

21. Kelainan pada manusia dikarenakan sel somatiknya mengandung kromosom seks XXY disebut
 - A. Super
 - B. Supermale
 - C. Down's
 - D. Turner
 - E. Klinefelter

22. Ayah Sari mempunyai gen hemofili, tetapi suami Sari tidak memiliki gen hemofili. Bagaimana kemungkinan hemofili pada anak laki-laknya?
 - A. 0%
 - B. 25%
 - C. 50%
 - D. 75%
 - E. 100%

23. Sindrom Down merupakan kelainan manusia, sebagai contoh
 - A. aneuploidi
 - B. monoploidi
 - C. poliploidi
 - D. ploidi
 - E. politen

24. Patahnya segmen kromosom pada suatu individu disebut
 - A. delesi
 - B. duplikasi
 - C. translokasi
 - D. inversi
 - E. insersi

25. Menurut pendapat Lamarck, jerapah memiliki leher panjang disebabkan
- sang Kreator mendesain demikian
 - bencana alam telah mengurangi populasi jerapah berleher pendek
 - moyang berleher pendek sering menjulurkan leher untuk menggapai makanan
 - keturunan berleher panjang mewariskan keturunan yang lebih survive
 - perubahan leher pendek ke leher panjang dapat diwariskan
26. Darwin yakin bahwa jerapah berleher panjang karena
- sang Kreator mendesain demikian
 - bencana alam telah mengurangi populasi jerapah leher pendek
 - moyang berleher pendek sering menjulurkan leher untuk menggapai makanan
 - keturunan berleher panjang mewariskan keturunan yang lebih survive
 - perubahan leher pendek ke leher panjang dapat diwariskan
27. Pada umumnya fosil ditemukan di dalam
- granit
 - batuan sedimen
 - aliran lava
 - getah tanaman
 - tanah hitam
28. Sayap burung dan tungkai depan kuda merupakan
- struktur analog
 - struktur homolog
 - struktur vestigial
 - struktur filogenetik
 - struktur rudimenter
29. Uji terbaik untuk menunjukkan kekerabatan antardua spesies adalah dengan menguji
- anatomi
 - DNA dan protein
 - perkembangan embrio
 - tingkah laku
 - darah

Untuk soal nomor 30 dan 31 perhatikan wacana berikut:

Terdapat 100 ekor keong di suatu populasi, dengan warna diatur oleh dua macam alel: hitam (H) dan kuning (h).

30. Berapa jumlah keseluruhan lokus yang menyimpan gen warna?
- 2
 - 30
 - 60
 - 100
 - 200

31. Keong berwarna kuning 20 ekor (bb) dan 80 ekor berwarna hitam (BB atau Bb). Dari 80 ekor keong hitam, 30 ekor homozigot dan 50 ekor heterozigot. Berapa jumlah lokus untuk alel B? . . .
- A. 40
B. 80
C. 90
D. 100
E. 110
32. Pada teori Intelligent Design, diyakini bahwa perubahan struktur makhluk hidup diatur oleh . . .
- A. perubahan bumi
B. pewarisan gen yang tidak konsisten
C. gen yang bisa mengalami mutasi
D. daya adaptasi makhluk hidup
E. Tuhan Yang Maha Kuasa
33. Jamur *Aspergillus oryzae* merupakan mikroorganisme yang digunakan dalam pembuatan . . .
- A. keju
B. kecap
C. sake
D. tempe
E. tape
34. Bakteri *Bacillus thuringensis* dimanfaatkan untuk pemberantasan hama karena . . .
- A. mampu menghasilkan suatu protein kristal yang bersifat racun
B. sebagai predator biologi karena bersifat omnivor
C. memiliki kromosom yang berbentuk lingkaran
D. memiliki kemampuan berkembang biak yang sangat pesat
E. memiliki daya tahan tubuh yang tinggi
35. Penerapan bioteknologi rekayasa genetika terdiri atas tahap sebagai berikut:
1. menginduksi mikroba untuk melakukan sintesis produk asing
 2. menyisipkan gen tersebut ke dalam bakteri
 3. mengumpulkan produk dari gen yang dikembangkan
 4. mengidentifikasi gen atau DNA dari organisme yang diinginkan
- Urutan tahapan yang benar adalah . . .
- A. 1 – 2 – 3 – 4
B. 3 – 2 – 1 – 4
C. 4 – 2 – 1 – 3
D. 3 – 1 – 2 – 4
E. 4 – 3 – 2 – 1

36. Suatu bahan tertentu yang dikeluarkan dari sel yang terinfeksi oleh virus, dan bahan tersebut membantu sel-sel lain untuk menolak pengaruh virus dengan memacu pembentukan antibodi disebut
- A. hibridoma
 - B. interferon
 - C. plasmid
 - D. DNA rekombinan
 - E. jaringan kolus
37. Mikroorganisme berikut yang digunakan sebagai PST bagi makanan tambahan hewan adalah
- A. *Cellulomonas* sp dan *Chlorella*
 - B. *Methalomonas* sp dan *Cellumonas*
 - C. *Tricoderma viride* dan *Spirullina*
 - D. *Spirullina* dan *Chlorella*
 - E. *Candida Utilis* dan *Cellumonas*
38. Keju setengah lunak atau hijau biru di dalam proses pembuatannya dibantu oleh
- A. *Penicillium roqueforti*
 - B. *Propioni bacterium*
 - C. *Rhyzopus oryzae*
 - D. *Aspergillus wentii*
 - E. *Lactobacillus casei*
39. Salah satu cara memperbanyak tanaman secara vegetatif dari berbagai bagian tanaman secara cepat adalah
- A. kultur jaringan
 - B. fusi protoplas
 - C. teknologi hibridoma
 - D. pembuatan interferon
 - E. teknologi DNA rekombinan
40. Melalui fusi protoplas, protoplas dari spesies yang berbeda dapat di induksi agar melebur dan membentuk
- A. DNA rekombinan
 - B. plasmid
 - C. interferon
 - D. antibodi
 - E. hibridoma

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan benar.

41. Buatlah suatu rumusan masalah dari dunia kesehatan
42. Tuliskan berbagai keuntungan semaksimal mungkin dari kemampuan tumbuhan melakukan fotosintesis.
43. Ibu bergolongan B rhesus positif mempunyai suami bergolongan darah AB rhesus negatif. Tentukan genotipe dan fenotipe kemungkinan anak-anaknya.
44. Jelaskan pendapat Urey dan Oparin yang berkaitan dengan terjadinya evolusi.
45. Tuliskan 5 dampak negatif berkembangnya Bioteknologi modern.

GLOSARIUM

A

- Active site*, 37
area kecil pada enzim yang merupakan tempat melekatnya substrat.
- Albinisme, 140, 159
suatu keadaan tubuh seseorang tidak mampu membentuk enzim pengubah tirosin menjadi pigmen melanin.
- Alel, 79, 81, 105, 106, 111, 131, 148, 172, 214
pasangan gen yang berada pada lokus yang sama pada kromosom homolog.
- Alel ganda, 81
satu karakter/sifat yang memiliki beberapa alel.
- Antikodon, 76, 88, 90
urutan nukleotida (basa nitrogen) pada RNA transfer.
- Antibiotik, 233, 238
substansi kimia yang dihasilkan dari proses mikroorganisme, berperan dalam menghambat penyebaran mikroorganisme lainnya, khususnya bakteri; merupakan obat bagi penderita yang tubuhnya sudah tidak mampu melawan serangan kuman.
- Anabolisme, 55, 56, 64
peristiwa penyusunan atau sintesis dari molekul sederhana menjadi kompleks.
- Aneuploid, 161
keadaan bila jumlah kromosom suatu individu tidak merupakan kelipatan tepat perangkat haploid jenisnya atau angka dasar genomnya.
- Auksanometer, 11
alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan tumbuh tumbuhan.
- Auksin, 20, 21, 23, 24, 27
hormon tumbuhan untuk memacu perpanjangan sel.

B

- Biokatalisator, 36, 64
katalisator biologis, yaitu enzim.
- Bioteknologi, 229-266
usaha terpadu dari berbagai disiplin ilmu pengetahuan, untuk mengolah bahan baku oleh mikroba, sel atau komponen subselulernya yang diperoleh dari tanaman atau hewan tanpa menyertakan aktivitas yang melibatkan keseluruhan tanaman atau hewan sehingga menjadi produk baru atau jasa.
- Brakidaktili, 143
jari-jari tangan atau kaki pendek-pendek (lebih pendek dari normal).
- Buta warna, 146
penyakit genetis, tidak dapat membedakan warna.

GLOSARIUM

C

Carrier, 145 pembawa (individu heterozigot) yang membawa sifat resesif.

D

Delesi, 157, 160 mutasi karena pengurangan satu atau lebih pasangan basa nitrogen.

Diploid, 86, 95, 254 sel yang memiliki 2 set kromosom.

Dominan, 82, 104, 108, 110, sifat yang menang, lambang gennya menggunakan huruf kapital.

Duplikasi, 160 penambahan patahan segmen kromosom pada kromosom normal sehingga suatu bagian kromosom terdapat lebih dari satu.

E

Energi aktivasi, 36 energi yang digunakan untuk memulai reaksi kimia.

Enzim, 17, 18, 35, 37, 76, 87, 156, 171, 219, 233, senyawa kimia yang berfungsi sebagai biokatalisator.

Etilen, 20, 24, 27 regulator pertumbuhan.

Etiolasi, 25 pertumbuhan yang cepat dalam keadaan gelap.

Erytroblastosis fetalis, 152, keadaan eritrosit belum dewasa dan dapat menimbulkan kematian.

153

Evolusi, 155, 191-228, 254 perubahan (pertumbuhan, perkembangan) secara berangsur-angsur dan dalam kurun waktu jutaan bahkan miliaran tahun.

Evolusi kimia, 218 suatu teori yang menjelaskan bahwa kehidupan berawal dari serangkaian reaksi-reaksi kimia. Zat-zat anorganik menjadi zat-zat organik.

F

Fosil, 200, 204, 206, 217, 224, 243 sisa tulang-belulang binatang atau sisa tumbuhan zaman purba yang telah membatu dan tertanam di bawah lapisan tanah.

Fotoperiodisme, 25 tanggapan suatu tumbuhan terhadap panjang pendeknya hari.

Fotosistem, 52 sistem penangkapan cahaya matahari (foton).

GLOSARIUM

G

- Gen, 69, 78, 135, 214 faktor pembawa sifat.
Gen ganda, 80 satu sifat/karakter yang ditentukan oleh beberapa gen.
- Genom, 86, 162, 163, 252 perangkat (set) kromosom.
- Giberelin, 20, 22-24, 26, 27 hormon tumbuhan yang berpengaruh pada pembelahan dan pemanjangan sel.
- Glikolisis, 45, 47, 56, 57 penguraian gula (glukosa) menjadi asam piruvat yang terjadi pada sitoplasma (tahapan respirasi).

H

- Hemofili, 144, 145 suatu penyakit menurun, yaitu darah sukar membeku.
- Hipostasis, 110, 114 sifat/fenotipe yang ditutupi sifat yang lain.
- Hypertichosis, 147 suatu keadaan daun telinga ditumbuhi rambut, hanya diderita laki-laki.
- Heterozigot, 104, 141, 142, 150, 154 genotipe yang tersusun atas gen dominan dan gen resesif.
- Homologi, 297, 208, 209, 224 bagian tubuh yang struktur dasar dan asal filogeniknya sama walaupun fungsinya dapat berlainan.
- Homozigot, 105, 108, 112, 115, 128, 135, 141, 150 genotipe yang tersusun atas gen dominan saja atau gen resesif saja.

I

- Interferon, 242 suatu bahan, dikeluarkan dari sel yang terinfeksi oleh virus, dan bahan tersebut membantu sel-sel lain untuk menolak pengaruh virus dengan memacu pembentukan antibodi.
- Intermediet, 106 sifat yang sama kuat sehingga fenotipe merupakan gabungan kedua sifat tersebut.

K

- Karboksilasi, 53 penambahan CO₂ pada suatu molekul.
- Katabolisme, 35, 40, 48, 55, 56 peristiwa penguraian dari molekul kompleks menjadi sederhana.
- Klon, 260 populasi sel yang diturunkan dari satu sel induk asal, yang semuanya memiliki susunan genetika yang sama.

GLOSARIUM

Kodon, 76, 90, 173	urutan basa nitrogen pada RNA duta yang mengandung arti khusus.
Koenzim, 37, 39, 62	salah satu kofaktor enzim yang merupakan turunan asam nikotinat.
Kofaktor, 18, 37	suatu komponen bukan protein yang membantu aktivitas enzim.
Komplemen, 173	pasangan yang sesuai.
Kriptomeri, 110, 111	faktor tersembunyi yang fenotipenya akan muncul jika disilangkan dengan genotipe dominan.
Kromatid, 93, 97, 98, 124	lengan-lengan kromosom setelah kromosom menggandakan diri (duplikasi), tiap lengan kromosom terikat pada sentromer.
Kromomer, 85	dinamakan juga lokus, yaitu bagian dari kromonema yang mengandung gen.
Kromosom, 79, 83, 97, 103, 106, 162, 174	benang-benang kromatin yang menebal dan memendek pada saat sel mengalami pembelahan, mengandung gen (pembawa sifat).
Kultur jaringan, 234, 235, 251, 262	merupakan salah satu cara memperbanyak tanaman secara vegetatif dari berbagai bagian tanaman (pucuk, daun dan sebagainya) secara cepat.

L

Letal (gen letal), 135, 143	gen penyebab kematian.
Lokus, 78, 79, 881, 85, 124	letak gen dalam kromosom.

M

Mitosis, 69, 92, 95, 101, 161	pembelahan sel secara tidak langsung, melalui tahap; profase, metafase, anafase, telofase, dan terjadi pada sel tubuh (sel somatis).
Mutan, 78, 156, 212	individu yang mengalami mutasi.
Mutagen, 166, 170	faktor-faktor yang dapat menyebabkan mutasi.
Mutasi, 155-157, 166, 170, 172, 211-213, 222, 224	merupakan suatu kegiatan merakit keanekaragaman genetika, tetapi melalui perubahan struktur kimia materi genetika hingga diperoleh sifat-sifat genetik baru sesuai dengan yang diharapkan. Perubahan dapat dilakukan melalui radiasi atau menggunakan zat-zat kimia tertentu.

GLOSARIUM

- Mutasi gen, 156, 159, 174 perubahan pada materi hereditas pada satu atau beberapa nukleotida.
- Mutasi kromosom, 156, 159, 174 perubahan yang meliputi struktur atau jumlah kromosom.

P

- Plasmid, 171, 236, 237 lingkaran DNA yang berukuran lebih kecil dan mempunyai kemampuan untuk keluar masuk dari sel ke sel lainnya, bahkan pada sel yang spesiesnya berbeda; molekul yang dapat diturunkan secara stabil tanpa dikaitkan pada kromosom.
- Polidaktili, 142 jari-jari tangan atau jari-jari kaki lebih dari lima.
- Polimorfik, 214 suatu spesies yang tampak berbeda jenis, tetapi merupakan satu spesies, mereka dapat kawin dan menghasilkan keturunan yang fertil.
- Poliploid, 162, 163, 171 pelipatgandaan set kromosom.
- Protein sel tunggal, 61, 62, 243, 244 mikroorganisme yang digunakan sebagai bahan pangan, yang memiliki kadar protein tinggi ($\pm 80\%$) jika dibanding dengan protein kedelai (45%) dan protein ragi (50%)

R

- Reaksi eksergonik, 55 reaksi yang menghasilkan energi.
- Reaksi endergonik, 56 reaksi yang membutuhkan energi.
- Rekayasa genetika, 171, 233, 234, 236, 241, 247, 257, 258 suatu proses memanipulasi DNA (materi genetika) dengan melakukan perubahan melalui berbagai cara, salah satunya adalah dengan penyisipan sehingga terbentuk DNA rekombinan.
- Rekombinasi, 122 sifat anak gabungan dari kedua induknya (sifat baru).
- Replikasi, 74 proses penggandaan protein DNA yang terjadi pada saat interfase.
- Respirasi aerob, 41, 43 respirasi yang terjadi dengan adanya oksigen.
- Respirasi anaerob, 41, 46, respirasi yang terjadi tanpa adanya oksigen.
- Rudimentasi, 209 anggota tubuh yang tidak sempurna atau tidak berfungsi lagi.

GLOSARIUM

S

- Sentromer, 84, 93, 94 bagian kromosom yang berfungsi sebagai tempat perlekatan kromatid juga untuk perlekatan pada spindel.
- Siklus Krebs, 41, 43, 46, 57 dinamakan juga siklus asam sitrat merupakan tahapan respirasi yang terjadi dalam mitokondria.
- Siklus Calvin, 53, 54 dinamakan juga reaksi gelap merupakan tahapan fotosintesis terjadi pengikatan CO_2 dan H_2O , menghasilkan glukosa.
- Sindaktili, 143 jari-jari tangan atau kaki saling berdekatan.
- Stroma, 50, 53 cairan yang berada di dalam kloroplas.

T

- Tautan, 119, 121, 123, 173 beberapa gen terdapat dalam satu kromosom.
- Tilakoid, 50, 51 penjuluran membran sel ke arah dalam pada kloroplas.
- Totipoten, 234 sel yang memiliki kemampuan berdiferensiasi dan mengandung semua informasi genetika tanpa kehilangan informasi genetika selama berdiferensiasi, artinya berpotensi penuh untuk menjadi individu utuh identik dengan individu yang kita inginkan. Sel yang demikian dapat diperoleh dari jaringan kalus (jaringan yang terbentuk jika bagian tanaman mengalami kerusakan atau luka).
- Transkripsi, 88 proses penyalinan DNA menjadi RNA duta.
- Translasi, 88 peristiwa penerjemahan kodon menjadi asam amino pada proses sintesis protein.
- Translokasi, 160 pindahnya potongan segmen kromosom yang satu ke potongan kromosom lain yang bukan homolognya.

V

- Vaksin, 238, 241, 248 bibit penyakit yang telah dilemahkan. Secara tradisional vaksin dibuat dari virus yang digunakan untuk mencegah beberapa penyakit infeksi yang disebabkan oleh mikroorganisme.

DAFTAR PUSTAKA

- Arms, Karen. 1988. *Biology of Journey Into Life*. New York: Saunder College.
- Baker, Jeffrey J.W. & G.E. Allen. 1982. *The Study of Biology*, Fourth Edition. Philipines. Addison-Wesley Company, Inc.
- Barret, James M, dkk. 1985. *Biology*. London: Prentice-Hall International (UK) Limited.
- Basuki, Triadi, dkk. 1985. *Kamus Istilah Biologi untuk Pelajar*. Jakarta: Pusat Pembinaan dan Pengembangan Bahasa, Depdikbud.
- Becker, Wayne M. 1991. *The World of The Cell*, Second Edition. California: Cummungs Publishing Company.
- Beckett, BS. 1988. *Beginning Science Biology*. London: Oxford University Press.
- Campbell, Neil A, dkk. 2002. *Biologi Jilid 1, 2, dan 3*. Jakarta: Erlangga.
- Donald, Ritchie D. 1983. *Biology*, Second Edition. Addison - Wesley Publishing Company, Inc.
- Dwijoseputro. 1977. *Pengantar Genetika*. Jakarta: Bharata.
- Elseth, G.D. & Kandy B. Baumgardner. 1984. *Genetics*. Canada: Addison Wesley Publishing Company.
- Gardner, E.J., Simmons, M.J. & Snunstad, D.P. 1991. *Principles of Genetics*. Eighth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Green, N.P.O., G.W. Stout, D.J.Taylor. 1986. *Biological Science, Organism, Energy, and Enviroment*. Fourth Edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- Henderson, J & Stephen Knutton. 1990. *Biotechnology in School*. A Hand Book for Teachers. Milton Keynes-Philadelphia: Open University Press.
- Herkowits, Irwin H. 1962. *Genetics*, Second Edition. University of New York.
- Hopson, J.L. & N.K. Wessells. 1990. *Essentials of Biology*. New York: McGraw-Hill Publishing Company.
- Kimball, J.W. 1983. *Biologi*. Jilid 1 terjemahan H. Siti Soetarmi Tjitrosomo & Nawangsari Sugiri. Jakarta: Erlangga.
- Kusmaji, Drs. M.Sc. 1985. *Genetika Lanjutan*. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Mix, M.C., Farber, P. and King, K.L. 1992. *Biology: The network of life*. New York: Harper Collins Publishers.
- Nason, Alvin. 1965. *Textbook of Biology*. New York: John Willey & Sons, Inc.
- Pai, Anna C. 1978. *Dasar-Dasar Genetika*, edisi ke-2. Jakarta: Erlangga.
- Paul, John. 1970. *Cell Biology*, Second Edition.

DAFTAR PUSTAKA

- Parker, Gary, Ann W Reynold, & Rex Reynold. 1987. *Heredity*, Second Edition. Chicago: Educational Methods.
- Pelczar, M.J. & E.C.S. Chan. 1988. *Dasar-Dasar Mikrobiologi*. Terjemahan Ratna Siri Hadioetomo, dkk. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
- Peter, Raven H., Johnson B. George. 1986. *Biology, Time Mirror*. Mosby College Publishing.
- Postlethwait, John H. & Janet L Hopson. 1995. *The Nature of Life*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Prentis, Steve. 1990. *Bioteknologi: Suatu Revolusi Industri yang Baru*. Alih bahasa oleh Dr. Ir. Maggy Thenawidjaya. Jakarta; Penerbit Erlangga.
- Redaksi Ensiklopedia Indonesia. 1991. *Ensiklopedia Indonesia*, jilid 3, edisi khusus Ihtiar baru - Van Hoeve.
- Rifai, Mien A. 2004. *Kamus Biologi*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Salisbury, Frank B. & Cleon W Rosy. 1995. *Fisiologi Tumbuhan Jilid I Edisi 5*. Bandung: Penerbit ITB.
- Sardjoko, 1991. *Bioteknologi: Latar Belakang dan Penerapannya*. Jakarta: Gramedia.
- Starr, Cecie & Ralph Taggart. 2004. *Biology: The Unity and Diversity of Life*. Australia: Thompson Brooks/Cole.
- Taiz, L & Zeiger E. 1998. *Plant Physiology*. Second Edition. Sunderland USA: Sinauer Associates, Inc.
- Tortorn, Gerard J. & Sandra R Grabowski. 2003. *Principles of Anatomy and Physiology Seventh Edition*. Harper Collins College Publisher.
- Williams, Gareth. 1996. *Biology for You*. London: Stanley Thornes Ltd.
- Whitten, Tony. 2002. *Indonesia Heritage: Margasatwa (terjemahan)*. Jakarta: Buku Antar-Bangsa.
- Yahya, Harun. 2002. *Menyingkap Rahasia Alam Semesta*. Bandung: Dzikra.

INDEKS

A

Absorpsi, 51
Active site, 37
Adaptasi, 195-197, 202, 215
Aglutinogen, 83
Ahli: anatomi, 194; embriologi, 69, 83; genetika, 83; geologi, 202
Akrosentris, 85
Albinisme, 140, 159
Alel: 79, 81, 105, 106, 111, 131, 148, 172, 214; ganda, 81
Anabolisme: 55, 56, 64; karbohidrat, 48
Anaerob: fakultatif, 47; obligat, 47
Anafase, 92, 94, 97, 98, 106
Analog, 208
Anatomi, 202, 205
Aneuploid, 161
Aneusomi, 161, 163
Anodontia, 147
Anorganik, 232
Antibiotik, 233, 238
Antibodi: 83, 150, 152, 238, 239, 240, 241; monoklonal, 238, 240
Antigen, 148, 150, 151, 239, 241
Antikodon, 76, 88, 90
Antiserum, 150
Apikal dominan, 21- 23
Aristoteles, 222
Arkeologi, 205
Asam glutamat, 158
Aspartam, 58
Atrofi, 209
Auksanometer, 11
Auksin, 20, 21, 23, 24, 27
Autosom, 85, 126, 128, 129, 134, 140, 142, 166, 174

B

Bateson, William, 112
Beadle, G.W., 87
Beche, Michael J., 223
Bernstein, 148
Bilirubin, 144, 153
Biofisika, 232
Biokatalisator, 36, 64
Bioteknologi: 229-266; konvensional, 232, 233; modern, 232, 233, 234, 257; mutakhir, 233
Blastula, 210
Brakidaktili, 143
Bridges, Calvin B., 132
Bull, 232
Buta warna: 146; partial, 146; total, 146

C

Carrier, 145
Cholodny, 21
Clung, Mc, 126
Colling, G.N., 122
Crick, Francis H.C., 70, 71
Cuvier, Georges, 194

D

Darwin, Charles, 196, 204, 213, 223
Daur: Krebs, 56; Nitrogen, 55
Davenport, 80, 116
De Vries, Hugo, 212
Dekarboksilasi oksidatif, 43
Delesi, 157, 160
Determinasi seks, 126
Diakinesis, 97

INDEKS

Diferensiasi, 14, 20
Dihybrid, 104, 106
Diploid, 86, 95, 254
Direfosforilasi, 38
Dominan, 82, 104, 108, 110, 111, 117,
118, 143
Dormansi, 26
Down, J.L., 134, 166
Duktus, 100
Duplikasi, 160
Dwarfisme, 133

E

East, E.M., 110, 116
Ekosistem, 208
Eksperimen, 5
Elektron carriers, 44
Embrio, 210, 224
Embriologi, 211
Emerson, R.A., 116
Energi; 243; aktivasi, 36
Enzim: 17, 18, 35-37, 76, 87, 156, 171,
219, 233, 238, ligase, 237;
restriksi, 237; sitokrom, 19
Enzimatis, 53
Epidermis, 14, 16
Epiglotis, 161
Epistasis, 115
Eritromisin, 238
Eritrosit, 135, 152, 153
Erytroblastosis fetalis, 152, 153
Etilen, 20, 24, 27
Etiolasi, 25
Evolusi: 155, 191-228; 254; biologi,
193, 199, 201, 202, 206, 213, 221;
kimia, 218; kuda, 218

F

Felerm, 16
Feloderm, 16
Felogen, 16
Fenilalanin, 90
Fenotipe, 82, 83, 108, 111, 113, 118,
129, 132, 148, 150, 152, 156, 216
Fermentasi: 234, 238, 243, 245;
alkohol, 48; asam laktat, 47;
makanan, 233
Fertil, 212, 213
Fertilisasi: 103, 161, 163, 202, 214, 215,
224; invitro, 250
Fetus, 152
Filogeni, 210
Fisiologi, 205
Fitohormon, 20-22
Fitokalin, 24
Flavoprotein, 44
Florigen, 24
Fosil, 200, 204, 206, 217, 224, 243
Fotofosforilasi, 52
Fotoperiodisme, 25
Fotosintesis, 19, 48-50, 64
Fotosistem, 52
Fototropisme, 21
Furuhata, 148

G

Gamet, 85, 92, 98, 102, 104, 107, 122,
123, 164
Gametogenesis, 98
Gasohol, 243
Gastrula, 208, 210
Gen: 69, 78, 79, 81, 83, 84, 104, 111,
117, 119, 122, 135, 171, 172, 202,

INDEKS

- 211-213, 236, 247, 248, 252, 262;
dominan, 214; ganda, 80;
holondrik, 147; letal, 135, 174;
pool, 213; resesif, 147, 148, 158,
214; subletal, 135
- Genetika: 136, 232; molekuler, 252
- Genom: 86, 162, 163, 252; manusia,
252; mikroba, 253; padi, 254
- Genomika: 252; fungsi, 252; struktur,
252
- Genotipe, 80, 82, 105, 108, 117, 118,
123, 124, 132, 141, 146, 150, 152,
174, 214, 216
- Geotropisme, 21
- Giberelin, 20, 22-24, 26, 27
- Glikolisis, 41, 47, 56, 57
- Globulin, 144
- Gonosom, 174
- Gulma, 257
- ### H
- Haploid, 95, 96, 101, 102
- Hardy, Goldrey, 214, 224
- Hayes, H.K., 110
- Hemofili, 144, 145
- Hemoglobin, 158
- Hereditas, 17, 27, 67-190
- Heteroauksin, 20, 21
- Heterogametik, 138
- Heterozigot, 104, 141, 142, 150, 154
- Hibridoma, 241
- Hidrolisis, 38, 57
- Hidroponik, 19
- Higgins, 232
- Hipostasis, 110
- Hipotesis: 3, 4; alternatif, 4; nol, 4
- Homolog, 81
- Homologi, 207, 208, 209, 224
- Homozigot, 105, 108, 112, 115, 128,
135, 141, 142, 150
- Hormon: 17, 18, 20, 25, 234, 238;
fitokrom, 25; insulin, 171, 172
- Hukum: Hardy Weinberg, 214, 216;
Mendel, 104, 109, 110, 113, 119,
121, 124, 173
- Hutton, James, 194
- Hypertrichosis, 147
- ### I
- Ikatan fosfodiester, 73
- Ilmu genetika, 247
- Imunoglobulin, 239
- Indriadi, Reza, 257
- Induksi poliploid, 163
- Industri: farmasi, 233; kima, 233, 238
- Infertilitas, 260
- Inseri, 157
- Insulin, 236
- Interaksi gen, 110
- Interfase, 96
- Interferon, 242
- Intermediet, 106
- Inversi, 160
- Invitro, 260
- Iradiasi, 59, 60, 167-169
- Isaacs, Alick, 241
- Isoaglutinogen, 83
- Isolasi gen, 247
- ### J
- Jacobs, P.A., 165
- Johansen, W., 78

INDEKS

K

Kalin, 24
Kaliptra, 12
Kant, 218
Kantung embrio, 102
Karboksilasi, 53
Kariotipe, 127
Karoten, 50
Karotenoid, 49
Katabolisme, 35, 40, 48, 55, 56
Katalase, 19
Katalis biologis, 36
Katalisator, 232
Katastropi, 194
Kaulokalin, 24
Keanekaragaman hayati, 196
Kemosintesis, 55, 64
Kemton, J.H., 122
Kinetin, 24
Klinefelter, H.H., 133, 165
Klon: hewan, 260; manusia, 260
Kloning, 231, 241, 248, 260
Klorofil, 18, 19, 49, 50, 511, 521, 53
Kloroplas, 50, 51, 64
Klorosis, 19
Kode genetika, 87, 90, 173, 247
Kodon, 76, 90, 173
Koenzim, 37, 39, 62
Kofaktor, 18, 37
Kohler, George, 240
Koleoptil, 20
Komplemen, 173
Komplementer, 110
Korteks, 14
Kotiledon, 7
Krebs, Hans, 43
Kriptomeri, 110, 111
Kriptos, 111, 112

Kromatid, 93, 97, 98, 124
Kromatin, 69
Kromomer, 85
Kromonema, 78, 84
Kromosom: 69, 78, 79, 81, 83-85, 92-95, 97, 103, 106, 121, 122, 124, 126, 131, 133, 134, 138, 156, 159, 160, 161, 163, 166, 171, 172, 224, 247; homolog, 79, 82, 123, 162, 172; seks, 83, 85, 127-130, 140, 174
Kultur jaringan, 234, 235, 251, 262
Kurasawa, F., 23
Kusick, V.A. Mc. 131

L

Lamarck, Jean Baptiste, 194, 195, 223
Landsteiner, Karl, 83, 136, 148, 150-152
Laplace, 218
Lenti sel, 16
Leptoten, 97
Letal, 143, 145
Leukosit, 144
Levine, 150
Lindenmann, Jean, 241
Linkage, 121
Linnaeus, Carolus, 194, 197, 213
Lokus, 78, 79, 81, 85, 124
Lyell, Charles, 194

M

Makanan suplemen, 61, 62
Matthaei, J.H., 90
Megaspora, 102
Megasporosit, 102

INDEKS

- Meiosis, 69, 92, 95-97, 100, 102, 104, 121, 122, 123, 127, 132, 161
- Membran: inti, 97; nukleus, 93, 94, 98; plasma, 19, 92
- Mendel, 104, 120, 121, 129, 173
- Meristem, 20
- Metabolisme: 17, 33-66, 79; karbohidrat, 56, 57; lemak, 56; protein, 56; sel, 39
- Metafase, 92, 94, 97, 98
- Metan, 243
- Metasentris, 85
- Metode penelitian, 4
- Mikroba, 59, 60, 238, 244; patogen, 168
- Mikrobiologi, 232
- Mikroorganisme, 231, 238, 243
- Mikroskop elektron, 84
- Mikrotubula, 100
- Miller, Stanley, 220, 224
- Milstein, Cesar, 240
- Mitokondria, 43, 100
- Mitosis, 69, 92, 95, 101, 161
- Monohibrid, 104, 114
- Monoploid, 162
- Monosomik, 164
- Morfologi, 200, 202, 205, 213
- Morgan, Thomas Hunt, 69, 83, 119, 120, 122, 129, 130, 156
- Mortalitas, 163
- Morula, 210
- Muir, 22
- Muller, Herman J., 170
- Multiseluler, 193
- Multivitamin, 61, 62
- Mutagen: 166, 170; biologi, 167; fisika, 167; kimia, 167
- Mutan, 78, 156, 212
- Mutasi: 155-157, 166, 170, 172, 211-213, 222, 224; alami, 170, 174, 223; buatan, 170, 174; gen, 156, 159, 174; germinal, 156; induksi, 167, 171; kromosom, 156, 159, 174; somatik, 156

N

- Nilson-Ehle, H., 116
- Nirenberg, M.W., 90
- Nukleolus, 93
- Nukleoprotein, 69
- Nukleotida, 72, 73, 173, 214, 255
- Nullisomik, 164
- Nutrien, 19
- Nutrisi, 17, 27, 38, 250, 253

O

- Observasi, 3, 4
- Ontogeni, 210
- Oogenesis, 98, 101
- Oparin, Alexander Ivanovich, 219, 220, 224
- Organisme: 193, 196, 202, 211; kemosintetik, 55

P

- Pakiten, 97
- Paleontologi, 205
- Pankreas, 172
- Partenokarpi, 21, 22
- Pasangan homolog, 78
- Pembelahan: meiosis, 124; mitosis, 92, 93

INDEKS

Pengklonan gen, 237
Penisilin, 238
Penyilangan konvensional, 246
Percobaan Pertumbuhan, 1-32
Persilangan: dihibrid, 106, 108;
monohibrid, 105
Pertumbuhan: primer, 14, 15;
sekunder, 14, 15, 17
Peta: genetika, 254; kromosom, 124
Pewarisan sifat, 137
Pigmen, 50, 51
Pindah silang, 119, 122
Plasenta, 152
Plasma sel, 79
Plasmid, 171, 236, 237
Ploidi, 86
Pluripotensi, 242
Pola hereditas, 119
Polidaktili, 142
Poligen, 80
Polihibrid, 106
Polimeri, 110, 116, 117
Polimorfik, 214
Polinukleotida, 73, 173
Polipeptida, 88, 222
Poliploid, 162, 163, 171
Polosit: primer, 101; sekunder, 101
Prinsip hereditas, 103
Produk bioteknologi, 231, 237
Profase, 92, 93, 97, 98, 123
Prokariot, 253
Prokariotik, 222
Proyek genom, 251, 252
PST (Protein Sel Tunggal), 61, 62, 243,
244
Punnet, R.C., 112

R

Radiasi, 170
Rantai respirator, 41
Rasio: fenotipe, 109, 110, 112, 116, 135;
genotipe, 135, 136
Reaksi: anabolisme, 35; biokimia, 35,
36; eksergonik, 55; endergonik,
56; gelap, 50, 53; hidrolisis, 57;
katabolisme, 35; metabolik, 38;
oksidasi reduksi/Redoks, 19,
35, 38, 39; terang, 50, 52
Reduksi, 39, 53, 95
Regenerasi, 53, 209
Rekayasa: biokimia, 232; genetika,
171, 233, 234, 236, 241, 247, 257,
258
Rekombinasi, 122, 125
Replikasi, 74
Resesif, 104-106, 142
Resistensi, 239
Respirasi: 39, 40; aerob, 41, 43;
anaerob, 41, 46, 47; sel, 41, 57,
64
Revolusi: hijau, 251; pertanian, 252
Ribosom, 76, 88, 90
Rizokalin, 24
Rudimentasi, 209

S

Sakarin, 58
Sefalosporin, 238
Sel: meristem, 11; pankreas, 236;
parenkim, 13; somatis, 92;
tubuh, 69
Seleksi alam, 197, 211, 216
Sentrion, 93
Sentromer, 84, 93, 94

INDEKS

- Sickle cell anemia, 144
Siklus: Calvin, 53, 54; Krebs, 41, 43, 46, 57; sel, 250
Silinder pusat, 14
Sindaktili, 143
Sindroma: Cri-du-chat, 161; Down, 134, 166; Edward, 134; Jacobs, 165; Klinefelter, 133, 165; Pantau, 134, 166; Turner, 133, 164;
Sinnot, E.W., 114
Sintesis protein, 79, 87, 88, 90, 160
Sitokinesis, 94
Sitokinin, 20, 22, 24, 26, 27
Sitokrom, 44
Sitoplasma, 76, 79, 88, 101
Skizofrenia, 133
Skoog, F. 24
Somatis, 69
Spektrum cahaya, 50
Spermatogenesis, 99, 100
Spermatisit, 99
Spermatozoa, 138
Spesies, 170, 204, 213, 216
Stele, 14
Steroid, 233
Strata, 194
Streptomisin, 238
Stroma, 50, 53
Submetasentris, 85
Suhu: 26; maksimum, 26; minimum, 26; optimum, 26
Sutton, W.S., 103
- T**
- Takson, 194
Taksonomi, 194, 197, 205
- Tatum, E.L., 87
Tautan: 119, 121, 123, 173; seks, 129, 130, 174
Teele, Edward, 168
Teknologi: fermentasi, 233; hibridoma, 240; pangan, 246; reproduksi, 259
Telofase, 92, 94, 97, 98
Telosentris, 85
Teori evolusi: 205, 218; Darwin, 193
Tetraploid, 86, 162, 163
Tetrasiklin, 238
Tetrasomik, 164
Thalasemia, 144
Tilakoid, 50, 51
Tirosin, 141
Totipoten, 234
Transfusi, 148, 152
Transgenik, 231, 247, 248, 256, 257
Transkripsi, 88
Translasi, 88
Translokasi, 160
Transpor: aktif, 27; elektron, 44
Transposon, 158
Triploid, 86, 162
Tromboplastin, 144
Tudung akar, 12, 13
Turner, H.M., 133, 164
- U**
- Uniseluler, 193
Urey, Harold, 220, 224
- V**
- Vaksin, 238, 241, 248
Vaksinasi, 241

INDEKS

Valin, 158
Variabel: 3; bebas, 3, 27; terikat, 3, 27
Variabilitas genetika, 155
Variasi, 201, 202
Varietas, 262
Vestigial, 209
Von Baer, 210
Vries, Hugo de, 156

W

Waksman, Selman, 239
Waldeyer, W., 69
Wallace, Alfred Russel, 198, 223
Watson, James D., 70, 71
Weinberg, Wilhelm, 214, 224
Weiner, A.S., 151

Weissman, August, 198, 223
Weissman, Charles, 242
Went, F.W., 20, 21
Wilmot, Ian, 249
Wright, 156

Y

Yahya, Harun, 223

Z

Zeatin, 24
Zigoten, 97
Zona: meristem, 12, 13, 14; pemanjangan, 12 14; pematangan, 14
Zoogles, 255

BIOLOGI 3



Ilmu Pengetahuan dan Teknologi saat ini berkembang dengan cukup pesat. Sebagai ilmu dasar dan ilmu murni serta sebagai salah satu bidang IPA, Ilmu Biologi pun mengalami hal yang sama. Ilmu Biologi, saat ini telah memasuki era rekayasa genetika dan bioteknologi yang menghasilkan berbagai penemuan baru.

Buku Biologi untuk SMA dan MA ini merupakan salah satu penunjang dalam proses belajar mengajar. Materi yang terdapat dalam buku ini membahas berbagai konsep Biologi yang mendorong siswa untuk lebih mengembangkan keterampilan, sikap, wawasan, dan nilai ilmiah.

Kelebihan buku ini:

- Disusun dan ditelaah oleh para penulis yang cukup handal dan berpengalaman di bidangnya.
- Disusun secara sistematis sesuai dengan struktur ilmu.
- Disajikan dengan menggunakan bahasa yang jelas, lugas, dan mudah dipahami.
- Dilengkapi gambar-gambar yang jelas dan menarik untuk menunjang materi.
- Disajikan dengan cara diskusi dan melalui pengamatan serta percobaan sederhana sehingga konsep-konsep biologi yang dibahas mudah dimengerti.
- Dilengkapi dengan tugas dan kegiatan yang menunjang materi pembelajaran serta Info Biologi sebagai penambah pengetahuan.
- Dilengkapi evaluasi akhir bab, akhir semester, dan akhir tahun yang mencakup tiga ranah evaluasi, yaitu kognitif, afektif, dan psikomotorik. Juga dilengkapi dengan glosarium dan indeks.

ISBN 978-979-068-831-5 (nomor jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-842-1

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp15.565,-

