

BIOLOGI

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI

2022

SMA/MA KELAS XII

Hak Cipta pada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia

Dilindungi Undang-Undang

Penafian: Buku ini disiapkan oleh Pemerintah dalam rangka pemenuhan kebutuhan buku pendidikan yang bermutu, murah, dan merata sesuai dengan amanat dalam UU No. 3 Tahun 2017. Buku ini disusun dan ditelaah oleh berbagai pihak di bawah koordinasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Buku ini merupakan dokumen hidup yang senantiasa diperbaiki, diperbarui, dan dimutakhirkan sesuai dengan dinamika kebutuhan dan perubahan zaman. Masukan dari berbagai kalangan yang dialamatkan kepada penulis atau melalui alamat surel buku@kemdikbud.go.id diharapkan dapat meningkatkan kualitas buku ini.

Biologi untuk SMA/MA Kelas XII

Penulis

Shilviani Dewi
Amalia Shari
Rani Elisa Purba
Remigius Gunawan Susilowarno

Penelaah

Endang Semiarti
Widi Purwianingsih

Penyelia/Penyelaras

Supriyatno
Lenny Puspita Ekawaty
Eko Budiono
Arifah Dinda Lestari

Kontributor

Budi Rahayu
Rika Maulida Sari

Kontributor Ahli

Prof. dr. Gunadi, Ph.D

Ilustrator

Hasbi Yusuf

Editor

Dwi Pajar Ratriningsih
Arifah Dinda Lestari

Desainer

Sona Purwana

Penerbit

Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi

Dikeluarkan oleh:

Pusat Perbukuan
Kompleks Kemdikbudristek Jalan RS. Fatmawati, Cipete, Jakarta Selatan
<https://buku.kemdikbud.go.id>

Cetakan pertama, 2022

ISBN 978-602-427-892-2 (no.jil.lengkap)
978-602-427-958-5 (jil.2)

Isi buku ini menggunakan huruf Noto Serif (Production Type/Principal design) 10 pts.
x, 254 hlm.: 176 mm x 250 mm.

Kata Pengantar

Pusat Perbukuan; Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan; Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi memiliki tugas dan fungsi mengembangkan buku pendidikan pada satuan Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah. Buku yang dikembangkan saat ini mengacu pada Kurikulum Merdeka, dimana kurikulum ini memberikan keleluasaan bagi satuan/program pendidikan dalam mengembangkan potensi dan karakteristik yang dimiliki oleh peserta didik. Pemerintah dalam hal ini Pusat Perbukuan mendukung implementasi Kurikulum Merdeka di satuan pendidikan Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah dengan mengembangkan Buku Teks Utama.

Buku teks utama merupakan salah satu sumber belajar utama untuk digunakan pada satuan pendidikan. Adapun acuan penyusunan buku teks utama adalah Pedoman Penerapan Kurikulum dalam rangka Pemulihan Pembelajaran yang ditetapkan melalui Keputusan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 56/M/2022 Tanggal 10 Februari 2022, serta Capaian Pembelajaran pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah pada Kurikulum Merdeka yang ditetapkan melalui Keputusan Kepala Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan Nomor 033/H/KR/2022 Tanggal 7 Juni 2022. Sajian buku dirancang dalam bentuk berbagai aktivitas pembelajaran untuk mencapai kompetensi dalam Capaian Pembelajaran tersebut. Buku ini digunakan pada satuan pendidikan pelaksana implementasi Kurikulum Merdeka.

Sebagai dokumen hidup, buku ini tentu dapat diperbaiki dan disesuaikan dengan kebutuhan serta perkembangan keilmuan dan teknologi. Oleh karena itu, saran dan masukan dari para guru, peserta didik, orang tua, dan masyarakat sangat dibutuhkan untuk pengembangan buku ini di masa yang akan datang. Pada kesempatan ini, Pusat Perbukuan menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan buku ini, mulai dari penulis, penelaah, editor, ilustrator, desainer, dan kontributor terkait lainnya. Semoga buku ini dapat bermanfaat khususnya bagi peserta didik dan guru dalam meningkatkan mutu pembelajaran.

Jakarta, Desember 2022
Kepala Pusat,

Supriyatno
NIP 196804051988121001

Prakata

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas izin dan karuniaNya, buku Biologi kelas XII ini dapat diselesaikan. Buku ini digunakan oleh peserta didik kelas XII jenjang SMA sebagai buku teks yang menjadi sumber belajar utama.

Buku ini terdiri atas empat bab. Pada setiap bab diawali dengan konteks atau tema yang mudah ditemukan di lingkungan sekitar peserta didik dan berkaitan dengan materi sains yang akan dibahas. Peserta didik diajak untuk memiliki kesadaran sebagai warga negara global yang bertanggung jawab untuk merespon isu-isu global. Peserta didik dapat berkontribusi menyelesaikan isu-isu global yang sedang terjadi. Misalnya, pandemi Covid-19 dikaitkan dengan substansi gen, metabolisme, evolusi, dan pemanfaatan bioteknologi yang dapat dilakukan dari rumah masing-masing. Pembahasan konsep materi pada buku ini disesuaikan dengan Capaian Pembelajaran Fase F. Selain itu, berbagai aktivitas disajikan sebagai penerapan konsep materi.

Keunggulan buku ini, yaitu isinya yang disesuaikan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terkini, mengangkat isu global, melatih berpikir tingkat tinggi, sajian soal-soal dengan pendekatan PISA, dan aktivitas proyek kolaborasi yang mengarah pada kontribusi tercapainya agenda pembangunan berkelanjutan PBB 2030. Selain itu, sistematika penulisannya yang terperinci diharapkan peserta didik mengalami proses pembelajaran yang menyenangkan dan bermakna dalam konsep merdeka belajar.

Akhir kata, penulis berharap semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi kemajuan pendidikan di Indonesia. Penulis menantikan masukan dari pembaca untuk penyempurnaan isi buku di masa yang akan datang.

Jakarta, Juni 2022

Tim Penulis

● Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Prakata	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Tabel.....	vi
Daftar Gambar	vi
Petunjuk Penggunaan Buku.....	ix
Bab 1 Enzim dan Metabolisme	1
A. Enzim	4
B. Metabolisme	14
Bab 2 Genetik dan Pewarisan Sifat	59
A. Materi Genetik	61
B. Sintesis Protein	81
C. Pembelahan Sel	84
D. Pewarisan Sifat	94
Bab 3 Evolusi	129
A. Definisi Evolusi	133
B. Perkembangan Teori Evolusi	136
Bab 4 Inovasi Bioteknologi	191
A. Definisi Bioteknologi.....	193
B. Manfaat Bioteknologi.....	197
C. Jenis Bioteknologi	203
D. Cabang Ilmu yang Berperan dalam Bioteknologi	208
E. Aplikasi Bioteknologi Konvensional.....	211
F. Aplikasi Bioteknologi Modern	216
G. Harapan dan Kenyataan Bioteknologi Modern.....	239
H. Bioetika	241
Glosarium.....	255
Daftar Pustaka	259
Indeks.....	261
Profil Pelaku Perbukuan.....	263

Daftar Tabel

Tabel 2.1	Tabel Kode Genetika (Kodon) Asam Amino.....	80
Tabel 2.2	Percobaan Mendel yang Melibatkan Pewarisan Sifat Monohybrid.....	97
Tabel 2.3	Golongan Darah Manusia dan Genotipnya	103
Tabel 4.1	Sejarah Penemuan dalam Bioteknologi.....	196
Tabel 4.2	Perbedaan Bioteknologi Konvensional dan Modern.....	204
Tabel 4.3	Jenis Tanaman, Jenis Metabolit dan Fungsi Metabolit Sekunder.....	222
Tabel 4.4	Analisis Keuangan Usaha Kultur Jaringan.....	223

Daftar Gambar

Gambar 1.1	Energi diperoleh dari makanan.....	3
Gambar 1.2	Struktur enzim.....	4
Gambar 1.3	Perbedaan energi aktivasi pada reaksi dengan dan tanpa enzim.....	6
Gambar 1.4	Mekanisme penguraian hidrogen peroksida.....	7
Gambar 1.5	Teori <i>lock and key</i>	7
Gambar 1.6	Teori <i>induced fit</i>	8
Gambar 1.7	Enzim memiliki pH optimum.....	11
Gambar 1.8	Grafik pengaruh konsentrasi substrat terhadap kecepatan reaksi.....	12
Gambar 1.9	Macam inhibitor enzim.....	13
Gambar 1.10	Penisilin sebagai inhibitor kompetitif	13
Gambar 1.11	Persamaan reaksi respirasi aerob.....	17
Gambar 1.12	Struktur ATP.....	17
Gambar 1.13	Tahapan respirasi aerob.....	18
Gambar 1.14	Glikolisis.....	19
Gambar 1.15	Bagan tahapan glikolisis.....	20
Gambar 1.16	Dekarboksilasi oksidatif.....	21
Gambar 1.17	Bagan dekarboksilasi oksidatif.....	22
Gambar 1.18	Siklus Asam Sitrat	23
Gambar 1.19	Fosforilasi oksidatif.....	26
Gambar 1.20	Reaksi fermentasi.....	29
Gambar 1.21	Struktur kloroplas.....	32
Gambar 1.22	Keterkaitan reaksi terang dan reaksi gelap pada fotosintesis.....	33
Gambar 1.23	Fotofosforilasi nonsiklik.....	34
Gambar 1.24	Reaksi terang.....	35
Gambar 1.25	Fotofosforilasi siklik.....	36
Gambar 1.26	Siklus Calvin.....	38
Gambar 1.27	Perangkat percobaan Ingenhouz.....	41
Gambar 1.28	Alur percobaan pembuktian amilum hasil fotosintesis.....	45
Gambar 1.29	Percobaan Engelmann.....	46
Gambar 1.30	Perbandingan fiksasi tumbuhan C ₃ , C ₄ dan CAM.....	48
Gambar 2.1	Hasil persilangan angrek <i>Vanda tricolor</i> dengan <i>Vanda limbata</i> asal NTB menghasilkan varietas baru <i>Vanda tricolimbata</i>	61
Gambar 2.2	Simbol komponen penyusun nukleotida.....	62
Gambar 2.3	Dogma sentral.....	63
Gambar 2.4	Perubahan satu nukleotida G menjadi C dapat mengubah fenotip jenis rambut.....	63
Gambar 2.5	Nukleotida.....	64
Gambar 2.6	Polinukleotida.....	64
Gambar 2.7	Rantai ganda DNA merupakan struktur yang berpilin.....	64
Gambar 2.8	Aturan perpasangan basa nitrogen.....	65
Gambar 2.9	Pasangan basa komplementer.....	65
Gambar 2.10	DNA model Watson dan Crick.....	67
Gambar 2.11	Tiga model replikasi DNA, yaitu (a) semikonservatif, (b) konservatif, dan (c) dispersif.....	69
Gambar 2.12	Pengemasan DNA di dalam sel.....	70
Gambar 2.13	<i>D. melanogaster</i>	71
Gambar 2.14	Struktur kromosom yang memperlihatkan lengan	

	(kromatid) dan sentromer.....	72
Gambar 2.15	Benang spindel, lengan (kromatid), dan sentromer pada saat pembelahan sel.....	73
Gambar 2.16	Bentuk kromosom berdasarkan letak sentromer, yaitu (a) telosentrik, (b) akrosentrik, (c) submetasentrik, dan (d) metasentrik.	73
Gambar 2.17	Bagian eukromatin dan heterokromatin pada kromosom.....	74
Gambar 2.18	Kariotip.....	76
Gambar 2.19	RNA terdiri atas satu rantai.....	77
Gambar 2.20	Molekul RNA pada ribosom.....	78
Gambar 2.21	Sintesis protein.....	82
Gambar 2.22	Pertumbuhan <i>mimic octopus</i> (<i>Thaumoctopus mimicus</i>).....	84
Gambar 2.23	Tahap pembelahan mitosis.....	86
Gambar 2.24	Sitokinesis.....	87
Gambar 2.25	Siklus sel.....	88
Gambar 2.26	Interfase.....	89
Gambar 2.27	Tahapan meiosis I dan meiosis II.....	92
Gambar 2.29	Proses oogenesis.....	93
Gambar 2.28	Proses spermatogenesis.....	93
Gambar 2.30	Foto keluarga.....	96
Gambar 2.31	Uji silang melibatkan genotipe homozigot dominan.....	101
Gambar 2.32	Uji silang melibatkan genotipe heterozigot.....	102
Gambar 2.33	Interaksi gen antara alel R dengan alel P dalam menentukan model jengger ayam.....	104
Gambar 2.34	Kriptomeri pada pewarisan sifat warna bunga <i>Linaria maroccana</i>	105
Gambar 2.35	Contoh persilangan polimeri.....	106
Gambar 2.36	Contoh persilangan epistasis-hipostasis.....	107
Gambar 2.37	Contoh persilangan komplementer.....	108
Gambar 2.38	Penentuan jenis kelamin manusia saat proses fertilisasi.....	109
Gambar 2.39	Anak dengan sindrom Down.....	112
Gambar 2.40	Kembar Identik.....	113
Gambar 2.41	Nukleosom.....	114
Gambar 2.42	Mekanisme Epigenetik dalam Proses Perubahan Fenotip Pada Individu.....	115
Gambar 2.43	Jalur metilasi DNA.....	118
Gambar 2.44		119
Gambar 3.1	Burung maleo endemik Sulawesi, Indonesia.....	131
Gambar 3.2	Variasi anjing.....	132
Gambar 3.3	Evolusi kuda.....	133
Gambar 3.4	Pohon filogeni yang menunjukkan hubungan evolusi berbagai makhluk hidup.....	135
Gambar 3.5	Perkembangan teori mekanisme evolusi.....	136
Gambar 3.6	Hasil percobaan <i>Francesco Redi</i>	139
Gambar 3.7	Percobaan <i>Lazarro Spalanzani</i>	140
Gambar 3.8	Percobaan leher angsa Louis Pasteur.....	141
Gambar 3.9	Alat percobaan Miller.....	143
Gambar 3.10	Mekanisme endosimbiosis.....	144
Gambar 3.11	Asal-usul jerapah berleher panjang.....	146
Gambar 3.12	Variasi paruh burung finch yang ditemukan Charles Darwin.....	148
Gambar 3.13	Asal-usul jerapah berleher panjang.....	150
Gambar 3.14	Garis Wallace dan Persebaran Fauna di Indonesia.....	152
Gambar 3.15	Dua burung merak jantan dan 1 burung merak betina.....	155
Gambar 3.14	(a) Kupu-kupu <i>Biston betularia</i> sayap gelap (b) Kupu-kupu <i>Biston betularia</i> sayap cerah.....	157
Gambar 3.15	Distribusi frekuensi gen seleksi alam.....	158
Gambar 3.16	Ekor kipas merak jantan digunakan untuk menarik perhatian betina.....	159
Gambar 3.17	Gene pool.....	161
Gambar 3.18	Perubahan alel dalam sebuah <i>genetic drift</i>	163
Gambar 3.19	Perbedaan mata normal dan mata yang berkelainan.....	164
Gambar 3.20	Peristiwa pembentukan koloni baru.....	165
Gambar 3.21	Perubahan jumlah rumput teki.....	166
Gambar 3.22	Kebakaran hutan Sumatera.....	166
Gambar 3.23	Mekanisme efek leher botol.....	167

Gambar 3.24	Anjing laut gajah utara.....	168
Gambar 3.25	Mekanisme aliran gen antarpopulasi.....	169
Gambar 3.26	Ekspresi gen pada kupu-kupu bersayap gelap dan cerah.....	171
Gambar 3.27	Evolusi kuda.....	172
Gambar 3.28	(a) Fosil kaki kuda (b) Fosil gigi kuda.....	173
Gambar 3.29	Filogeni antara rubah, serigala, dan anjing.....	174
Gambar 3.30	Homolog dan analog organ tubuh makhluk hidup.....	175
Gambar 3.31	Tahapan perkembangan embriologi vertebrata.....	176
Gambar 3.32	ilustrasi definisi Darwinisme, Sintesis Modern (neo-Darwinisme) dan Sintesis Terpadu.....	180
Gambar 3.33	Ekspresi gen Agouti pada tikus Agouti dengan beberapa perlakuan.....	183
Gambar 4.1	Macam-macam produk bioteknologi.....	194
Gambar 4.2	Skema bioteknologi.....	195
Gambar 4.3	Bahan, jenis bakteri dan produk <i>nata de coco</i>	198
Gambar 4.4	Teknik bioremediasi pada IPAL.....	199
Gambar 4.5	Teknologi tanaman transgenik.....	200
Gambar 4.6	Teknologi hibridoma pada antibodi monoklonal.....	200
Gambar 4.7	Produksi biogas.....	202
Gambar 4.8	Identifikasi kecocokan DNA.....	202
Gambar 4.9	Proses pembuatan tempe.....	203
Gambar 4.10	Teknologi transgenik.....	203
Gambar 4.11	Teknologi bioinformatika.....	205
Gambar 4.12	Pohon bioteknologi.....	208
Gambar 4.13	Cabang ilmu yang membangun bioteknologi.....	209
Gambar 4.14	Pohon kontribusi cabang ilmu bioteknologi pada kasus bioteknologi tempe.....	210
Gambar 4.15	Grafik kandungan protein pada berbagai jenis biji.....	213
Gambar 4.16	(a) Usar/laru tempe (b) <i>Rhizopus oryzae</i> (c) <i>Rhizopus oligosporus</i>	213
Gambar 4.17	Ringkasan fermentasi pada saat perendaman.....	214
Gambar 4.18	Ringkasan proses fermentasi oleh enzim.....	214
Gambar 4.19	Tahapan pembuatan antibodi monoklonal.....	216
Gambar 4.20	Tahapan pembuatan vaksin.....	216
Gambar 4.21	Tahapan pembuatan tanaman transgenik.....	217
Gambar 4.22	Kloning domba Dolly.....	217
Gambar 4.23	Bibit kelapa dan jati hasil kultur jaringan.....	218
Gambar 4.24	Proses inisiasi.....	220
Gambar 4.25	Proses kultur jaringan.....	221
Gambar 4.26	Padi Biosalin dan Kedelai Dering I.....	221
Gambar 4.27	Tebu <i>Giant Sugarcane</i> dan pisang Abaca.....	222
Gambar 4.28	Organisme hasil rekayasa genetika.....	224
Gambar 4.29	Tahapan rekayasa genetika.....	225
Gambar 4.30	Tahapan transgenik pada tanaman.....	226
Gambar 4.31	Teknologi transfer inti pada domba Dolly.....	228
Gambar 4.32	Kloning pada manusia.....	229
Gambar 4.33	Kloning terapeutik.....	231
Gambar 4.34	Vaksin Covid-19.....	231
Gambar 4.35	Sel punca pada manusia.....	234
Gambar 4.36	Teknologi sel punca pada manusia.....	234
Gambar 4.37	Enzim nuklease memotong DNA.....	236
Gambar 4.38	Mekanisme kerja CRISPR/Cas9.....	238

Petunjuk Penggunaan Buku

Pada hakikatnya, Biologi mempelajari makhluk hidup dan variasi bioproses yang terjadi serta aplikasi teknologi untuk menghasilkan barang dan jasa. Melalui pembelajaran Biologi, kalian dilatih memecahkan masalah kehidupan sehari-hari guna menunjang pembangunan yang berkelanjutan melalui keterampilan proses.

Buku ini dirancang dengan berbagai aktivitas belajar yang akan mengasah kreativitas, berpikir kritis, mengembangkan keterampilan proses, bekerja sama, dan berkomunikasi untuk memecahkan masalah kehidupan sehari-hari untuk menunjang pembangunan yang berkelanjutan.

1 Kover bab

Berisi:

- ▶ gambar yang berkaitan dengan materi pada bab tersebut,
- ▶ pertanyaan pemantik.



2 Tujuan Pembelajaran

Berisi tujuan yang diharapkan tercapai, dimiliki, atau dikuasai setelah kalian mengikuti kegiatan pembelajaran setiap bab

Tujuan Pembelajaran

Pada bab ini, kalian akan diajak untuk dapat:

1. mendeskripsikan struktur dan fungsi enzim.
2. menjelaskan mekanisme kerja enzim.
3. menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi kerja enzim.
4. menganalisis perbedaan anabolisme dan katabolisme.
5. menganalisis tahap-tahap respirasi aerobik.
6. menjelaskan proses fermentasi alkohol dan asam laktat.
7. menganalisis tahap-tahap reaksi terang dan gelap pada fotosintesis.
8. menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi fotosintesis pada tumbuhan.

3 Kata Kunci

enzim, metabolisme, respirasi seluler, fotosintesis, fotorespirasi

3 Kata Kunci

Berisi kata-kata yang akan kalian dalam pada uraian materi di setiap bab.



4 Peta Materi

Berisi diagram alur materi pada setiap KD sehingga akan membantu kalian mengetahui hubungan antarkonsep yang dipelajari dalam bab tersebut.

4

5 Apersepsi

Berisi kejadian dalam kehidupan sehari-hari yang berkaitan dengan materi pada bab tersebut dan ditampilkan di awal bab.



4

AKTIVITAS 1.1

Berkelompok untuk Mengenal Enzim

1. Buatlah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut.

6

6 Aktivitas

Berisi berbagai bentuk kegiatan yang dapat kalian lakukan, seperti pemerolehan dan penelaahan informasi dari artikel, pengamatan sederhana di lingkungan sekitar, menyimak video, dan praktikum sederhana.

7 Refleksi

Pada kegiatan ini, kalian diajak berpikir secara mendalam terkait materi yang sudah dipelajari dan mengidentifikasi kekurangannya, manfaat, serta sikap setelah mempelajari materi tersebut.

REFLEKSI

Untuk meninjau ulang keseluruhan proses pembelajaran, lakukan refleksi dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apa sajakah yang sudah kalian kuasai pada pembelajaran ini?
2. Apa sajakah yang belum kalian kuasai pada pembelajaran ini?
3. Apakah yang menyebabkan kalian belum menguasai bagian tertentu pada pembelajaran ini?
4. Upaya apa yang akan kalian lakukan sebagai tindak lanjut terhadap materi yang sudah kalian kuasai?
5. Upaya yang akan kalian dilakukan untuk mengatasi bagian yang belum dikuasai pada pembelajaran ini?

7

8 Uji Kompetensi

Pada akhir bab, disajikan berbagai pertanyaan tentang materi pada bab tersebut. Pertanyaan-pertanyaan yang dimunculkan dalam berbagai bentuk dan tidak hanya untuk mengases pengetahuan tetapi juga keterampilan proses kalian serta melatih untuk terbiasa dengan soal AKM.

UJI KOMPETENSI

Pilihlah salah satu jawaban yang paling benar!

1. Pernyataan mengenai enzim berikut yang tidak tepat, yaitu
 - a. Enzim adalah protein yang berfungsi sebagai katalis.
 - b. Enzim bersifat spesifik terhadap substratnya.
 - c. Enzim menyediakan energi aktivasi untuk reaksi kimia.
 - d. Enzim dipengaruhi oleh faktor lingkungan.
 - e. Enzim dapat digunakan berkali-kali.
2. Holoenzim tersusun atas struktur
 - a. apoenzim dan inhibitor nonkompetitif
 - b. koenzim dan gugus prostetik

8

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2022

Biologi
untuk SMA Kelas XII

Penulis Shilviani Dewi, dkk.

ISBN 978-602-427-958-5 (jil.2)

BAB 1



Enzim dan Metabolisme

Bagaimanakah struktur dan fungsi enzim serta perannya dalam metabolisme pada makhluk hidup?

Tujuan Pembelajaran

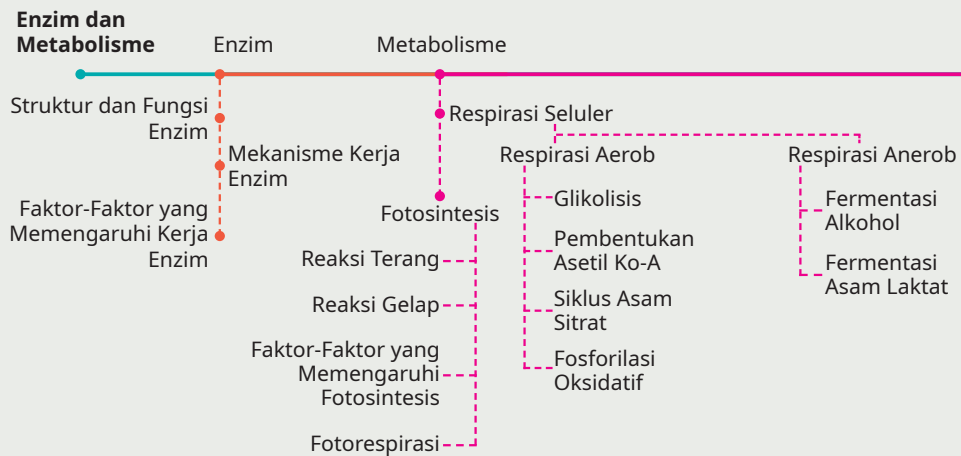
Pada bab ini, kalian akan diajak untuk dapat:

1. mendeskripsikan struktur dan fungsi enzim.
2. menjelaskan mekanisme kerja enzim.
3. menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi kerja enzim.
4. menganalisis perbedaan anabolisme dan katabolisme.
5. menganalisis tahap-tahap respirasi aerobik.
6. menjelaskan proses fermentasi alkohol dan asam laktat.
7. menganalisis tahap-tahap reaksi terang dan gelap pada fotosintesis.
8. menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi fotosintesis dan fotorespirasi pada tumbuhan.

Kata Kunci

enzim, metabolisme, respirasi seluler, fotosintesis, fotorespirasi.

Peta Materi



Ayo Mengingat Kembali

Ingatkah kalian ketika mempelajari materi sistem pencernaan pada kelas sebelumnya? Fungsi utama sistem pencernaan, yaitu mengubah molekul besar yang tidak larut air menjadi molekul kecil yang larut air. Perubahan molekul ini memerlukan pencernaan mekanik oleh gigi dan kimiawi oleh enzim. Pada organ-organ tertentu yang terkait dengan sistem pencernaan terdapat enzim dengan fungsi tertentu. Coba tuliskan kembali enzim-enzim yang terdapat pada saluran pencernaan beserta fungsinya.

Perhatikan gambar di bawah ini. Gambar tersebut menunjukkan tiga kondisi manusia, yaitu lemas dan mengantuk, makan, serta beraktivitas.



Gambar 1. 1 Energi diperoleh dari makanan.

Sumber: Bayu/Kemendikbudristek (2022)

Ketika lapar, kalian akan merasakan lemas dan mudah mengantuk karena kekurangan energi. Oleh karena itu, kalian perlu makan, salah satunya dengan makan nasi. Nasi dihasilkan dari beras hasil fotosintesis tumbuhan padi. Seperti kalian ketahui bahwa proses fotosintesis yang menghasilkan beras pada tanaman padi membutuhkan energi dari cahaya matahari. Fotosintesis merupakan salah satu contoh proses anabolisme (pembentukan) dalam metabolisme.

Tiga puluh menit hingga satu jam setelah makan, kalian akan mempunyai tenaga sehingga rasa lemas dan kantuk hilang. Mengapa demikian? Ketika kalian makan, zat makanan akan dicerna dan diserap, lalu diedarkan ke sel-sel tubuh. Di dalam sel, zat makanan akan dipecah untuk menghasilkan energi

melalui peristiwa respirasi. Energi akan digunakan untuk melakukan aktivitas kehidupan. Proses sel menghasilkan energi melalui respirasi merupakan salah satu contoh peristiwa katabolisme (penguraian) dalam metabolisme.

Berdasarkan uraian di atas, fotosintesis yang membutuhkan energi dan respirasi yang menghasilkan energi merupakan proses metabolisme. Proses respirasi dan fotosintesis berlangsung secara bertahap melalui reaksi kimia yang terjadi di dalam sel hidup. Kecepatan setiap tahapan reaksi kimia dipengaruhi zat atau katalisator yang disebut enzim. Enzim merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari reaksi-reaksi dalam metabolisme.

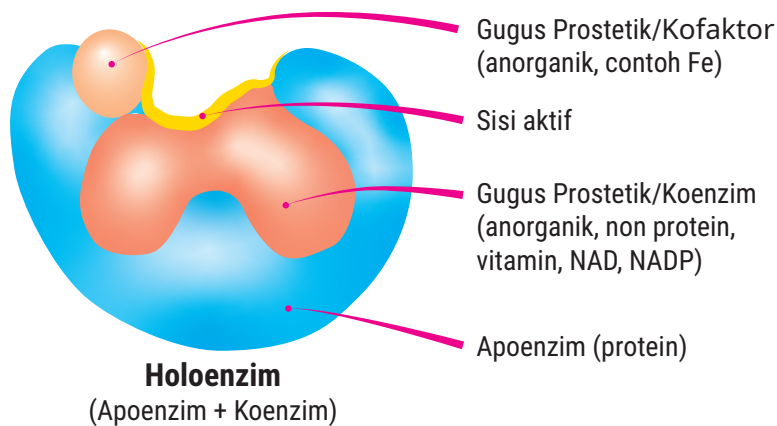
● A. Enzim

Ketika mengunyah nasi, nasi yang semula terasa tawar, lama-kelamaan terasa manis. Perubahan apa yang terjadi dan apa yang menyebabkan perubahan rasa tersebut? Saat mengunyah nasi, amilum yang berasa tawar dipecah oleh enzim amilase menjadi maltosa yang berasa manis. Apa itu enzim? Bagaimana struktur enzim? Dan, bagaimana sifat-sifat enzim? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.1

Bereksplorasi untuk Mengetahui Enzim

1. Buatlah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 1. 2 Struktur enzim.

1. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Temukan dua komponen utama penyusun enzim!
 - b. Temukan dua macam penyusun gugus prostetik pada enzim!
 - c. Senyawa apakah yang menyusun bagian apoenzim?
 - d. Apakah sisi aktif dan bagian manakah dari enzim yang memiliki sisi aktif?
 - e. Senyawa apa yang menyusun gugus prostetik yang disebut dengan koenzim?
 - f. Senyawa apa yang menyusun gugus prostetik yang disebut dengan kofaktor?
 - g. Lakukan studi literatur menggunakan sumber literasi digital terpercaya mengenai fungsi koenzim dan kofaktor pada kerja enzim!
2. Tulis hasil diskusi kalian dalam bentuk laporan dan presentasikan di depan kelas.

1. Struktur dan Sifat-sifat Enzim

Berdasarkan hasil eksplorasi pada Aktivitas 1.1, kalian telah menemukan bahwa umumnya enzim tersusun atas apoenzim dan gugus prostetik. Apoenzim tersusun atas senyawa protein. Bagian apoenzim memiliki sisi aktif yang berfungsi sebagai tempat melekatnya substrat.

Terdapat dua macam gugus prostetik, yaitu koenzim dan kofaktor. Koenzim dan kofaktor merupakan bagian yang membantu kerja apoenzim. Koenzim tersusun atas molekul organik nonprotein yang tidak melekat erat pada bagian protein enzim, misalnya vitamin, NAD, NADP, dan Koenzim A. Adapun kofaktor tersusun atas molekul anorganik yang umumnya logam, misalnya Cu, Fe, Mn, Zn, Ca, K, dan Co.

Apoenzim (protein) yang telah mengikat gugus prostetik (kofaktor atau koenzim) membentuk holoenzim, enzim aktif yang dapat mengkatalis suatu reaksi. Setelah memahami struktur penyusun enzim, selanjutnya kalian akan belajar sifat-sifat enzim sebagai berikut.

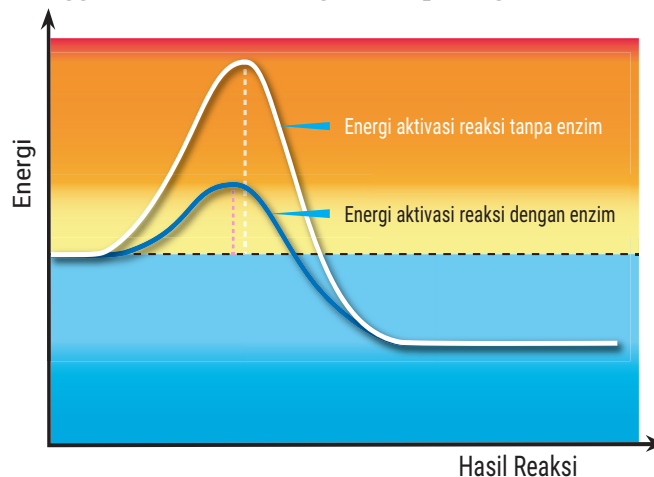
- a. Enzim merupakan protein

Enzim mempunyai sifat seperti protein, yaitu bekerja pada kisaran suhu dan pH tertentu. Enzim tidak dapat bekerja pada kisaran

suhu rendah karena ikatan polipeptida protein penyusun enzim mengalami pelipatan atau koagulasi, sedangkan pada kisaran suhu tinggi menyebabkan ikatan polipeptidanya mengalami denaturasi atau terputus sehingga protein rusak dan tidak berfungsi. Enzim juga dapat rusak pada pH rendah (asam) karena gugus amina pada asam amino penyusun protein mengalami ionisasi, sedangkan pada pH tinggi (basa) gugus karboksilnya mengalami ionisasi. Kondisi ini menyebabkan protein rusak dan tidak berfungsi.

b. Enzim menurunkan energi aktivasi

Ketika kompleks enzim-substrat terbentuk, enzim menurunkan energi aktivasi substratnya. Energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan agar reaksi kimia dapat dimulai. Penurunan energi aktivasi pada reaksi menggunakan enzim tergambar pada grafik berikut.



▲ Gambar 1. 3 Perbedaan energi aktivasi pada reaksi dengan dan tanpa enzim.

c. Bekerja secara spesifik (*one enzyme one substrate*)

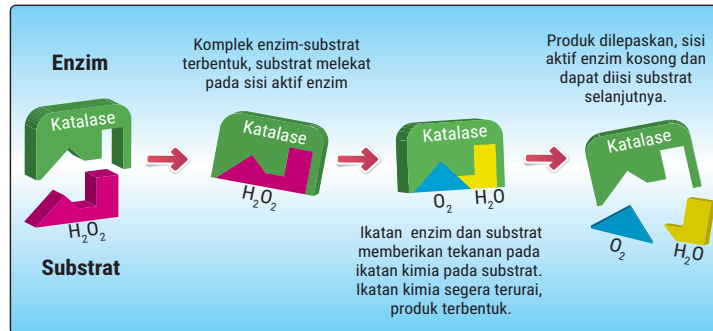
Enzim hanya dapat bekerja pada substrat tertentu. Contohnya, enzim amilase hanya bekerja pada substrat amilum dan memecahnya menjadi maltosa. Enzim amilase tidak bisa bekerja lagi untuk mengubah maltosa menjadi glukosa dan juga tidak bisa mengkatalisis balik mengubah maltosa menjadi amilum.

d. Enzim dipengaruhi oleh faktor lingkungan

Faktor yang memengaruhi kerja enzim, yaitu suhu, pH, aktivator (pengaktif), inhibitor (penghambat), dan konsentrasi substrat.

2. Cara Kerja Enzim

Ketika belajar struktur dan fungsi sel di kelas XI, kalian telah mempelajari bahwa fungsi organel peroksisom untuk menghasilkan enzim katalase. Enzim katalase dapat menguraikan hidrogen peroksida (H_2O_2), produk sampingan respirasi aerob yang dihasilkan mitokondria menjadi H_2O dan O_2 . Lalu, bagaimana cara enzim katalase dalam menguraikan H_2O_2 ? Cermati gambar berikut!



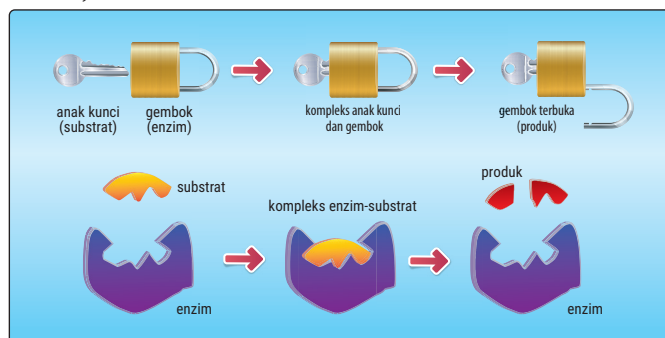
▲ Gambar 1.4 Mekanisme penguraian hidrogen peroksida.

Berdasarkan Gambar 1.4 terlihat bahwa substrat berupa H_2O_2 dan enzim katalase bereaksi membentuk kompleks (gabungan) H_2O_2 – **enzim katalase**. Selanjutnya, enzim katalase menguraikan H_2O_2 menjadi H_2O dan O_2 . Setelah selesai, enzim terbentuk kembali seperti semula dan dihasilkan produk berupa H_2O dan O_2 .

Agar kalian lebih memahami cara enzim bekerja, pelajari beberapa teori cara kerja enzim berikut.

a. Teori *lock and key* (gembok dan anak kunci)

Untuk mengetahui cara kerja enzim berdasarkan teori gembok dan anak kunci, cermati Gambar 1.5 berikut!



▲ Gambar 1.5 Teori *lock and key*.

Sumber: Biology Brain/biologybrain.com (2022)

b. Teori *induced fit* (induksi pas)

Teori ini mirip dengan teori gembok dan anak kunci, namun dengan menambahkan penemuan baru bahwa enzim dan substrat tidak kaku seperti gembok dan anak kunci. Sisi aktif pada enzim bersifat fleksibel sehingga dapat mengikat substrat dengan tepat. Hal ini menyebabkan kerja enzim sebagai katalisator menjadi lebih efisien. Perhatikan Gambar 1.6 berikut!



▲ Gambar 1. 6 Teori *induced fit*.

Sumber: TimVickers-Fvasconcellos/commons.wikimedia.com (2006)

Setelah mempelajari mekanisme kerja enzim, kalian diharapkan mampu menggunakan teknologi untuk menunjukkan pemahaman mengenai teori mekanisme kerja enzim dengan melakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.2

Memahami Teori Gembok dan Kunci dengan Teknologi

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Cari informasi mengenai video *stop motion* melalui literasi digital.
3. Buat video *stop motion* untuk menunjukkan pemahaman kalian mengenai teori gembok dan kunci serta induksi pas.
4. Lengkapi video dengan narasi yang sesuai.
5. Unggah video kalian ke media sosial, seperti Youtube atau Facebook.

3. Faktor yang Memengaruhi Kerja Enzim

Pernahkah kalian mengamati perubahan saat telur digoreng? Ketika digoreng, putih telur memadat dan berubah warna. Putih telur tersusun atas albumin yang merupakan salah satu jenis protein. Perubahan yang

terjadi ketika telur digoreng menunjukkan protein dipengaruhi suhu yang merupakan salah satu faktor lingkungan.

Begitu juga dengan enzim yang dipengaruhi faktor lingkungan. Faktor apa sajakah yang memengaruhi kerja enzim? Lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.3

Pengaruh pH dan Suhu terhadap Kerja Enzim

Alat:

1. mortar dan alu
2. kertas saring
3. gelas ukur
4. 6 buah tabung reaksi
5. kertas pH
6. termometer

Bahan:

1. 1 buah hati ayam
2. 50 ml akuades
3. 10 tetes larutan HCl atau air perasan jeruk nipis
4. 10 tetes larutan NaOH atau serbuk soda kue
5. 50 ml hidrogen peroksida (H_2O_2)
6. 1 gram serbuk es batu
7. 10 ml air mendidih

Langkah percobaan:

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 4 – 5 orang.
2. Siapkan alat dan bahan yang diperlukan.
3. Ikuti langkah percobaan berikut.
 - a. Perlakuan pH pada kerja enzim katalase
 - 1) Haluskan hati ayam yang dicampur akuades menggunakan mortar dan alu.
 - 2) Saring campuran di atas ke dalam gelas ukur.
 - 3) Siapkan 3 buah tabung reaksi yang ditandai dengan huruf A, B, dan C.
 - 4) Tuang ekstrak hati ayam hingga ketinggian 1 cm pada tiap tabung reaksi.
 - 5) Tambahkan 10 tetes larutan HCl (air perasan jeruk nipis) pada tabung A dan ukur pHnya dengan kertas pH.

- 6) Tambahkan 10 tetes larutan NaOH (serbuk soda kue) pada tabung B dan ukur pHnya dengan kertas pH.
- 7) Tambahkan masing-masing 10 tetes larutan H_2O_2 pada tabung A, B, dan C. Lalu, amati ketiga tabung tersebut.
- 8) Tulis hasil pengamatan kalian pada tabel berikut.

Ekstrak hati + HCl + H_2O_2 pH =		Ekstrak hati + NaOH + H_2O_2 pH =		Ekstrak hati + H_2O_2 pH =	
Gelembung gas	Nyala api	Gelembung gas	Nyala api	Gelembung gas	Nyala api

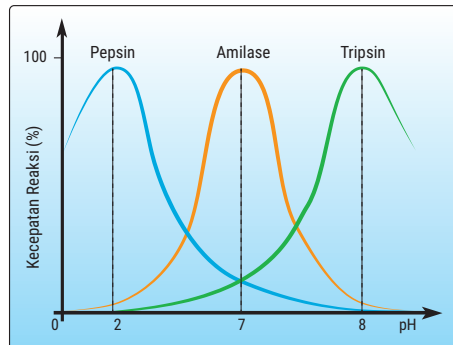
- 9) Jawablah pertanyaan berikut dengan berdiskusi bersama kelompok kalian.
 - a) Mengapa pada tabung A tidak muncul gelembung dan nyala api?
 - b) Mengapa pada tabung B tidak muncul gelembung dan nyala api?
 - c) Mengapa pada tabung C muncul gelembung dan nyala api?
 - d) Hasil reaksi apakah yang ditunjukkan dengan munculnya gelembung pada tabung C?
 - e) Senyawa apakah yang ditunjukkan dengan munculnya nyala api?
 - f) Kesimpulan apa yang dapat dirumuskan terkait dengan pengaruh pH pada kerja enzim katalase?
- b. Perlakuan suhu pada kerja enzim katalase
 - 1) Haluskan hati ayam yang dicampur akuades menggunakan mortar dan alu.
 - 2) Saring campuran di atas ke dalam gelas ukur.
 - 3) Siapkan 3 buah tabung reaksi yang ditandai dengan huruf D, E, dan F.
 - 4) Tuang ekstrak hati ayam hingga ketinggian 1 cm pada tiap tabung reaksi.
 - 5) Tambahkan 1 gram serbuk es batu pada tabung D dan ukur suhunya dengan termometer.
 - 6) Tambahkan 10 ml air mendidih pada tabung E dan ukur suhunya dengan termometer.
 - 7) Tambahkan masing-masing 10 tetes H_2O_2 pada tabung D, E, dan F. Lalu, amati ketiga tabung tersebut.
 - 8) Tulis hasil pengamatan kalian pada tabel berikut.

Ekstrak hati + es batu + H_2O_2 , suhu =		Ekstrak hati + air panas + H_2O_2 , suhu =		Ekstrak hati + H_2O_2 , suhu =	
Gelembung gas	Nyala api	Gelembung gas	Nyala api	Gelembung gas	Nyala api

- 9) Jawablah pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
- Mengapa pada tabung D tidak muncul gelembung dan nyala api?
 - Mengapa pada tabung E tidak muncul gelembung dan nyala api?
 - Mengapa pada tabung F muncul gelembung dan nyala api?
 - Hasil reaksi apakah yang ditunjukkan dengan munculnya gelembung pada tabung F?
 - Gas apakah yang ditunjukkan dengan munculnya nyala api?
 - Kesimpulan apa yang dapat dirumuskan terkait dengan pengaruh suhu pada kerja enzim katalase?

Tulis laporan hasil percobaan kalian dan presentasikan di depan kelas.

Berdasarkan hasil eksperimen, pH dan suhu terbukti berpengaruh pada kerja enzim katalase. Kerja enzim mempunyai kisaran pH tertentu. Perhatikan grafik berikut!



▲ Gambar 1. 7 Enzim memiliki pH optimum.

Pada grafik di atas, pepsin bekerja optimum pada pH asam, sedangkan amilase bekerja pada pH normal dan tripsin optimum bekerja pada pH basa. Hal ini menunjukkan bahwa pH berpengaruh pada kerja enzim. Selain pH dan suhu ada faktor lain yang memengaruhi kerja enzim. Untuk mengetahui faktor tersebut, lakukan kegiatan berikut!

AKTIVITAS 1.4

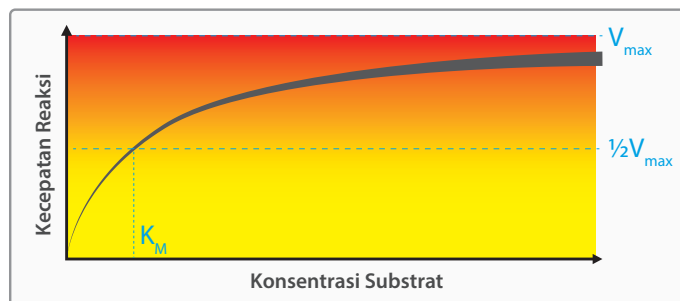
Mengetahui Pengaruh Konsentrasi Enzim terhadap Kecepatan Reaksi

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 – 4 orang.
2. Perhatikan tabel perbedaan konsentrasi enzim katalase pada jumlah volume oksigen pada waktu yang berbeda berikut.

Konsentrasi Katalase (cm ³)	Gas Oksigen yang Dihasilkan pada Interval Waktu 30 Detik (ml)							
	30	60	90	120	150	180	210	240
0,5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	1,7
1	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,1	2,3
2	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8
3	2,4	2,5	2,7	2,8	3,1	3,2	3,3	3,5
4	3,5	3,6	3,8	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7

3. Buat grafik yang menunjukkan volume gas yang dihasilkan oleh enzim dengan konsentrasi berbeda-beda.
4. Buat kesimpulan hubungan antara perbedaan konsentrasi enzim pada kecepatan reaksi.

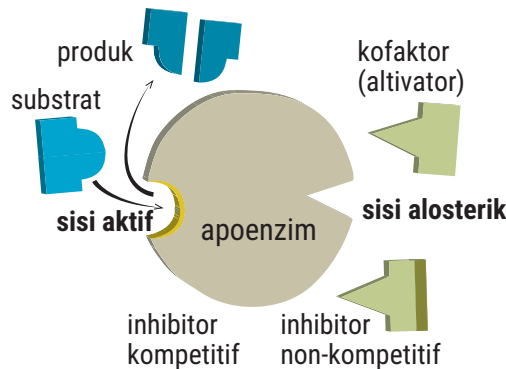
Berdasarkan hasil percobaan di atas, terbukti bahwa perbedaan konsentrasi enzim menyebabkan perbedaan kecepatan reaksi pada rentang waktu yang berbeda. Lalu, bagaimana pengaruh konsentrasi substrat pada kecepatan reaksi? Perhatikan grafik berikut!



▲ Gambar 1.8 Grafik pengaruh konsentrasi substrat terhadap kecepatan reaksi.

Berdasarkan grafik di atas, perbedaan konsentrasi substrat dapat meningkatkan kecepatan reaksi sampai batas tertentu, di mana jika perbandingan antara substrat dan enzim sebanding maka kecepatan reaksinya menjadi konstan.

Kerja enzim juga dipengaruhi oleh inhibitor atau zat penghambat. Perhatikan gambar berikut!

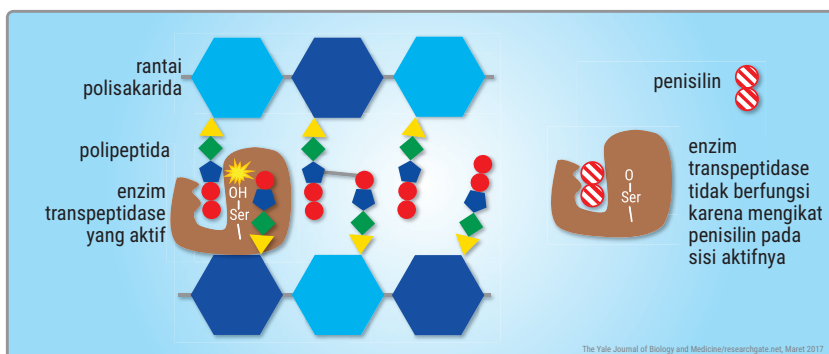


▲ Gambar 1.9 Macam inhibitor enzim.

Berdasarkan gambar di atas, ada dua macam inhibitor enzim, yaitu inhibitor kompetitif dan inhibitor nonkompetitif. Inhibitor kompetitif adalah inhibitor yang mempunyai bentuk permukaan dan ukuran sama dengan sisi aktif sehingga dapat melekat kuat dan menghalangi substrat menempel pada sisi aktif enzim sehingga kerja enzim terhambat. Inhibitor kompetitif dapat dihilangkan dengan menambah konsentrasi substrat.

Adapun inhibitor nonkompetitif adalah inhibitor yang terikat pada sisi alosterik enzim (sisi tidak aktif pada enzim). Inhibitor ini mengakibatkan sisi aktif enzim dapat berubah sehingga substrat tidak dapat menempel dan berikatan dengan sisi aktif enzim. Inhibitor ini tidak dapat dihilangkan walaupun dengan menambahkan konsentrasi substrat.

Lalu, bagaimana inhibitor kompetitif bekerja di dalam sel makhluk hidup? Perhatikan gambar berikut!



▲ Gambar 1.10 Penisilin sebagai inhibitor kompetitif.

Pada gambar di atas terlihat mekanisme kerja inhibitor kompetitif digunakan untuk membunuh bakteri oleh antibiotik penisilin. Penisilin sangat mirip dengan substrat enzim transpeptidase yang mengkatalisis pembentukan dinding sel bakteri. Kemiripan ini menyebabkan sisi aktif enzim transpeptidase melekat dan berikatan dengan penisilin. Akibatnya, dinding sel bakteri gagal terbentuk dan bakteri mati.

● B. Metabolisme

Pada bagian ini, kalian akan diajak untuk mempelajari mengenai metabolisme. Apa saja jenis metabolisme? Dan bagaimana prosesnya? Simak uraiannya sebagai berikut!

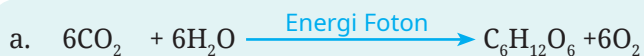
1. Anabolisme dan Katabolisme

Bagaimana jika tidak ada tumbuhan di muka bumi? Akankah makanan tersedia bagi makhluk hidup lain tanpa adanya tumbuhan? Tumbuhan merupakan makhluk hidup yang berperan menyediakan bahan makanan bagi makhluk hidup lain berupa bahan organik. Bagaimanakah proses pembentukan bahan makanan pada tumbuhan? Bagaimanakah makanan dipecah untuk menghasilkan energi? Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.5

Menganalisis Proses Pembentukan dan Pemecahan Senyawa Organik Hasil Fotosintesis

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan reaksi kimia berikut.



3. Jawablah pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah kalian masih ingat reaksi kimia pada bagian (a)? Reaksi apakah itu?
 - b. Apakah jenis energi yang dibutuhkan pada reaksi (a)?
 - c. Jelaskan perubahan jenis senyawa yang terjadi pada reaksi (a)!

- d. Apakah kalian masih ingat reaksi kimia pada bagian (b)? Reaksi apakah itu?
 - e. Apakah jenis energi yang dihasilkan pada reaksi (b)?
 - f. Jelaskan perubahan jenis senyawa yang terjadi pada reaksi (b)!
4. Sajikan hasil diskusi kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas!

Berdasarkan hasil aktivitas di atas, pada reaksi (a) terjadi pembentukan senyawa organik glukosa ($C_6H_{12}O_6$) dari senyawa anorganik $6CO_2$ dan $6H_2O$ yang membutuhkan energi cahaya berupa foton. Proses ini disebut fotosintesis, salah satu contoh anabolisme. Anabolisme disebut juga asimilasi atau sintesis, yaitu rangkaian proses reaksi kimia yang berkaitan dengan proses penyusunan molekul/senyawa kompleks dari molekul/senyawa sederhana atau penyusunan zat dari senyawa/molekul sederhana menjadi senyawa kompleks dengan bantuan enzim.

Proses anabolisme memerlukan energi, baik energi panas, cahaya, atau energi kimia. Anabolisme yang menggunakan energi cahaya disebut fotosintesis, sedangkan anabolisme yang menggunakan energi kimia disebut kemosintesis. Reaksi fotosintesis dan kemosintesis membutuhkan energi sehingga disebut reaksi endergonik.

Pada reaksi (b) terjadi pemecahan senyawa organik glukosa ($C_6H_{12}O_6$) menjadi senyawa anorganik $6 CO_2$ dan $6 H_2O$ dengan menghasilkan energi kimia berupa ATP (*Adenosine Triphosphate*). Proses reaksi ini disebut respirasi, salah satu contoh katabolisme. Katabolisme disebut juga desimilasi, yaitu rangkaian reaksi kimia yang berkaitan dengan proses pembongkaran, penguraian atau pemecahan molekul/senyawa kompleks menjadi molekul/senyawa yang lebih sederhana dengan bantuan enzim. Penguraian senyawa ini menghasilkan atau melepaskan energi berupa molekul ATP sehingga disebut reaksi eksergonik. Selanjutnya, molekul ATP tersebut digunakan organisme untuk beraktivitas.

Katabolisme mempunyai dua fungsi, yaitu menyediakan bahan baku untuk sintesis molekul lain dan menyediakan energi kimia untuk melakukan aktivitas sel. Reaksi yang umum terjadi pada katabolisme berupa reaksi oksidasi. Reaksi kimia yang terjadi pada katabolisme membebaskan sejumlah energi dan disimpan dalam bentuk ATP.

Reaksi anabolisme dan katabolisme merupakan reaksi metabolisme pada makhluk hidup. Jadi, metabolisme merupakan keseluruhan reaksi kimia dalam sel makhluk hidup yang dibantu enzim beserta konsekuensi perubahan energi yang menyertainya.

Untuk mengukur tingkat pemahaman kalian mengenai anabolisme dan katabolisme, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.6

Mengukur Tingkat Pemahaman Mengenai Anabolisme dan Katabolisme

1. Tentukan macam-macam variabel pembeda antara anabolisme dengan katabolisme.
2. Tulis perbedaan anabolisme dan katabolisme berdasarkan variabel pembeda pada tabel berikut.

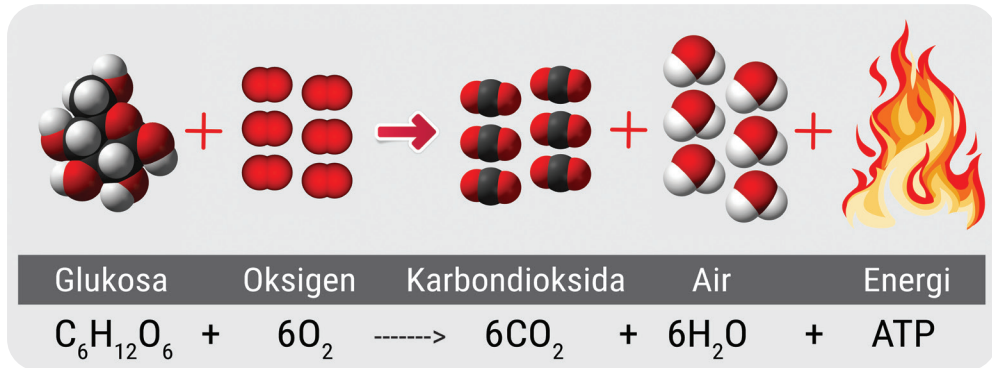
No	Variabel Pembeda	Anabolisme	Katabolisme
1.	Bahan		
2.	Energi		
3.	Tempat berlangsungnya di dalam sel		
4.	Oksigen		
5.	Hasil		

3. Presentasikan tabel perbedaan anabolisme dan katabolisme di depan kelas.

2. Respirasi Seluler

Masih ingatkah kalian organel mitokondria di dalam sel eukariotik? Apakah fungsi mitokondria bagi sel? Dan seberapa penting fungsi mitokondria bagi sel?

Mitokondria berfungsi sebagai penyedia energi (ATP) bagi seluruh aktivitas hidup sel. Mitokondria mampu menyediakan energi melalui aktivitas respirasi. Untuk memahami reaksi kimia sel, perhatikan gambar berikut.

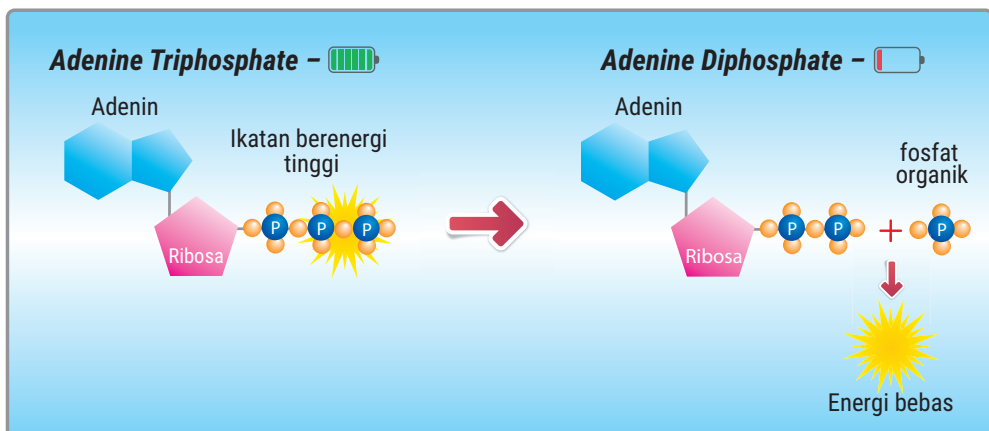


▲ Gambar 1.11 Persamaan reaksi respirasi aerob.

Pada gambar di atas terlihat bahan dasar respirasi berupa glukosa. Glukosa (molekul organik kompleks) dioksidasi oleh oksigen akan terpecah menghasilkan ATP dengan hasil samping berupa CO₂ dan H₂O (molekul anorganik sederhana).

Tujuan utama respirasi untuk menghasilkan energi (ATP). Respirasi dapat melalui reaksi oksidasi yang diperantarai oksigen sehingga disebut respirasi aerob. Jika respirasi tidak menggunakan oksigen disebut, respirasi anaerob. Selain respirasi anaerob, pembentukan ATP tanpa oksigen dapat juga terjadi melalui fermentasi.

Energi kimia hasil respirasi berbentuk senyawa kimia yang disebut ATP. Berikut struktur ATP dan bagaimana energi di dalam molekul ATP dilepaskan.

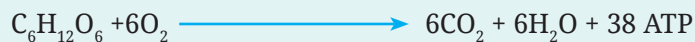


▲ Gambar 1.12 Struktur ATP.

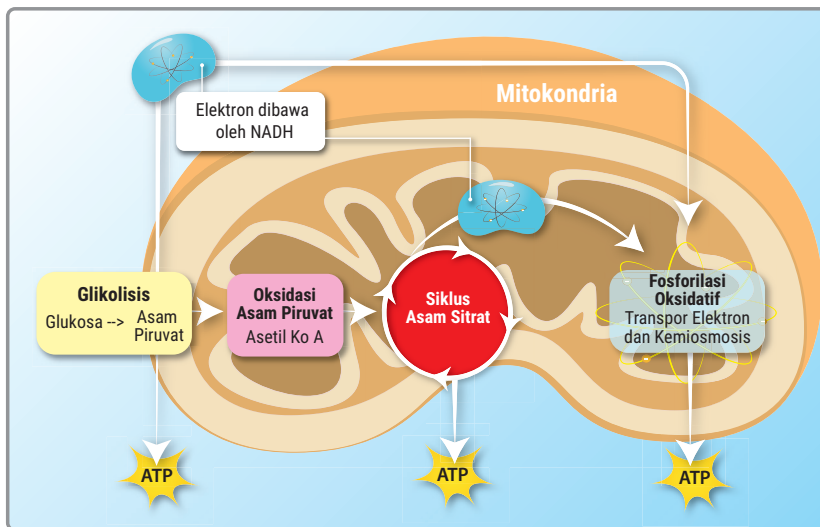
Pada gambar 1.12, terlihat proses pelepasan energi bebas dari energi kimia yang berupa ATP. ATP yang mempunyai gugus fosfat berenergi tinggi melepaskan satu ikatan fosfat untuk melepaskan energi bebas yang dapat digunakan untuk aktivitas sel. Setelah ATP melepaskan satu ikatan fosfat, ATP berubah menjadi ADP (*Adenosine Diphosphate*).

a. Tahapan Respirasi Aerob

Umumnya, respirasi aerob menggunakan substrat glukosa. Glukosa mempunyai rantai karbon 6 (C_6) akan dipecah menjadi karbon dioksida yang memiliki 1 atom karbon (C_1) dan air (H_2O). Secara sederhana, reaksi kimia respirasi aerob ditulis sebagai berikut.



Meskipun reaksinya terlihat sederhana, proses pemecahan glukosa (C_6) menjadi CO_2 (C_1) berlangsung secara bertahap. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 1.13 Tahapan respirasi aerob.

Tahapan respirasi aerob ada empat, yaitu glikolisis berlangsung di sitosol sitoplasma, dekarboksilasi oksidatif (oksidasi asam piruvat) berlangsung di matriks mitokondria, siklus Krebs (siklus asam sitrat) berlangsung di matriks mitokondria, dan transpor elektron berlangsung di membran krista mitokondria. Bagaimanakah urutan reaksi kimia

pada masing-masing tahap dalam respirasi aerob? Marilah kita pelajari satu persatu.

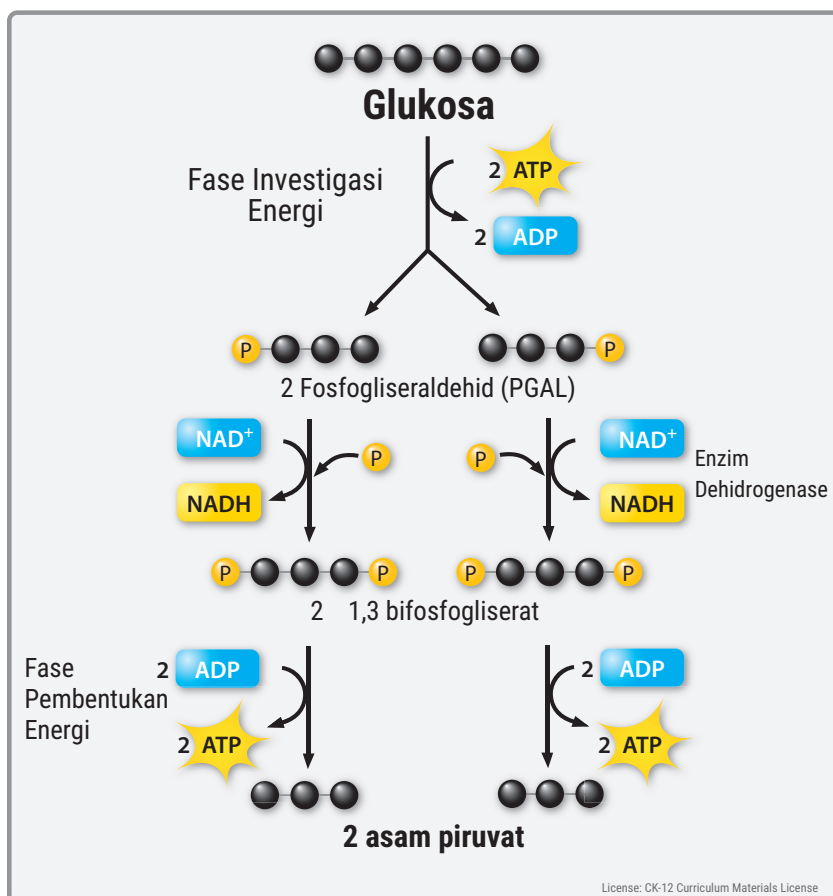
1) Glikolisis

Apa itu glikolisis? Apakah bahan dasarnya? Bagaimana tahap-tahapnya dan apa hasilnya? Lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.7

Menganalisis Tahapan Glikolisis

1. Bentuklah kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan tahapan reaksi kimia berikut.

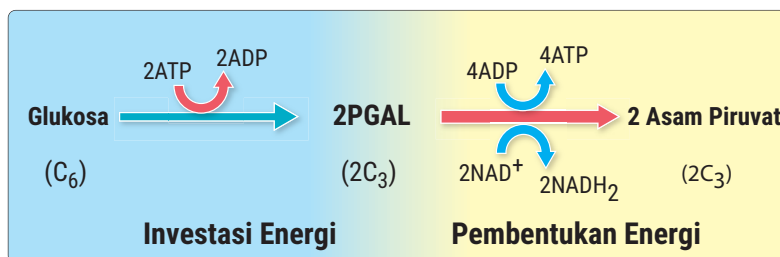


▲ Gambar 1. 14 Glikolisis.
Sumber: CK-12 Foundation (2020)

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah substrat yang digunakan pada glikolisis?
 - b. Ada berapa tahapan utama pada glikolisis?
 - c. Apa yang terjadi pada tahap investasi energi dan berapa jumlah energi yang digunakan?
 - d. Apa yang terjadi pada tahap pembentukan energi dan berapa jumlah energi yang dihasilkan?
 - e. Berapa jumlah energi (ATP) bersih yang dihasilkan pada reaksi glikolisis?
 - f. Enzim apa yang mengkatalisis pembentukan NADH pada reaksi glikolisis?
 - g. Senyawa apa sajakah yang dihasilkan pada reaksi glikolisis?
 - h. Berdasarkan Gambar 1.14, coba rumuskan pengertian glikolisis!
4. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.7, kalian telah mengetahui bahwa substrat atau bahan dalam glikolisis berupa glukosa (C_6). Adapun tahapannya ada dua, yaitu tahapan investasi energi membutuhkan 2 ATP dan tahapan pembentukan energi dihasilkan 4 ATP. Artinya, ATP bersih yang dihasilkan pada glikolisis sebanyak 2 ATP. Adapun hasil utama glikolisis berupa 2 asam piruvat ($2C_3$) dan hasil sampingnya berupa 2 ATP dan 2 NADH.

NADH merupakan koenzim yang terbentuk dari NAD^+ (*Nicotinamide Adenine Dinucleotide*) yang mengikat elektron berenergi tinggi (e^-) dan satu proton (H^+) dari hasil reaksi pembongkaran ikatan kimia antara karbon dengan hidrogen pada senyawa 2 PGAL (*Phospho Gliseraldehid*). Pembentukan NADH dikatalisis oleh enzim dehidrogenase. Secara sederhana, glikolisis dapat digambarkan dalam bagan berikut.



▲ Gambar 1.15 Bagan tahapan glikolisis.

Berdasarkan Gambar 1.15, dapat dirumuskan bahwa glikolisis adalah peristiwa pemecahan satu molekul glukosa (6 atom C) menjadi 2 asam piruvat (3 atom C) yang berlangsung di sitosol sitoplasma dalam kondisi anaerob (tanpa oksigen) dengan hasil sampingan berupa 2 molekul NADH dan 2 molekul ATP.

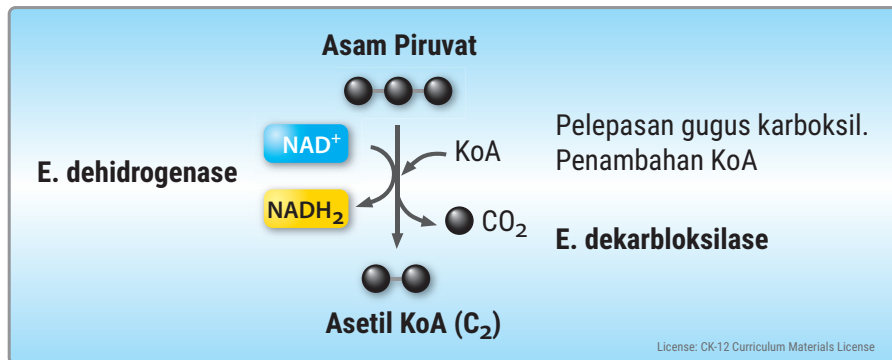
2) Dekarboksilasi oksidatif

Selanjutnya, dua molekul asam piruvat ($2C_3$), hasil utama glikolisis akan memasuki tahap dekarboksilasi oksidatif. Apa itu dekarboksilasi oksidatif? Apakah bahannya? Bagaimana tahapannya dan apa hasilnya? Lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.8

Menganalisis Tahapan Dekarboksilasi Oksidatif

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut!



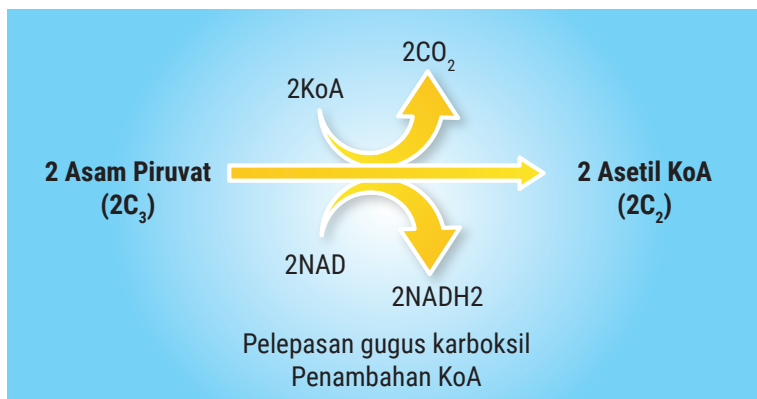
▲ Gambar 1.16 Dekarboksilasi oksidatif.
Sumber: CK-12 Foundation (2020)

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah substrat yang digunakan pada reaksi dekarboksilasi oksidatif?
 - b. Ada berapa tahapan utama pada reaksi dekarboksilasi oksidatif?
 - c. Apa yang terjadi pada tahap pelepasan gugus karboksil dan apa hasilnya?
 - d. Apa yang terjadi pada tahapan penambahan KoA dan apa hasilnya?

- e. Enzim apakah yang mengkatalisis pembentukan CO_2 dan NADH pada reaksi dekarboksilasi oksidatif?
 - f. Senyawa apa sajakah yang dihasilkan pada reaksi dekarboksilasi oksidatif?
 - g. Berdasarkan Gambar 1.16, coba rumuskan pengertian dekarboksilasi oksidatif!
4. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.8, kalian telah menemukan bahwa substrat atau bahan dalam dekarboksilasi oksidatif berupa 2 asam piruvat (2C_3). Adapun tahapannya ada dua. Pertama, tahap pelepasan gugus karboksil dari asam piruvat yang menghasilkan 2CO_2 dan hasil sampingan 2NADH . Pembentukan 2CO_2 dikatalisis oleh enzim dekarboksilase dan pembentukan 2NADH dikatalisis enzim dehidrogenase.

Kedua, penambahan 2KoA pada 2 asam piruvat yang telah kehilangan gugus karboksilnya sehingga terbentuk 2 asetil KoA (2C_2). Secara sederhana, dekarboksilasi oksidatif dapat digambarkan dalam bagan berikut.



▲ Gambar 1.17 Bagan dekarboksilasi oksidatif.

Berdasarkan bagan di atas, dapat dirumuskan bahwa dekarboksilasi oksidatif adalah peristiwa pelepasan gugus karboksil dari asam piruvat (2C_3) dan penambahan molekul KoA sehingga menghasilkan Asetil KoA (2C_2) dalam suasana aerob yang berlangsung di matriks mitokondria dengan hasil samping berupa 2CO_2 dan 2NADH .

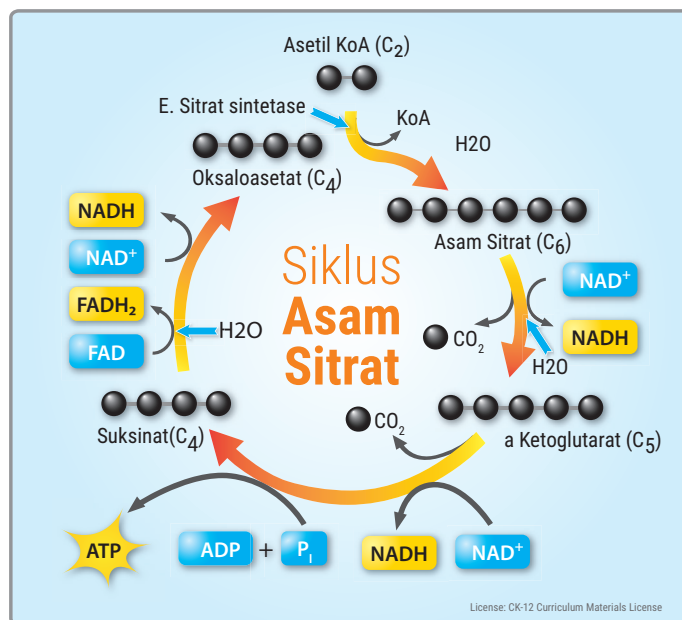
3) Siklus Krebs atau siklus asam sitrat

Selanjutnya, dua molekul Asetil KoA ($2C_2$), hasil utama dekarboksilasi akan memasuki tahap siklus Krebs. Apa itu siklus Krebs? Apakah bahannya? Bagaimana tahapannya dan apa hasilnya? Lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.9

Menganalisis Tahapan Siklus Krebs

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut.



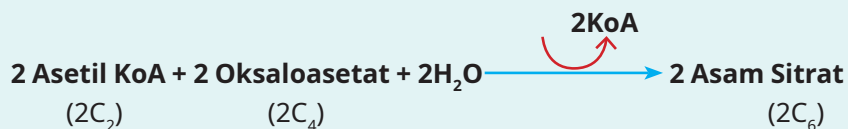
▲ Gambar 1.18 Siklus Asam Sitrat
Sumber: CK-12 Foundation (2020)

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah substrat yang digunakan pada reaksi siklus Krebs?
 - b. Senyawa apa yang mengikat 2 asetil KoA pada saat memasuki siklus Krebs?
 - c. Ada berapa tahapan utama reaksi pada siklus Krebs?
 - d. Pada tahapan mana sajakah H_2O ditambahkan?
 - e. Pada tahapan manakah ATP dihasilkan?
 - f. Pada tahapan mana sajakah NADH dihasilkan?
 - g. Pada tahapan mana sajakah $FADH_2$ dihasilkan?
 - h. Enzim apakah yang mengkatalisis pembentukan asam sitrat?

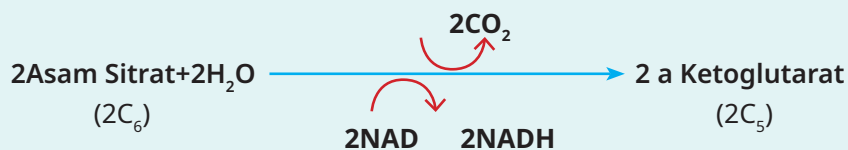
- i. Senyawa apa sajakah yang dihasilkan pada siklus Krebs?
 - j. Berdasarkan Gambar 1.18, coba rumuskan pengertian siklus Krebs!
4. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.9, kalian telah menemukan bahwa substrat atau bahan dalam siklus Krebs berupa 2 asetil KoA ($2C_2$) yang terjadi dalam 5 tahapan utama, yaitu:

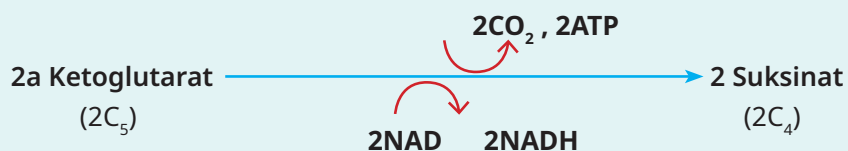
- a. Pengikatan 2 asetil KoA oleh 2 oksaloasetat dengan penambahan $2H_2O$ untuk membentuk 2 asam sitrat yang dikatalisis oleh enzim sitrat sintase.



- b. Pelepasan satu ikatan karbon pada masing-masing asam sitrat setelah penambahan $2H_2O$ untuk membentuk 2 α ketoglutarat dengan melepaskan $2CO_2$ dan $2NADH$. Pembentukan $2CO_2$ dikatalisis oleh enzim dekarboksilase dan pembentukan $2NADH$ dikatalisis enzim dehidrogenase.



- c. Pelepasan satu ikatan karbon pada masing-masing 2 α ketoglutarat untuk membentuk 2 suksinat dengan melepaskan $2CO_2$ dan $2ATP$ serta $2NADH$ dan pembentukan $2NADH$ dikatalisis enzim dehidrogenase.

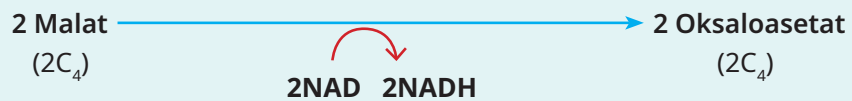


- d. Perubahan 2 suksinat menjadi 2 malat setelah mengalami penambahan $2H_2O$ dengan menghasilkan $FADH_2$. Pembentukan $FADH_2$ dikatalisis

enzim dehidrogenase. FADH_2 merupakan koenzim (FAD^+ atau *Flavo Adenine Dinucleotide*) yang mengikat elektron berenergi tinggi (H^{2+}) dan satu proton (e) dari hasil reaksi pembongkaran ikatan kimia antara karbon dengan hidrogen pada 2 suksinat.



- e. Perubahan 2 malat menjadi 2 oksaloasetat melalui reaksi isomerase yang menghasilkan 2NADH. Pembentukan 2NADH dikatalisis enzim dehidrogenase.



Berdasarkan bagan di atas, dapat dirumuskan bahwa siklus Krebs adalah peristiwa pemecahan 2 asetil KoA (2C_2) untuk menghasilkan 4CO_2 (4C_1) dalam suasana anaerob yang berlangsung di matrik mitokondria dengan hasil sampingan berupa 2ATP, 6NADH, dan 2FADH_2 .

4) Fosforilasi oksidatif: transpor elektron dan kemiosmosis

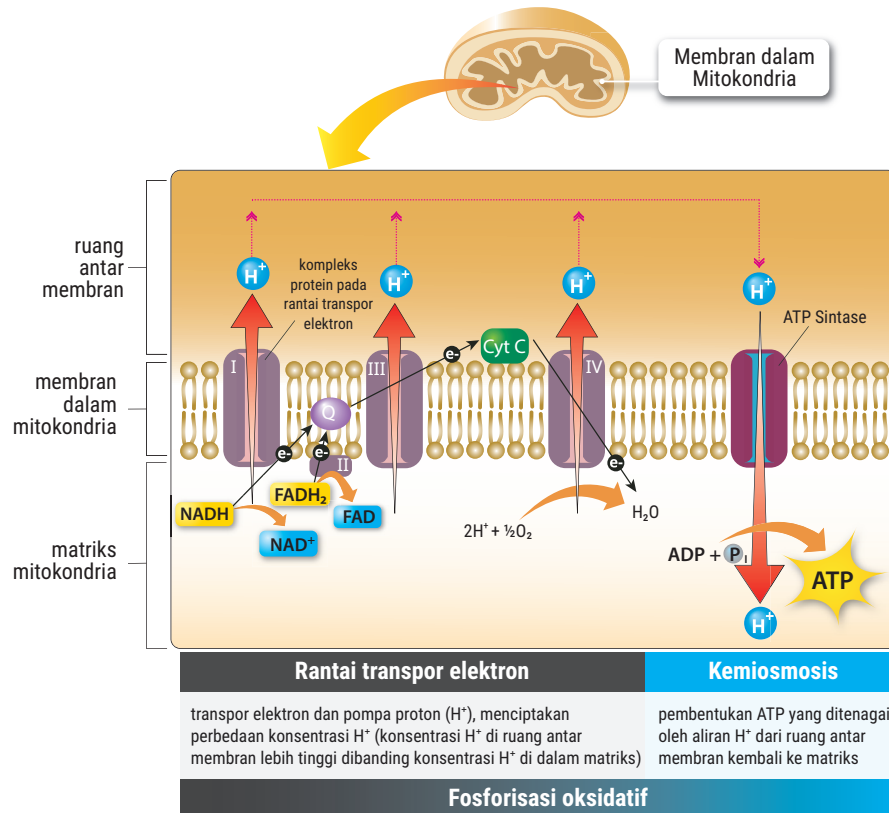
Transpor elektron merupakan tahap terakhir dalam respirasi aerob. Sebelumnya, pada tahap glikolisis dihasilkan 2 NADH, pada dekarboksilasi oksidatif dihasilkan 2NADH dan pada siklus Krebs dihasilkan 6NADH dan 2FADH_2 . Dengan demikian, jumlah keseluruhan dari ketiga tahap tersebut dihasilkan 10NADH dan 2FADH_2 . Selain itu, dihasilkan energi sebanyak 2 ATP pada glikolisis dan 2 ATP pada siklus Krebs. Dengan demikian, baru dihasilkan 4 ATP.

Selanjutnya, 10 NADH dan 2FADH_2 akan menjadi bahan utama dalam transpor elektron yang berlangsung di membran krista mitokondria dalam suasana aerob untuk dikonversi menjadi ATP. Agar kalian dapat memahami apakah transpor elektron dan berapakah energi yang dihasilkan, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.10

Menganalisis Tahapan Transpor Elektron

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut!



▲ Gambar 1.19 Fosforilasi oksidatif.

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Penyusun utama rantai transpor elektron berupa kompleks protein I, II, III, dan IV pada membran krista mitokondria. Tanda panah berwarna emas pada Gambar 1.19 menunjukkan jalur transpor elektron. Kompleks protein nomor berapakah yang pertama menerima elektron dari $NADH$?
 - b. Kompleks protein nomor berapa sajakah yang dilalui elektron yang berasal dari $NADH$?
 - c. Kompleks protein nomor berapakah yang pertama menerima elektron dari $FADH_2$?

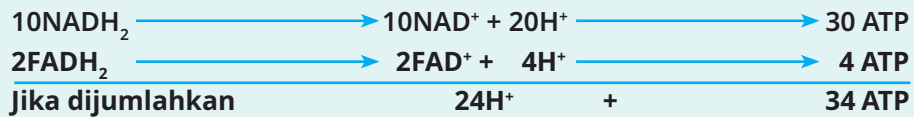
- d. Kompleks protein nomor berapa sajakah yang dilalui elektron yang berasal dari FADH_2 ?
 - e. Bagaimanakah NADH dan FADH_2 dikonversi menjadi ATP?
 - f. Berapakah ATP yang dihasilkan dari konversi NADH dan FADH_2 ?
 - g. Berapakah NADH dan FADH_2 yang dihasilkan pada proses respirasi aerob?
 - h. Berapakah total ATP yang dihasilkan pada transpor elektron?
 - i. Pada Gambar 1.19, elektron yang sudah ditranspor hingga mencapai kompleks protein IV akan diberikan pada O_2 sebagai akseptor elektron terakhir. Zat apakah yang akan terbentuk dari proses tersebut?
 - j. Berdasarkan Gambar 1.19, coba rumuskan pengertian transpor elektron!
4. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.10, kalian telah menemukan bahwa 10 NADH dan 2 FADH_2 dikonversi menjadi ATP. Di mana setiap 1 molekul NADH akan dikonversi menjadi 3 ATP dengan menghasilkan 1 molekul air. Sementara itu, setiap 1 molekul FADH_2 akan dikonversi menjadi 2 ATP dengan menghasilkan 1 molekul air.

Konversi energi diawali dari pemecahan ikatan hidrogen NADH dan FADH_2 . Pelepasan ikatan hidrogen ini akan diikuti pemancaran energi yang akan dikonversi menjadi ATP melalui kemiosmosis pada membran krista mitokondria.

Kemiosmosis terjadi karena H^+ yang kaya energi dari hasil pemecahan dari NADH_2 dan FADH_2 terus dipompa menuju ruang antarmembran yang menyebabkan konsentrasi H^+ dalam ruang antarmembran meningkat. Selanjutnya, H^+ berpindah menuruni gradien konsentrasinya dari ruang antarmembran kembali lagi ke matriks. Perpindahan ini hanya dapat melalui ATP sintase pada membran krista mitokondria. Aliran H^+ melepaskan energi bagi ATP sintase untuk melakukan fosforilasi (penambahan gugus fosfat) pada ADP sehingga menghasilkan ATP.

Secara sederhana, berikut konversi energi dalam bentuk ATP dari 10NADH_2 dan 2FADH_2 .



Selanjutnya, 24H^+ mendonorkan elektronnya ke oksigen sehingga terbentuk senyawa $12\text{H}_2\text{O}$. Pada kondisi ini, H^+ sebagai donor elektron dan oksigen sebagai resipien elektron terakhir pada respirasi aerob.

Dengan demikian, tahap transpor elektron dengan bahan 10NADH_2 dan 2FADH_2 menghasilkan 34 ATP dan $12\text{H}_2\text{O}$. Dengan mengacu hasil analisis di atas, dapat dirumuskan bahwa transpor elektron adalah peristiwa konversi energi dari 10NADH_2 dan 2FADH_2 yang berlangsung di membran krista mitokondria dalam suasana aerob dengan hasil utama 34 ATP dan hasil sampingan berupa $12\text{H}_2\text{O}$.

Berdasarkan uraian dari keempat tahap respirasi aerob dapat disimpulkan bahwa selama proses tersebut dihasilkan 38 ATP dengan rincian sebagai berikut.

Proses	Masukan Energi	Hasil
Glikolisis	$2\text{ ATP} + 2\text{NADH}_2$ ($2 \times 3\text{ ATP}$)	8 ATP
Dekarboksilasi oksidatif	2NADH_2 ($2 \times 3\text{ATP}$)	6 ATP
Siklus Krebs	$2\text{ ATP} + 6\text{NADH}_2$ ($6 \times 3\text{ ATP}$) + 2FADH_2 ($2 \times 2\text{ ATP}$)	24 ATP
Jumlah Energi yang dihasilkan		38 ATP

AKTIVITAS 1.11

Mengukur Tingkat Pemahaman tentang Tahapan Respirasi Aerob

1. Tentukan macam-macam variabel pembeda antara glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs dan transpor elektron.
2. Buat tabel seperti di bawah ini. Kemudian, tulis perbedaan antara glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs, dan transpor elektron berdasarkan variabel pembedanya masing-masing.

No	Variabel Pembeda	Glikolisis	Dekarboksilasi Oksidatif	Siklus Krebs	Transpor Elektron
1					
2					
3					
4					
5					
6.					

3. Presentasikan tabel kalian di depan kelas.

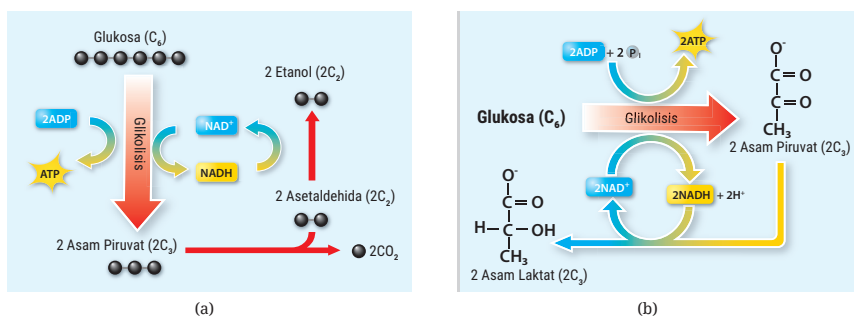
b. Fermentasi

Pernahkan kalian melihat proses pembuatan tape dan roti? Proses pembuatan tape atau roti melibatkan proses fermentasi. Apakah yang sudah kalian pahami tentang fermentasi? Bagaimanakah tahap-tahap fermentasi? Apakah produk fermentasi yang diperlukan dalam pembuatan tape dan roti? Agar dapat memahami fermentasi, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.12

Menganalisis Tahapan Fermentasi

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 1.20 Reaksi fermentasi

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah substrat yang digunakan untuk kedua reaksi kimia pada Gambar 1.20?

- b. Apakah kedua reaksi kimia pada Gambar 1.20 melalui tahap glikolisis?
 - c. Setelah tahap glikolisis, apakah tahapan selanjutnya pada gambar (a)? Mengapa tahap ini terjadi dan berbeda dengan respirasi aerob?
 - d. Setelah tahap glikolisis, apakah tahapan selanjutnya pada gambar (b)? Mengapa tahap ini terjadi dan berbeda dengan respirasi aerob?
 - e. Bagaimanakah hasil akhir reaksi kimia pada gambar (a)?
 - f. Bagaimanakah hasil akhir reaksi kimia pada gambar (b)?
 - g. Temukan perbedaan antara reaksi kimia gambar (a) dan (b)!
 - h. Apakah nama jenis fermentasi pada gambar (a)?
 - i. Apakah nama jenis fermentasi pada gambar (b)?
 - j. Berdasarkan reaksi kimia pada Gambar 1.20, coba rumuskan pengertian fermentasi!
4. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.12, kalian menemukan bahwa ada dua macam fermentasi, yaitu fermentasi alkohol dan asam laktat. Substrat kedua fermentasi tersebut berupa glukosa. Pada tahap pertama fermentasi alkohol dan asam laktat, glukosa akan mengalami glikolisis yang menghasilkan 2 asam piruvat, 2 ATP, dan 2NADH.

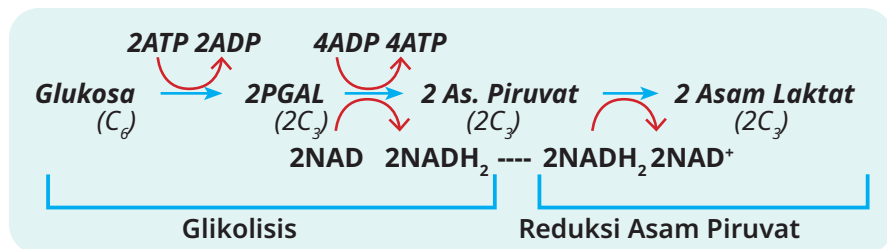
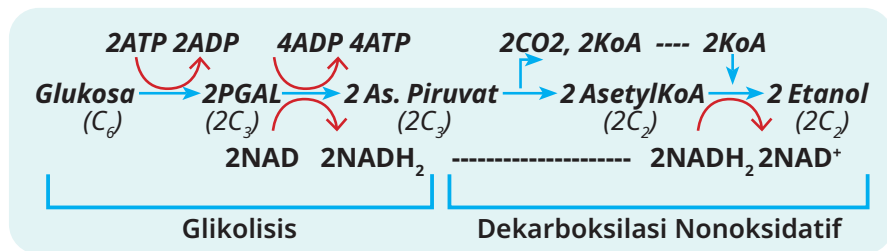
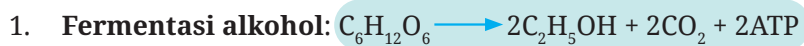
Tahap kedua fermentasi alkohol, yaitu dekarboksilasi nonoksidatif. Hal ini terjadi karena tidak tersedianya oksigen pada membran krista mitokondria. Dekarboksilasi nonoksidatif merupakan reaksi reduksi 2 asam piruvat ($2C_3$) oleh 2NADH menjadi 2 etil alkohol atau 2 etanol ($2C_2$) dengan hasil sampingan berupa $2CO_2$. Gas karbon dioksida inilah yang berfungsi mengembangkan adonan roti. Konsekuensi dari proses ini hanya dihasilkan 2 ATP, lebih sedikit dibandingkan respirasi aerob. Berdasarkan hasil akhirnya yang berupa senyawa alkohol maka disebut dengan fermentasi alkohol.

Adapun tahap kedua fermentasi asam laktat juga dalam kondisi tanpa oksigen. Pada tahap ini terjadi reduksi 2 asam piruvat ($2C_3$) oleh 2 NADH menjadi 2 asam laktat ($2C_3$) sehingga tidak ada pelepasan $2CO_2$. Oleh karena hasil akhirnya berupa senyawa asam laktat maka disebut dengan

fermentasi asam laktat. Fermentasi asam laktat terjadi pada sel-sel otot ketika ketersediaan oksigen sedikit.

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa fermentasi alkohol adalah pemecahan molekul organik (glukosa) yang berlangsung secara anaerob dengan menghasilkan 2 etanol, 2 ATP, dan 2CO₂. Adapun fermentasi asam laktat adalah pemecahan molekul organik (glukosa) yang berlangsung secara anaerob dengan menghasilkan 2 asam laktat dan 2 ATP.

Secara sederhana, rangkaian tahapan fermentasi alkohol dan asam laktat digambarkan pada bagan berikut.



Berdasarkan bagan fermentasi di atas, kalian memahami bahwa fermentasi terjadi karena ketidakterediaan O₂ sehingga hasil energinya rendah.

Setelah mempelajari tahapan respirasi aerob dan anaerob, ukur tingkat pemahaman kalian dengan melakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.13

Mengukur Tingkat Pemahaman tentang Respirasi Aerob dan Anaerob

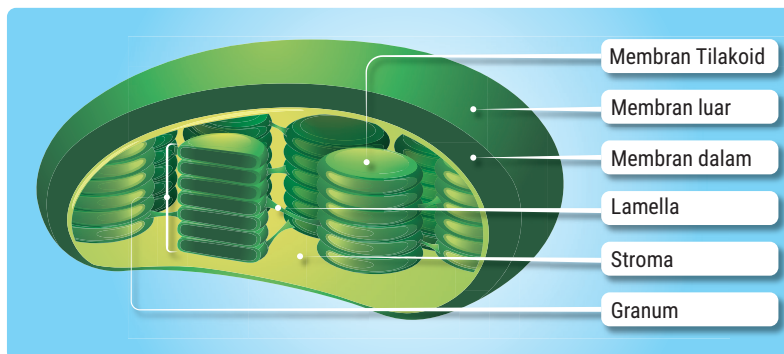
1. Tentukan macam-macam variabel pembeda antara respirasi aerob dengan anaerob!
2. Buat tabel seperti di bawah ini. Kemudian, tulis perbedaan antara respirasi aerob dengan anaerob berdasarkan variabel pembedanya masing-masing.

No	Variabel Pembeda	Respirasi Aerob	Respirasi Anaerob
1			
2			
3			
4			
5			

3. Presentasikan tabel kalian di depan kelas.

3. Fotosintesis

Ketika belajar struktur dan fungsi sel di kelas XI, kalian telah mempelajari organel kloroplas. Masih ingatkah kalian bagaimana struktur kloroplas? Struktur kloroplas terdiri atas dua bagian utama, yaitu grana dan stroma. Perhatikan gambar berikut.



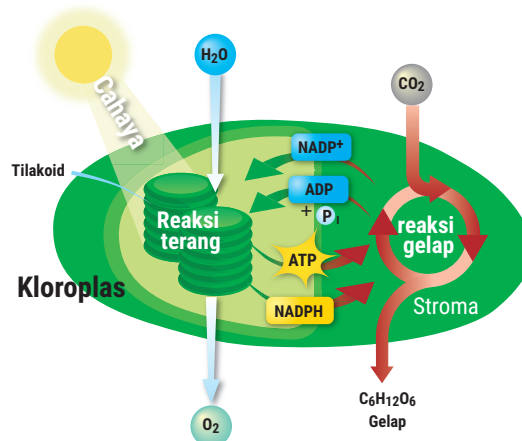
▲ Gambar 1.21 Struktur kloroplas.

Grana terbungkus oleh membran tilakoid dan mengandung klorofil. Macam klorofil di dalam kloroplas, yaitu klorofil a, b, dan karotenoid.

Klorofil a ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) berperan menyerap terutama cahaya merah, biru, dan ungu. Klorofil b ($C_{55}H_{70}O_5N_4Mg$) berperan menyerap cahaya biru dan oranye. Adapun karotenoid merupakan pigmen kuning oranye yang menyerap cahaya biru-hijau.

Pada membran tilakoid terdapat penangkap cahaya yang disebut fotosistem. Ada dua pusat reaksi, yaitu fotosistem I (FS I) dan fotosistem II (FS II). Pada FS I mengandung klorofil a dan karotenoid sehingga mampu menyerap energi cahaya maksimum pada panjang gelombang 700 nm (P 700). Adapun pada FS II mengandung klorofil a dan klorofil b (P 680) yang efektif menyerap cahaya dengan panjang gelombang 680 nm.

Berdasarkan analisis struktur fungsi kloroplas di atas terlihat bagian grana terjadi reaksi fotosintesis yang membutuhkan energi cahaya (foton) karena memiliki pigmen klorofil dan pigmen lainnya. Adapun di stroma tidak membutuhkan cahaya. Reaksi fotosintesis yang membutuhkan cahaya di grana disebut reaksi terang. Dan reaksi fotosintesis yang tidak membutuhkan cahaya di stroma disebut reaksi gelap. Berikut bagan reaksi terang dan reaksi gelap.



▲ Gambar 1.22 Keterkaitan reaksi terang dan reaksi gelap pada fotosintesis.

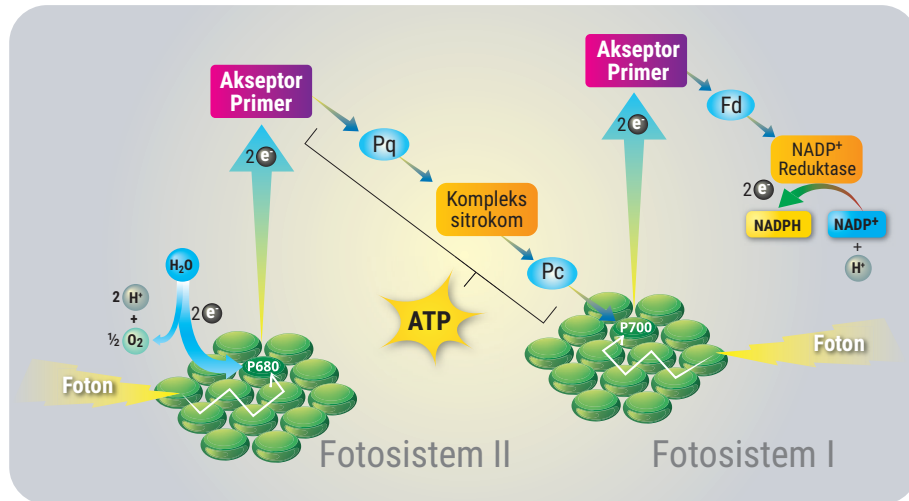
a. Reaksi terang

Untuk memahami apa itu reaksi terang, bagaimana tahapannya, dan apakah hasil reaksinya, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.14

Menganalisis mengenai Reaksi Terang

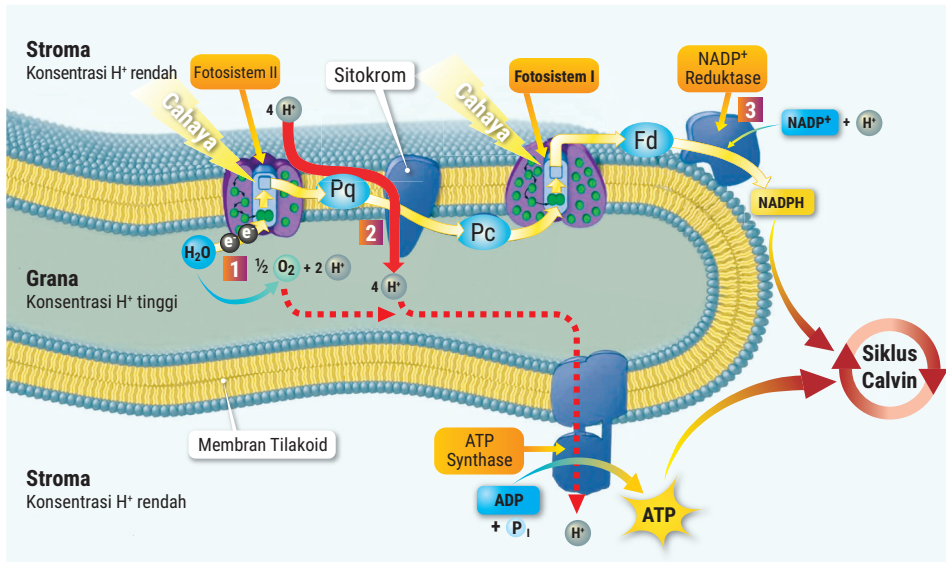
1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan gambar reaksi terang nonsiklik berikut.



▲ Gambar 1.23 Fotofosforilasi nonsiklik.

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apa bahan utama yang digunakan untuk reaksi terang?
 - b. Apakah jenis energi yang digunakan untuk reaksi terang?
 - c. Ada berapakah tahapan utama pada reaksi terang nonsiklik?
 - d. Apakah yang terjadi pada tahap aktivasi klorofil?
 - e. Apakah yang terjadi pada tahap fotofosforilasi nonsiklik?
 - f. Apakah yang terjadi pada tahapan fotolisis?
 - g. Apakah hasil akhir pada reaksi terang?
 - h. Apakah tujuan reaksi terang?
4. Berdasarkan analisis kalian, coba rumuskan pengertian reaksi terang.
5. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.14, kalian menemukan bahwa bahan utama dalam reaksi terang berupa H₂O. Adapun energi yang dibutuhkan berupa foton. Reaksi terang fotosintesis berlangsung dalam beberapa tahap. Perhatikan proses reaksi terang pada Gambar 1.23 berikut.



▲ Gambar 1.24 Reaksi terang.

Berikut empat tahap dalam reaksi terang fotosintesis.

1) Aktivasi klorofil

Tahap awal fotosintesis dimulai ketika klorofil dari FS II (P680) menerima energi cahaya berupa foton. Energi ini digunakan untuk menambah energi bagi elektron pada FS II, elektron kaya energi tereksitasi (dikeluarkan) dan berpindah-pindah melalui akseptor-akseptor elektron untuk dimanfaatkan energinya.

2) Fotolisis

Karena FS II telah kehilangan elektronnya, elektron tersebut digantikan oleh elektron yang berasal dari fotolisis air. Fotolisis adalah peristiwa pemecahan H_2O menggunakan foton menjadi $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$. Oksigen yang dihasilkan pada fotosintesis merupakan produk fotolisis air.

3) Fotofosforilasi nonsiklik

Elektron pada FS II yang tereksitasi berpindah menuju FS I melalui rantai transpor elektron yang tersusun atas plastokuinon (Pq), kompleks sitokrom, dan protein yang disebut plastosianin (Pc). Ketika elektron

melalui sitokrom, energinya digunakan untuk membentuk ATP. Energi dari elektron digunakan oleh sitokrom untuk memindahkan H^+ dari stroma ke ruang tilakoid sehingga konsentrasi H^+ di ruang tilakoid meningkat. Peningkatan konsentrasi H^+ memicu kemiosmosis, yaitu perpindahan H^+ menuruni gradien konsentrasinya kembali ke stroma. Perpindahan ini hanya dapat terjadi melalui ATP sintase. Ketika H^+ melalui ATP sintase, energinya digunakan untuk menambahkan gugus fosfat ada ADP membentuk ATP.

Selanjutnya, elektron akan menuju dan masuk ke FS I (P700). Terserapnya foton oleh FS I menyebabkan elektron tersebut tereksitasi kembali dan diterima akseptor feredoksin. Kemudian, elektron ditransfer ke $NADP^+$ yang juga mengikat H^+ membentuk NADPH (*Nicotin Adenin Dinukleotida Fosfat Hidrogen*). Proses pembentukan NADPH dikatalis oleh enzim $NADP^+$ reduktase. Lintasan elektron berenergi tinggi yang berasal dari FS II dan menuju ke FS I dan berakhir di NADPH disebut fotofosforilasi nonsiklik.

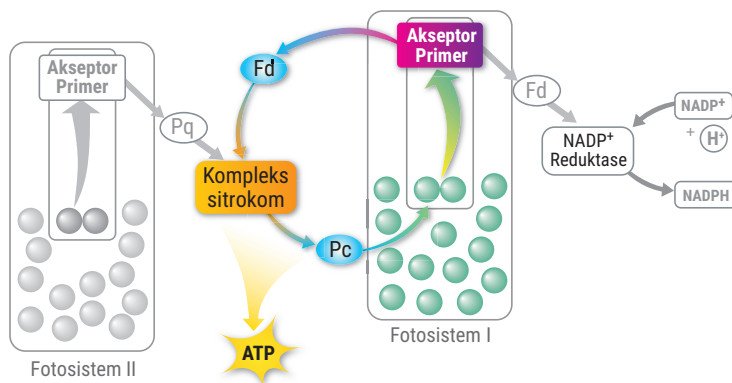
4) Fotofosforilasi siklik

Untuk memahami tahapan dalam fotofosforilasi siklik, lakukan kegiatan berikut.

AKTIVITAS 1.15

Menganalisis Mengenai Fosforilasi Siklik

1. Lakukan kegiatan ini dengan teman sebangku kalian.
2. Amati gambar berikut.



▲ Gambar 1.25 Fotofosforilasi siklik.

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.
 - a. Tuliskan akseptor-akseptor elektron yang menerima elektron dari FS I pada fotofosforilasi siklik?
 - b. Apakah produk yang dihasilkan dalam fotofosforilasi siklik?
 - c. Apa perbedaan fotofosforilasi siklik dan nonsiklik? Jelaskan!
4. Berdasarkan analisis kalian, coba simpulkan apa yang dimaksud dengan fotofosforilasi siklik.
5. Buat tabel perbedaan antara fotofosforilasi nonsiklik dan siklik!

Setelah melakukan Aktivitas 1.15, kalian telah memahami bahwa elektron yang telah memasuki FS I dapat memiliki jalur siklik ketika elektron tersebut diberikan ke sitokrom oleh feredoksin bukan pada NADP^+ . Oleh karena itu, NADPH tidak dihasilkan pada fotofosforilasi siklik. Ketika elektron melalui sitokrom, energinya digunakan untuk membentuk ATP melalui kemiosmosis. Selanjutnya, elektron tersebut berpindah ke Pc untuk dikembalikan ke FS. Elektron tersebut akan tereksitasi kembali oleh foton dan akan memiliki siklus yang sama.

Berdasarkan 4 tahapan reaksi terang di atas terlihat bahwa ATP dihasilkan pada saat fotofosforilasi siklik, sedangkan fotofosforilasi nonsiklik menghasilkan ATP dan NADPH. Hasil sampingan fotosintesis berupa O_2 dihasilkan pada saat fotolisis. Selain itu, pada reaksi terang terjadi transformasi energi cahaya (foton) menjadi energi kimia berupa ATP dan NADPH yang akan dijadikan sumber energi untuk reaksi gelap. Berdasarkan hal tersebut dapat merumuskan bahwa tujuan reaksi terang untuk menyediakan energi yang akan digunakan pada tahap fotosintesis reaksi gelap.

Berdasarkan Aktivitas 1.14 dan 1.15 dapat dirumuskan pengertian reaksi terang adalah proses transformasi energi cahaya (foton) menjadi energi kimia yang digunakan pada reaksi gelap. Reaksi terang dapat terjadi melalui fotofosforilasi nonsiklik dan siklik.

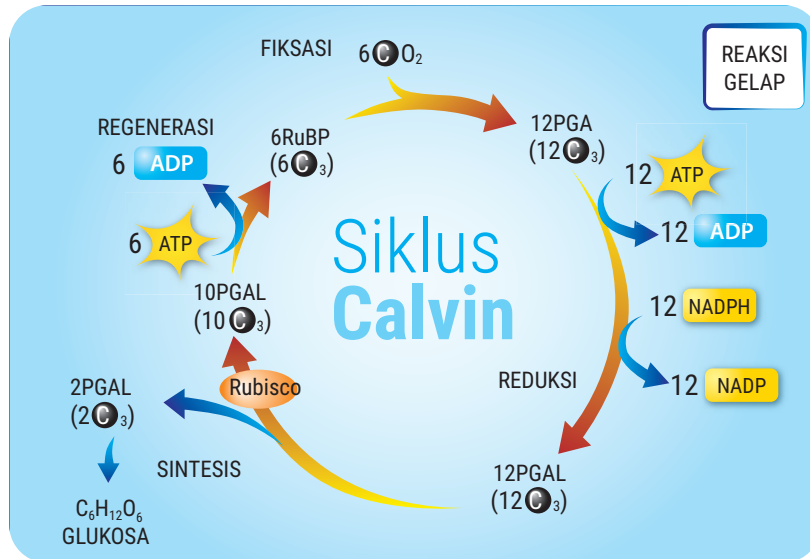
b. Reaksi Gelap

Untuk memahami lebih dalam apa itu reaksi gelap, bagaimana tahapannya, dan apa hasil reaksinya, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.16

Menganalisis Mengenai Reaksi Gelap

1. Bentuklah kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 1.26 Siklus Calvin.

3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah bahan utama yang digunakan pada reaksi gelap?
 - b. Senyawa apakah yang berfungsi untuk memfiksasi CO_2 ?
 - c. Ada berapakah tahapan utama pada reaksi terang?
 - d. Apakah yang terjadi pada tahapan fiksasi CO_2 ?
 - e. Apakah yang terjadi pada tahapan reduksi?
 - f. Apakah yang terjadi pada tahapan sintesis?
 - g. Apakah yang terjadi pada tahapan regenerasi?
 - h. Pada tahapan mana ATP dimanfaatkan?
 - i. Pada tahapan mana NADPH dimanfaatkan?
 - j. Apakah hasil akhir reaksi gelap?
 - k. Apakah tujuan reaksi gelap?
4. Berdasarkan analisis yang telah kalian lakukan, coba rumuskan pengertian reaksi gelap!
5. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 1.16, kalian menemukan bahwa bahan utama untuk membentuk 1 molekul glukosa dalam reaksi gelap berupa 6CO_2 . Adapun senyawa fiksator 6CO_2 berupa gula berkarbon lima yang disebut ribulose bifosfat (RuBP). Energi yang dibutuhkan berupa 18 ATP dan 12 NADPH yang berasal dari reaksi terang. Reaksi gelap fotosintesis yang di stroma berlangsung dalam beberapa tahap, yaitu fiksasi, reduksi, sintesis, dan regenerasi. Berikut 4 tahap reaksi terang.

1) Fiksasi karbon

Pada fase fiksasi karbon, enzim RuBP karboksilase-oksigenase atau disebut **rubisco** mengkatalis pengikatan molekul 6CO_2 (6C_1) pada 6 RuBP (6C_5). Proses ini menghasilkan molekul berkarbon tiga yang tidak stabil, yaitu asam fosfoglisarat (12PGA).

2) Reduksi

Pada fase ini, 12 PGA direduksi oleh 2NADH_2 dan ATP menjadi 12 PGAL (*phospho gliseraldehyd*).

3) Sintesis

Senyawa 12 PGAL pada fase ini akan terpecah menjadi 2 PGAL dan 10 PGAL. 2PGAL (2C_3) akan berikatan membentuk senyawa $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (C_6). Oleh karena tahapan ini terjadi pembentukan glukosa maka disebut tahapan sintesis.

4) Regenerasi

Pada fase ini, 10 PGAL (10C_3) akan berubah bentuk menjadi 6RuBP (6C_5) lagi dengan bantuan ATP sehingga tahapannya disebut regenerasi.

Berdasarkan analisis di atas dapat dirumuskan pengertian reaksi gelap adalah proses sintesis glukosa dengan bantuan energi kimia yang berlangsung di stroma dalam empat tahap reaksi, yaitu fiksasi, reduksi, sintesis dan regenerasi. Setelah selesai mempelajari reaksi terang dan reaksi gelap fotosintesis, uji pemahaman kalian dengan melakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.17

Mengukur Pemahaman mengenai Reaksi Terang dan Gelap pada Fotosintesis

1. Tentukan macam-macam variabel pembeda antara reaksi terang dan gelap.
2. Tulis perbedaan antara reaksi terang dan gelap berdasarkan variabel pembedanya masing-masing pada tabel berikut.

No	Variabel Pembeda	Reaksi Terang	Reaksi Gelap
1			
2			
3			
4			
5			

3. Presentasikan tabel kalian di depan kelas!

c. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Fotosintesis

Proses berlangsungnya fotosintesis dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor apa sajakah yang memengaruhi kecepatan fotosintesis? Lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 1.18

Mengetahui Faktor yang Memengaruhi Fotosintesis

Tujuan:

1. mengetahui pengaruh intensitas cahaya, konsentrasi CO_2 , dan perbedaan suhu terhadap kecepatan fotosintesis.
2. membuktikan bahwa fotosintesis menghasilkan amilum.

Alat dan bahan:

1. gelas kimia
2. corong kaca
3. tabung reaksi
4. kawat penyangga
5. benang
6. ember
7. neraca
8. *stop watch*
9. pemanas
10. pinset

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 11. cawan petri | 16. es batu |
| 12. plastik | 18. alumunium foil |
| 13. penggaris | 17. daun keladi/daun ketela pohon |
| 14. NaHCO ₃ | 19. alkohol |
| 15. hidrila/ <i>Chara</i> sp. | 20. larutan lugol/iodin |

Langkah percobaan:

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Siapkan alat dan bahan untuk percobaan.
3. Tentukan permasalahan dalam percobaan.
 - a. Apakah perbedaan intensitas cahaya berpengaruh pada kecepatan fotosintesis?
 - b.
 - c.
 - d.
5. Tulis hipotesis berdasarkan permasalahan dalam percobaan.
 - a.
 - b.
 - c.
 - d.
6. Buat perangkat percobaan dengan mengikuti langkah berikut.
 - a. Timbang *Hydrilla/Chara* sp. seberat 3 gram. Lalu, ikat menjadi satu pada bagian batang menggunakan benang.
 - b. Masukkan *Hydrilla/Chara* sp. ke dalam mulut corong kaca dan benang ikatan dimasukkan ke dalam leher corong kaca.
 - c. Masukkan corong kaca berisi *Hydrilla/Chara* sp. ke dalam gelas kimia dengan posisi mulut corong kaca di bagian bawah.
 - d. Masukkan perangkat gelas kimia berisi corong kaca ke dalam ember yang berisi air penuh.
 - e. Tanpa mengeluarkan perangkat percobaan dari dalam ember, tutup leher corong kaca dengan tabung reaksi.
 - f. Masih di dalam air, tahan posisi corong kaca agar menggantung dalam gelas kimia dengan kawat penyangga. Keluarkan perangkat tersebut dari ember dan letakkan di atas meja.



▲ Gambar 1.27
Perangkat percobaan
Ingenhouz.

Pengaruh Cahaya pada Fotosintesis

- Buatlah 3 perangkat percobaan dan beri label A, B, dan C.
- Berikan perlakuan pada perangkat A dengan meletakkan dalam ruang gelap, perangkat B di tempat teduh, dan perangkat C di tempat yang terik cahaya.
- Hitung jumlah gelembung udara yang muncul setiap 3 menit dengan 3 kali pengulangan.
- Tulis hasil pengamatan pada tabel berikut!

Ulangan Pengamatan	Jumlah Gelembung Udara		
	Gelap (A)	Teduh (B)	Terik Cahaya (C)
1			
2			
3			
Rerata			

- Lalu, jawablah pertanyaan berikut!
 - Bagaimanakah jumlah gelembung udara di tempat gelap dan teduh dibandingkan di tempat terik cahaya?
 - Apakah proses yang dilakukan tumbuhan sehingga gelembung gas muncul pada perangkat percobaan?
 - Berdasarkan hasil percobaan, kesimpulan apakah yang kalian dapatkan?

Pengaruh Konsentrasi CO_2 pada Fotosintesis

- Buat 3 perangkat percobaan dan beri label C, D, dan E.
- Berikan perlakuan dengan menambahkan NaHCO_3 pada perangkat D sebanyak 2 gram dan pada perangkat E sebanyak 4 gram hingga larut di dalam air. Adapun untuk perangkat C tidak ditambahkan NaHCO_3 .
- Letakkan 3 perangkat percobaan tersebut di tempat yang terik cahaya.
- Hitung jumlah gelembung udara yang muncul setiap 3 menit dengan 3 kali pengulangan.
- Tulis hasil pengamatan pada tabel berikut.

Ulangan Pengamatan	Jumlah Gelembung Udara		
	0 gram NaHCO_3 (C)	2 gram NaHCO_3 (D)	4 gram NaHCO_3 (E)
1			
2			
3			
Rerata			

- f. Lalu, jawablah pertanyaan berikut!
- 1) Bagaimanakah jumlah gelembung udara pada perangkat percobaan D dan E dibandingkan dengan perangkat percobaan C?
 - 2) Bagaimanakah jumlah gelembung gas yang muncul pada perangkat percobaan D dan E?
 - 3) Apakah tujuan penambahan NaHCO_3 pada perangkat D dan E?
 - 4) Berdasarkan hasil percobaan, kesimpulan apa yang kalian dapatkan?

Pengaruh Suhu pada Fotosintesis

- a. Buat 3 perangkat percobaan dan beri label F, G, dan H.
- b. Rendam perangkat F di dalam baskom berisi es batu hingga suhunya kurang lebih 10°C , biarkan perangkat G pada suhu kamar, dan panaskan perangkat H hingga suhunya kurang lebih 70°C .
- c. Hitung jumlah gelembung udara yang muncul setiap 3 menit dengan 3 kali pengulangan.
- d. Tulis hasil pengamatan pada tabel berikut!

Ulangan Pengamatan	Jumlah Gelembung Udara		
	10°C (F)	28°C (G)	70°C (H)
1			
2			
3			
Rerata			

- e. Lalu, jawablah pertanyaan berikut!

- 1) Bagaimanakah jumlah gelembung udara pada perangkat percobaan F dan H dibandingkan dengan perangkat G?
- 2) Apakah tujuan mengkondisikan perangkat pada suhu rendah dan suhu tinggi?
- 3) Berdasarkan hasil percobaan, kesimpulan apa yang kalian dapatkan?

Pengujian Oksigen

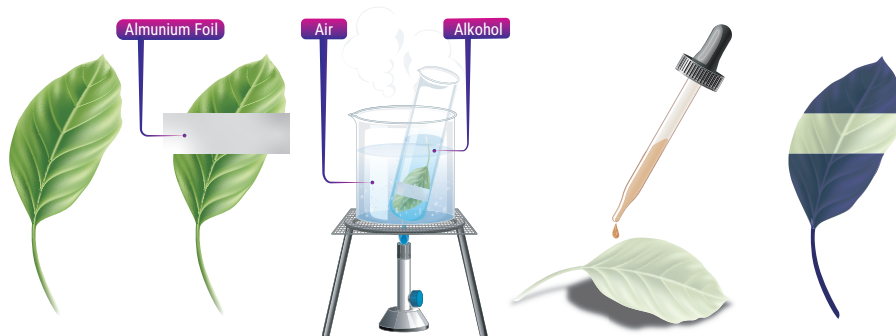
- a. Ambil tabung reaksi yang sudah terdapat ruang udaranya pada perangkat B dengan memasukkan tangan ke perangkat dan gunakan ibu jari untuk menutup mulut tabung. Lakukan dengan hati-hati.
- b. Ukur panjang kolom udara pada ujung tabung reaksi dengan benang dan penggaris.
- c. Siapkan lidi membara. Lalu, balik tabung dan angkat keluar dari gelas beker. Buka ibu jari yang menutup mulut tabung. Lalu, masukkan lidi membara ke arah mulut tabung.
- d. Amati apa yang terjadi dan catatlah hasilnya pada tabel berikut.

Tinggi Ruang udara	Nyala Api

- e. Jawablah pertanyaan berikut!
 - 1) Mengapa bara api pada lidi ketika dimasukkan pada ruang udara di dalam tabung reaksi menjadi menyala?
 - 2) Berdasarkan hasil percobaan, kesimpulan apa yang kalian dapatkan?

Pembuktian Amilum Hasil Fotosintesis

- a. Pilih satu helai daun keladi/daun ketela pohon. Lalu, bungkus sebagian daun dengan alumunium foil.
- b. Biarkan terkena cahaya matahari selama 4 hari.
- c. Ambil daun keladi/daun ketela pohon.
- d. Rebus daun dalam alkohol menggunakan gelas kimia ukuran kecil di atas penangas air sampai warna hijau menghilang.
- e. Angkat daun yang sudah pucat dengan pinset dan letakkan dalam cawan petri yang berisi larutan lugol/iodin.
- f. Amati perbedaan warna yang terjadi antara daun yang dibungkus alumunium foil dan yang tidak dibungkus.



▲ Gambar 1.28 Alur percobaan pembuktian amilum hasil fotosintesis.

g. Catat hasil pengamatan kalian pada tabel berikut.

Daun Dibungkus	Daun Tak Dibungkus

h. Jawablah pertanyaan berikut!

- 1) Mengapa daun yang dibungkus aluminium foil tidak berubah warna menjadi berwarna biru kehitaman setelah dimasukkan dalam larutan iodine?
- 2) Mengapa daun yang tidak dibungkus aluminium foil berubah warna menjadi biru kehitaman setelah dimasukkan dalam larutan iodine?
- 3) Apakah yang menyebabkan warna daun yang tidak dibungkus aluminium foil berubah warna menjadi biru kehitaman?
- 4) Berdasarkan hasil percobaan, apa yang dapat kalian simpulkan?

Setelah melakukan Aktivitas 1.18, kalian menemukan gejala terjadinya fotosintesis ditandai dengan munculnya gelembung udara yang menunjukkan dihasilkannya O_2 . Hal ini dibuktikan ketika O_2 hasil fotosintesis dapat menyebabkan bara pada lidi menjadi nyala api. Adapun pengaruh faktor cahaya, CO_2 , dan suhu pada kecepatan fotosintesis diuraikan sebagai berikut.

1. Perbedaan intensitas cahaya

Perbedaan perlakuan intensitas cahaya terbukti mempercepat fotosintesis, di mana di tempat gelap tidak dihasilkan O_2 sedangkan di

tempat teduh dan terik cahaya banyak dihasilkan O_2 . Di tempat gelap tidak ada foton yang diserap untuk berlangsungnya reaksi terang yang menghasilkan O_2 dalam bentuk gelembung udara.

2. Perbedaan konsentrasi CO_2

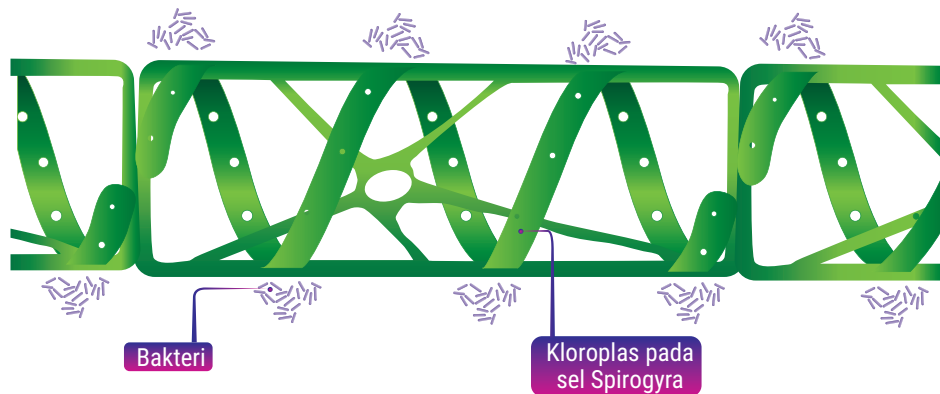
Penambahan konsentrasi CO_2 dilakukan dengan penambahan $NaHCO_3$. Di mana $NaHCO_3$ di dalam air akan terurai menjadi $NaOH$ dan CO_2 . Penambahan volume CO_2 terbukti dapat meningkatkan jumlah gelembung O_2 sebagai indikasi ada peningkatan aktivitas fotosintesis.

3. Perbedaan suhu

Perbedaan suhu juga terbukti berpengaruh pada kecepatan fotosintesis, di mana pada suhu rendah dan tinggi tidak terjadi fotosintesis. Pada suhu rendah dan tinggi akan dapat merusak sistem enzim pada reaksi terang sehingga tidak dapat berlangsung dan tidak menghasilkan O_2 .

Selain itu, pembuktian jika fotosintesis menghasilkan amilum terbukti bagian daun yang terkena cahaya dan melakukan fotosintesis ketika diuji dengan iodine menjadi berwarna biru kehitaman. Hal ini membuktikan bahwa fotosintesis menghasilkan amilum.

Untuk membuktikan bahwa dalam fotosintesis diperlukan klorofil, cahaya matahari, dan menghasilkan oksigen dilakukan dengan percobaan Engelmann. Perhatikan gambar berikut!



▲ Gambar 1.29 Percobaan Engelmann.

Pada gambar di atas terlihat kloroplas yang disinari akan melakukan fotosintesis dan menghasilkan O_2 . Ketersediaan O_2 menyebabkan populasi bakteri aerob akan mendekati ke arah kloroplas spiral. Dengan

demikian, terbukti bahwa fotosintesis membutuhkan cahaya, klorofil, dan menghasilkan O_2 .

d. Fotorespirasi

Cuaca panas dan kering menyebabkan sebagian stomata pada tumbuhan C_3 tertutup sehingga jumlah CO_2 yang masuk ke dalam daun menurun. Di sisi lain, enzim rubisco juga memiliki kemampuan untuk mengikat O_2 . Ketika konsentrasi CO_2 pada rongga udara daun menurun dan O_2 meningkat, rubisco memasukkan O_2 pada siklus Calvin menggantikan CO_2 .

Produk reaksi di atas segera terurai menghasilkan senyawa berkarbon dua. Senyawa tersebut meninggalkan kloroplas dan diubah menjadi CO_2 oleh peroksisom dan mitokondria. Peristiwa ini disebut fotorespirasi karena terjadi pada kondisi terang (*photo*), menggunakan oksigen, dan menghasilkan CO_2 seperti respirasi.

Fotorespirasi berbeda dengan respirasi karena tidak menghasilkan ATP dan berbeda dengan fotosintesis karena tidak menghasilkan gula. Dengan kata lain, fotorespirasi merugikan karena menyebabkan menurunnya hasil fotosintesis.

e. Tumbuhan C_3 , C_4 , dan CAM

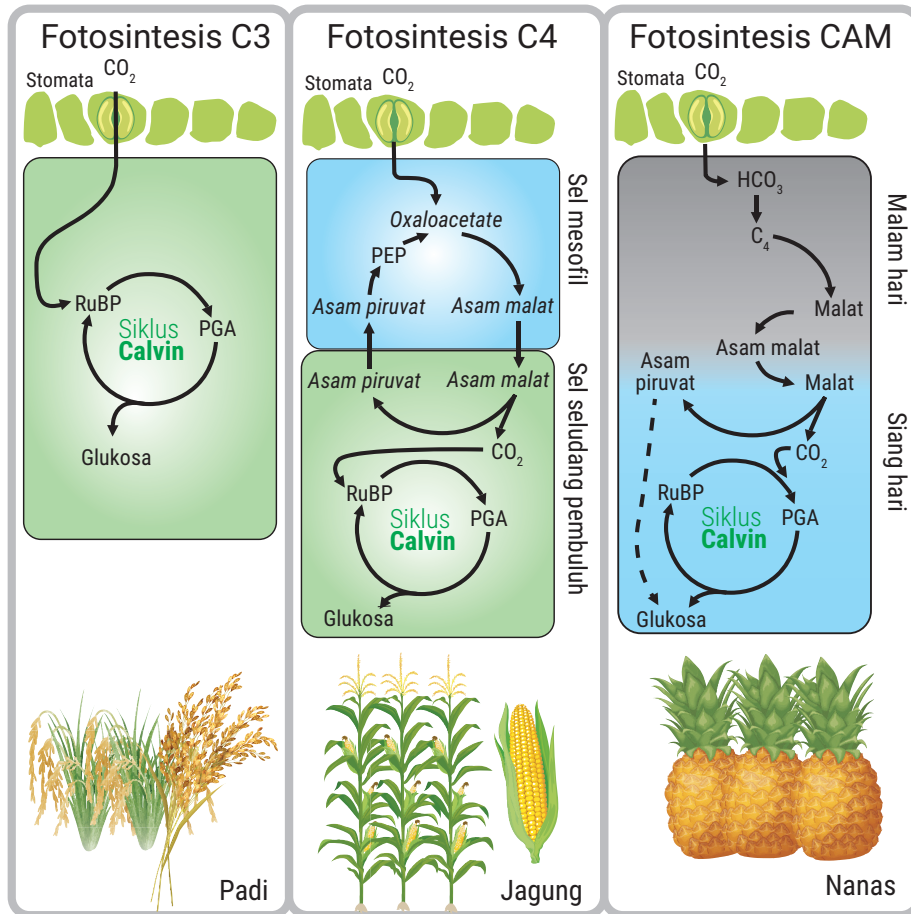
Pada sebagian besar tumbuhan, siklus Calvin diawali dengan reaksi pengikatan CO_2 pada senyawa RuBP menggunakan enzim rubisco. Tumbuhan tersebut disebut tumbuhan C_3 karena molekul organik yang pertama kali terbentuk memiliki tiga karbon, yaitu PGA (C_3). Contohnya, tanaman padi, gandum, dan kedelai.

Tumbuhan C_4 diberi nama demikian karena pada fiksasi CO_2 untuk yang pertama di mesofil menghasilkan asam oksaloasetat (C_4). Adapun fiksasi kedua di seludang berkas pengangkut yang menghasilkan PGA (C_3). Contohnya, tanaman tebu dan jagung.

Pada tumbuhan kaktus dan nanas, stomata terbuka pada malam hari dan menutup pada siang hari. Menutupnya stomata pada siang hari mencegah tumbuhan kehilangan terlalu banyak air tetapi hal ini juga menghalangi masuknya CO_2 ke dalam daun. Pada malam hari, ketika stomata terbuka, tumbuhan ini mengambil CO_2 dan menyimpannya dalam bentuk senyawa asam organik. Fiksasi karbon dengan cara ini disebut *crassulacean acid metabolism* (CAM). Sel-sel mesofil tumbuhan

CAM menyimpan senyawa asam organik yang dibuat pada malam hari di dalam vakuola. Pada siang hari, ketika reaksi terang menyuplai ATP dan NADPH untuk siklus Calvin, CO₂ dilepaskan dari senyawa asam organik yang dibentuk pada malam sebelumnya untuk membentuk gula.

Secara singkat, berikut perbandingan antara tumbuhan C₃, C₄, dan CAM.



▲ Gambar 1.30 Perbandingan fiksasi tumbuhan C₃, C₄, dan CAM.

f. Kemosintesis

Beberapa bakteri yang tidak berklorofil mampu mensintesis glukosa dengan sumber energi yang bersumber dari peristiwa oksidasi molekul anorganik. Proses semacam ini disebut kemosintesis. Kemosintesis dapat dilakukan oleh bakteri kemosintetik.

- 1) Bakteri besi dari genus *Ferrobacillus* yang mengoksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} untuk menghasilkan energi. Reaksinya sebagai berikut.



Selanjutnya, energi yang dihasilkan digunakan untuk mensintesis glukosa dengan reaksi sebagai berikut.



- 2) Bakteri nitrifikasi, yaitu *Nitrosomonas* dan *Nitrosococcus* yang mengoksidasi amoniak menjadi asam nitrit untuk menghasilkan energi. Reaksinya sebagai berikut.



Selanjutnya, energi yang dihasilkan digunakan untuk mensintesis glukosa dengan reaksi sebagai berikut.



- 3) Bakteri belerang dari genus *Thiobacillus* yang mengoksidasi H_2S menjadi sulfur untuk menghasilkan energi. Reaksinya sebagai berikut.



Selanjutnya, energi yang dihasilkan digunakan untuk mensintesis glukosa dengan reaksi sebagai berikut.



REFLEKSI

Untuk meninjau ulang keseluruhan proses pembelajaran, lakukan refleksi dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apa sajakah yang sudah kalian kuasai pada pembelajaran ini?
2. Apa sajakah yang belum kalian kuasai pada pembelajaran ini?
3. Apakah yang menyebabkan kalian belum menguasai bagian tertentu pada pembelajaran ini?
4. Upaya apa yang akan kalian lakukan sebagai tindak lanjut terhadap materi yang sudah kalian kuasai?
5. Upaya yang akan kalian dilakukan untuk mengatasi bagian yang belum dikuasai pada pembelajaran ini?

UJI KOMPETENSI

Pilihlah salah satu jawaban yang paling benar!

1. Pernyataan mengenai enzim berikut yang tidak tepat, yaitu
 - a. Enzim adalah protein yang berfungsi sebagai katalis.
 - b. Enzim bersifat spesifik terhadap substratnya.
 - c. Enzim menyediakan energi aktivasi untuk reaksi kimia.
 - d. Enzim dipengaruhi oleh faktor lingkungan.
 - e. Enzim dapat digunakan berkali-kali.
2. Holoenzim tersusun atas struktur
 - a. apoenzim dan inhibitor nonkompetitif
 - b. koenzim dan gugus prostetik
 - c. apoenzim dan koenzim
 - d. gugus prostetik dan kofaktor
 - e. apoenzim dan inhibitor kompetitif
3. Berikut ini yang merupakan koenzim adalah
 - a. Mn
 - b. Zn
 - c. NAD
 - d. Fe
 - e. Cu
4. Pada inhibisi kompetitif, inhibitor memiliki kemiripan struktural dengan
 - a. sisi aktif
 - b. substrat
 - c. koenzim
 - d. kofaktor
 - e. apoenzim

5. Berikut ini yang paling tepat mengenai kompleks enzim-substrat, yaitu
- bersifat sementara
 - merupakan ikatan kovalen
 - menyebabkan perubahan permanen pada enzim
 - enzim dan substrat tidak mengalami perubahan
 - ikatan yang terbentuk merupakan ikatan nonkomplemen
6. Sekelompok peserta didik melakukan eksperimen menggunakan enzim katalase dan diperoleh hasil yang tampak pada tabel berikut!

Ekstrak Hati + Es Batu + H ₂ O ₂		Ekstrak Hati + Air Panas + H ₂ O ₂		Ekstrak Hati + H ₂ O ₂	
Gelembung gas	Nyala api	Gelembung gas	Nyala api	Gelembung gas	Nyala api
+	+	-	-	+++	+++

Keterangan:

- tidak ada + sedikit ++ sedang +++ banyak

Kesimpulan yang paling tepat berdasarkan data di atas, yaitu

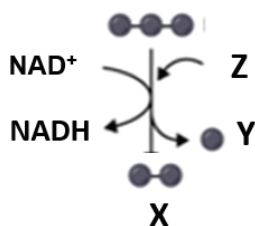
- kerja enzim katalase tidak dipengaruhi suhu
 - semua enzim bekerja optimal pada suhu rendah
 - semakin tinggi suhu, semakin optimal kerja enzim
 - kerja enzim katalase paling optimal pada suhu normal
 - kerja enzim katalase paling optimal pada suhu rendah
7. Respirasi aerob merupakan serangkaian reaksi kimia yang dilakukan sel untuk menghasilkan energi (ATP). Berikut tahap-tahap respirasi aerob.
- siklus asam sitrat
 - fosforilasi oksidatif
 - glikolisis
 - dekarboksilasi oksidatif
- Tahap-tahap yang berfungsi menghasilkan NADH, yaitu
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4 saja
 - 1, 3, dan 4
8. Berdasarkan tahap-tahap respirasi aerob pada soal nomor 7, tahap yang menghasilkan produk samping berupa CO₂, yaitu
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 4
 - 2 dan 3
 - 4 saja
 - 1, 2, 3, dan 4
9. Perhatikan pernyataan-pernyataan mengenai glikolisis berikut.
- Glikolisis membutuhkan 2 ATP.
 - Glikolisis menghasilkan 2 asam piruvat.
 - Energi bersih yang dihasilkan pada glikolisis sebanyak 2 ATP.
 - Glikolisis hanya dapat terjadi jika oksigen tersedia.

Pernyataan yang benar mengenai glikolisis, yaitu

- a. 1, 2, dan 3 c. 2 dan 4 e. 1, 2, 3, dan 4
 b. 1 dan 3 d. 4 saja

10. Perhatikan bagan dekarboksilasi oksidatif berikut.

Asam Piruvat



X, Y, dan Z yang dimaksud adalah

	X	Y	Z
a	ATP	CO ₂	Asetil KoA
b	Asetil KoA	H ₂ O	O ₂
c	Asetil KoA	CO ₂	Koenzim A
d	NADH	CO ₂	ATP
e	H ₂ O	O ₂	CO ₂

11. Perhatikan pernyataan berikut.

- Oksigen diperlukan dalam siklus asam sitrat.
- Diperlukan 2 kali siklus asam sitrat untuk satu molekul glukosa.
- Dihasilkan total 2CO₂ pada siklus asam sitrat yang menggunakan 2 Asetil KoA.
- Dihasilkan 6NADH, 2FADH₂, dan 2 ATP pada siklus asam sitrat yang berasal dari 1 molekul glukosa.

Pernyataan yang tepat mengenai siklus asam sitrat, yaitu

- a. 1, 2, dan 3 c. 2 dan 4 e. 1, 2, 3, dan 4
 b. 1 dan 3 d. 4 saja

12. Perhatikan pernyataan berikut.

- Terdapat 10NADH dan 2FADH₂ yang dikonversi menjadi ATP.
- Konversi NADH menghasilkan lebih banyak ATP dibanding FADH₂.
- ATP sintase merupakan enzim yang berfungsi sebagai katalisator pembentukan ATP.
- Oksigen diperlukan sebagai penerima elektron terakhir.

Pernyataan yang tepat mengenai fosforilasi oksidatif, yaitu

- a. 1, 2, dan 3
- b. 1 dan 3
- c. 2 dan 4
- d. 4 saja
- e. 1, 2, 3, dan 4

13. Produk fermentasi alkohol yang diperlukan untuk mengembangkan adonan roti, yaitu

- a. O_2
- b. etanol
- c. CO_2
- d. NADH
- e. asam laktat

14. Perhatikan pernyataan berikut.

- 1. Hanya menghasilkan NADPH
- 2. Menggunakan fotosistem I dan II
- 3. Menggunakan cahaya hijau
- 4. Menghasilkan ATP dan NADPH

Pernyataan yang benar mengenai reaksi terang nonsiklik, yaitu

- a. 1, 2, dan 3
- b. 1 dan 3
- c. 2 dan 4
- d. 4 saja
- e. Semua benar

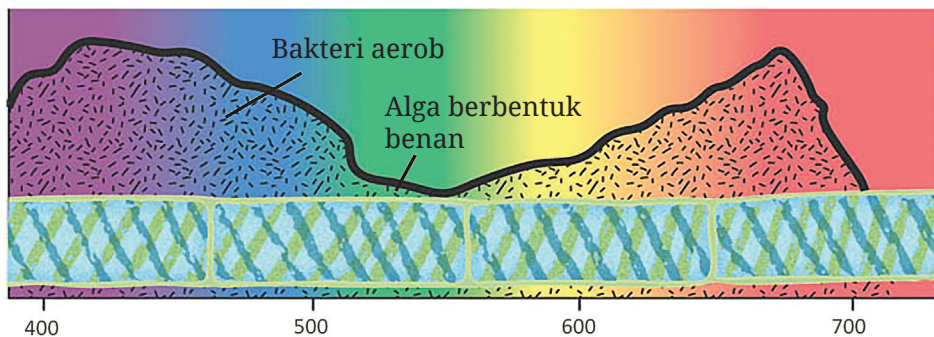
15. Karbon dioksida yang diperlukan untuk membentuk 1 molekul glukosa pada reaksi terang, yaitu

- a. 2
- b. 3
- c. 4
- d. 5
- e. 6

16. Tahap pembentukan RuBP pada siklus gelap terjadi pada fase

- a. fiksasi
- b. reduksi
- c. sintesis
- d. regenerasi
- e. oksidasi

17. Pada tahun 1883, Engelmann melakukan eksperimen dengan menyinari alga berbentuk filamen dengan cahaya tampak yang dilewatkan prisma. Hasil percobaan Engelmann tampak pada gambar berikut.



Perhatikan kesimpulan dari percobaan Engelmann berikut.

1. Fotosintesis membutuhkan klorofil dan menghasilkan oksigen
2. Fotosintesis menghasilkan zat makanan berupa amilum
3. Cahaya warna merah dan biru-ungu efektif untuk fotosintesis
4. Konsentrasi CO₂ mempengaruhi laju fotosintesis.

Kesimpulan yang tidak tepat berdasarkan gambar di atas, yaitu....

- a. 1, 2, dan 3
- b. 1 dan 3
- c. 2 dan 4
- d. 4 saja
- e. Semua benar

18. Sekelompok siswa melakukan percobaan dengan langkah berikut.

- a. Bagian tengah daun ditutup menggunakan aluminium foil selama 4 hari.
- b. Daun direbus dengan alkohol dalam penangas air hingga kehilangan klorofilnya.
- c. Daun dimasukkan ke dalam larutan iodin.
- d. Bagian daun yang ditutup aluminium foil tidak berubah biru kehitaman seperti tampak pada gambar di samping ini.



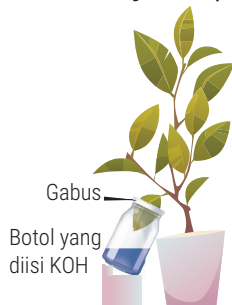
Berikut kesimpulan dari percobaan di atas.

1. Fotosintesis menghasilkan amilum.
2. Fotosintesis menghasilkan oksigen.
3. Fotosintesis memerlukan cahaya.
4. Fotosintesis memerlukan air.

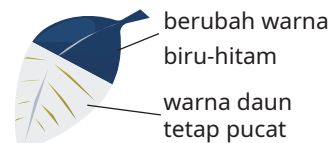
Kesimpulan yang tepat dari percobaan, yaitu

- a. 1, 2, dan 3
- b. 1 dan 3
- c. 2 dan 4
- d. 4 saja
- e. semua benar

19. Siswa menyusun perangkat percobaan seperti tampak pada gambar berikut.



Setelah dibiarkan 3 hari, daun yang sebagian dimasukkan ke dalam botol berisi KOH dipetik, dihilangkan klorofilnya, lalu diuji dengan larutan iodin. Hasil uji iodin ditunjukkan oleh gambar di samping.

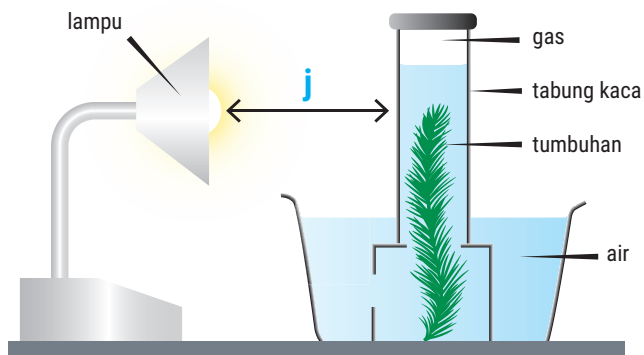


Berikut kesimpulan dari percobaan di atas.

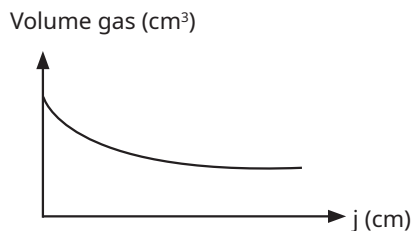
1. Fotosintesis menghasilkan oksigen.
2. Fotosintesis membutuhkan karbon dioksida.
3. Fotosintesis membutuhkan air.
4. Fotosintesis menghasilkan amilum.

Kesimpulan yang tepat dari percobaan, yaitu

- a. 1, 2, dan 3 c. 2 dan 4 e. semua benar
b. 1 dan 3 d. 4 saja
20. Tuti menyusun alat eksperimen seperti tampak pada gambar berikut. Dia mengulangi penelitian yang sama beberapa kali. Di mana pada tiap pengulangan, jarak antara sumber cahaya dan tumbuhan dibedakan.



Hasil eksperimen ditunjukkan oleh grafik berikut.



Kesimpulan yang sesuai dengan eksperimen di atas, yaitu

- a. Semakin tinggi konsentrasi air semakin cepat laju fotosintesis.
- b. Laju fotosintesis meningkat ketika konsentrasi CO₂ menurun.
- c. Tumbuhan akan berfotosintesis jika cukup cahaya.
- d. Laju fotosintesis meningkat ketika intensitas cahaya meningkat.
- e. Semakin jauh jarak cahaya dari tumbuhan, semakin cepat fotosintesis terjadi.

Mengubah Energi yang Dihasilkan Tumbuhan menjadi Listrik

Kini, peneliti sedang terus mengembangkan cara menghasilkan listrik dalam skala kecil dari energi yang dihasilkan oleh fotosintesis. Pada kenyataannya, tumbuhan menghasilkan energi lebih besar dari yang mereka butuhkan dan mereka mengeluarkan energi berlebih tersebut. Energi berlebih inilah yang dikumpulkan, lalu diubah menjadi listrik. Meskipun tumbuhan tidak menghasilkan listrik dalam satuan megawatt, namun potensi yang dimiliki tidak dapat kita pandang sebelah mata. Para peneliti di Universitas Wageningen pertama kali mematenkan listrik bertenaga tumbuhan pada tahun 2007. Kini, hak paten ini dimiliki oleh perusahaan milik Belanda yang bernama Plant-E, yang terus mengembangkan penelitiannya.

Bagaimanakah energi fotosintesis digunakan untuk menghasilkan listrik? Seperti yang kalian telah pelajari, tumbuhan menyerap energi sinar matahari, lalu mereaksikannya dengan air dan karbon dioksida sehingga terbentuklah gula. Menariknya, tumbuhan menghasilkan gula lebih banyak dari yang mereka butuhkan, hampir setengah dari gula yang dihasilkan menyebar di tanah. Di dalam tanah, gula tersebut diuraikan oleh bakteri dengan menghasilkan proton dan elektron sebagai produk sampingan.


Ide yang dimiliki Plant-e, yaitu memasukkan konduktor ke dalam tanah untuk mengumpulkan elektron, lalu mengubahnya menjadi listrik. Perusahaan tersebut mengklaim bahwa proses ini tidak mengganggu pertumbuhan tanaman. Selain itu, energi yang dihasilkan dapat terus diperbaharui. Satu-satunya masalah, yaitu proses ini tidak dapat terjadi ketika tanah turut membeku selama musim dingin.

Berapakah energi listrik yang dapat dihasilkan tumbuhan? Plant-E mengklaim bahwa tiap meter persegi kebun menghasilkan 28 KWH per tahun. Berdasarkan perhitungan ini, untuk memenuhi kebutuhan listrik sebuah rumah berukuran 150 meter persegi diperlukan beberapa ribu meter persegi kebun. Meskipun tidak praktis, namun masih sangat banyak orang yang tinggal di dalam rumah yang berukuran jauh lebih kecil. Selain itu, terdapat 1,4 juta jiwa tidak memiliki akses listrik dan sebagian besar dari mereka bekerja sebagai petani.

Selain itu, Plant-e telah memperhitungkan potensi hutan mangrove, delta sungai, dan sawah yang dapat menghasilkan listrik skala kecil, misalnya untuk *Wi-Fi hotspots*, pengisi daya ponsel, dan lampu sebagai penerangan di malam hari bagi warga miskin. Bagi warga perkotaan, Plant-E tengah menguji sistem atap hijau, di mana listrik yang dihasilkan oleh tiap 15 meter persegi atap hijau tersebut cukup untuk mengisi daya sebuah ponsel.

Setelah membaca uraian di atas, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Menurut kalian, apakah pemanfaatan fotosintesis untuk menghasilkan energi dapat diaplikasikan di Indonesia? Jelaskan!
2. Apakah kelebihan Indonesia dibanding Belanda yang menyebabkan produksi listrik dari fotosintesis di Indonesia dapat lebih dioptimalkan.
3. Lakukan studi literatur lanjutan, lalu buktikan bahwa buah yang juga merupakan hasil fotosintesis dapat menghasilkan listrik!



Bukanlah spesies yang paling kuat atau paling cerdas yang mampu survive, tapi mereka yang paling mampu beradaptasi terhadap perubahan.

--Charles Darwin

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2022

Biologi
untuk SMA Kelas XII

Penulis Shilviani Dewi, dkk.

ISBN 978-602-427-958-5 (jil.2)

BAB 2



Genetik dan Pewarisan Sifat

Apakah materi genetik itu? Bagaimana
pewarisan sifat terjadi?



Tujuan Pembelajaran

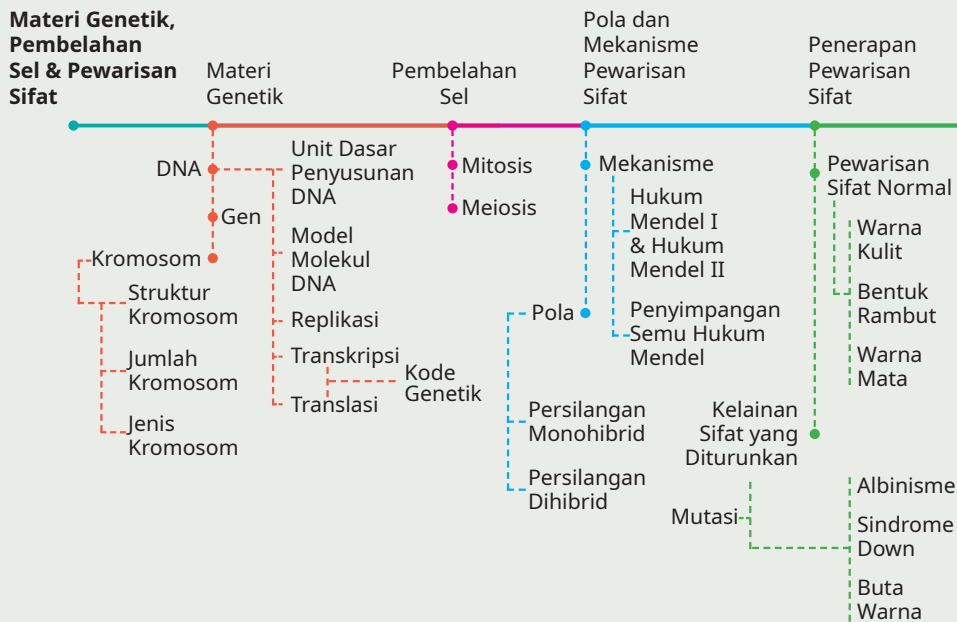
Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan dapat:

1. menjelaskan komposisi dan struktur DNA, gen, serta kromosom.
2. mengkorelasikan peran antara DNA, gen, dan kromosom dalam pewarisan sifat.
3. menjelaskan tahap-tahap sintesis protein.
4. membandingkan tahap-tahap mitosis dan meiosis.
5. menganalisis peran mitosis dan meiosis.
6. menganalisis pentingnya produksi sel-sel yang identik secara genetik.
7. menganalisis pola-pola pewarisan sifat pada makhluk hidup.
8. menerapkan konsep penyimpangan semu hukum Mendel pada beberapa kasus soal.
9. menghitung hasil persilangan sampai mendapatkan perbandingan fenotip dan genotipnya.
10. menjelaskan peristiwa mutasi dan sebab-sebab terjadinya mutasi.

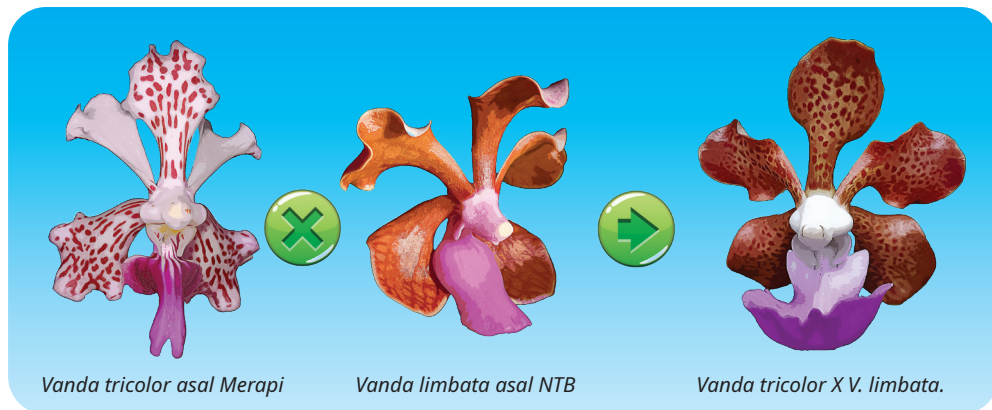
Kata Kunci

DNA, gen, kromosom, mitosis, meiosis, hereditas, hukum Mendel.

Peta Materi



Coba perhatikan gambar di bawah ini. Gambar tersebut menunjukkan terjadinya pewarisan sifat dari dua induk kepada keturunannya.



▲ **Gambar 2.1** Hasil persilangan anggrek *Vanda tricolor* dengan *Vanda limbata* asal NTB menghasilkan varietas baru *Vanda tricolor X V. limbata*.

Pada gambar tersebut, terlihat induk jantan bunga anggrek *Vanda limbata* memiliki sifat berwarna merah kecoklatan dengan bibir lebar berwarna ungu dan induk betina bunga anggrek *Vanda tricolor* memiliki sifat berwarna putih totol-totol cokelat keunguan dengan bibir panjang berwarna merah keunguan. Persilangan antara bunga jantan dan betina tersebut menghasilkan keturunan yang memiliki campuran sifat dari kedua induknya, yaitu memiliki bunga berwarna cokelat totol-totol putih dengan bibir panjang berwarna ungu. Hal tersebut menunjukkan bahwa sifat induk dapat diwariskan kepada keturunannya.

● A. Materi Genetik

Setiap makhluk hidup memiliki materi genetik yang akan diwariskan kepada keturunannya. Secara umum, keseluruhan materi genetik akan menentukan karakteristik makhluk hidup. Untuk memahami mengenai materi genetik, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 2.1

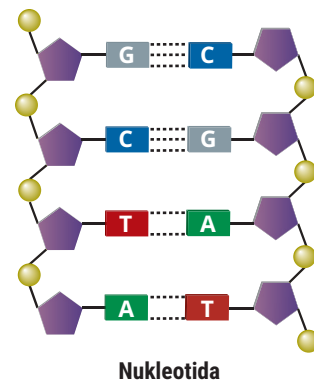
Mengenal Materi Genetik melalui Penelusuran Video

1. Bentuk kelompok terdiri atas 3 – 4 orang.
2. Lakukan penelusuran video melalui sumber literatur terpercaya di Youtube dengan kata kunci pencarian DNA, gen, dan kromosom.
3. Jawablah pertanyaan berikut dengan berdiskusi.
 - a. Apakah kalian tahu mengenai materi genetik DNA, gen, dan kromosom?
 - b. Bagaimana struktur atau bentuk DNA, gen, dan kromosom?
 - c. Apa fungsi DNA, gen, dan kromosom?
4. Buatlah kesimpulan berdasarkan hasil diskusi kalian.
5. Kumpulkan jawaban kalian kepada guru.

1. DNA dan Gen

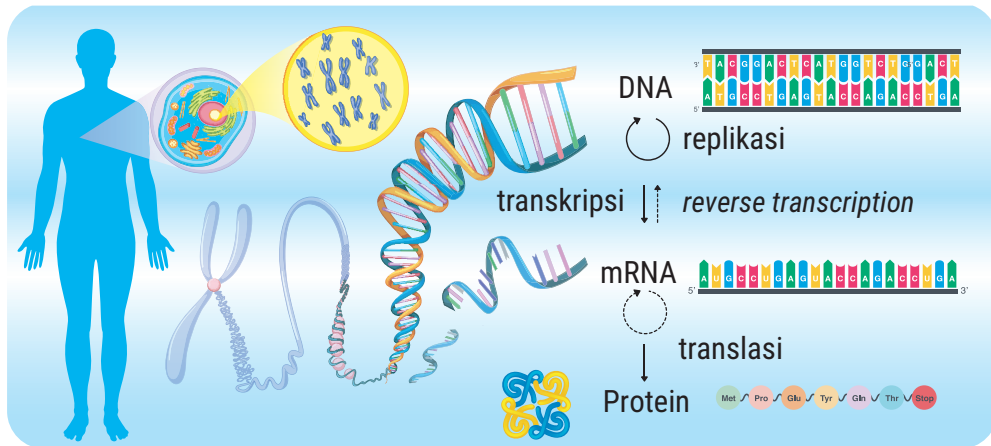
Berdasarkan Gambar 2.1, kalian dapat amati bersama bahwa ada sifat-sifat yang terlihat secara langsung, seperti warna bunga, bentuk bunga, bentuk bibir bunga, warna bibir bunga, dan karakteristik lain yang tampak. Sifat yang tampak atau dapat diamati disebut fenotip. Fenotip ditentukan oleh kekhasan struktur gen yang disebut genotip. Jadi, genotip akan menentukan fenotipnya. Lalu, apakah yang dimaksud dengan gen?

Gen adalah segmen DNA yang merupakan rangkaian nukleotida dengan urutan tertentu. Apa itu nukleotida? Coba, perhatikan Gambar 2.2. Nukleotida merupakan satuan dasar yang terdiri atas gula yang disebut **deoksiribosa**, **gugus fosfat**, dan **basa** yang mengandung nitrogen. Adapun basa yang mengandung nitrogen di dalam DNA ada empat macam, yaitu **adenin (A)**, **sitosin (C)**, **guanin (G)**, dan **timin (T)**.



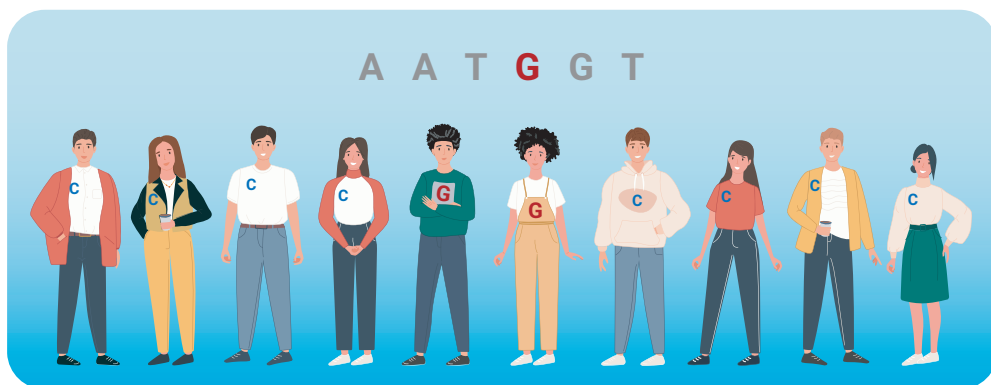
▲ **Gambar 2.2** Simbol komponen penyusun nukleotida.

DNA yang mengekspresikan sifat tertentu, mengkode pembentukan suatu polipeptida yang nantinya akan membentuk protein. Protein inilah yang menjalankan fungsi gen dalam pewarisan sifat. Keterkaitan antara DNA, gen, dan protein dalam pembentukan sifat (fenotip tertentu) dikenal dengan istilah dogma sentral. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 2.3 Dogma sentral.

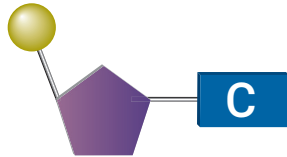
Begitu pentingnya peran DNA dalam menentukan sifat sehingga satu saja nukleotida yang berubah dapat memengaruhi perubahan sifat dari suatu individu. Misalnya, perubahan sitosin menjadi guanin pada manusia dapat mengubah fenotip rambut lurus menjadi keriting. Peristiwa ini dikenal sebagai *single nucleotide polymorphism*. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 2.4 Perubahan satu nukleotida G menjadi C dapat mengubah fenotip jenis rambut.

2. Merakit Nukleotida

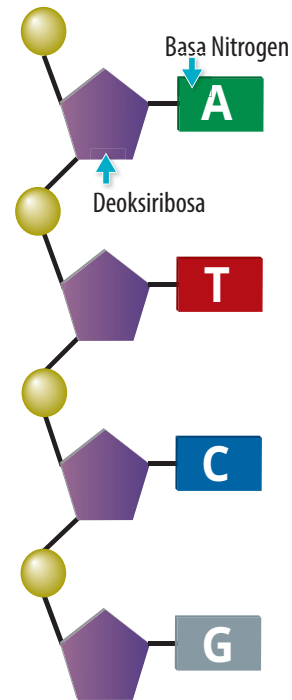
Basa-basa yang mengandung nitrogen, gula deoksiribosa, dan gugus fosfat dapat bergabung membentuk empat molekul nukleotida berbeda seperti yang ditunjukkan gambar berikut.



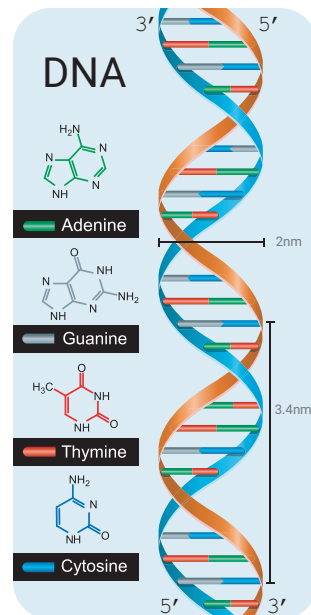
▲ Gambar 2.5 Nukleotida.

Sejumlah nukleotida dapat digabungkan membentuk rantai panjang yang disebut **polinukleotida**. Perhatikan gambar 2.6!

Setiap gen tersusun atas rangkaian nukleotida dengan urutan tertentu. Perbedaan urutan nukleotida (basa-basa) antara satu dengan lainnya menyebabkan gen bersifat spesifik, gen yang satu berbeda dengan gen yang lain. Coba, kalian amati Gambar 2.7. Molekul DNA tersusun atas dua rantai polinukleotida antiparalel. Molekul tersebut disebut antiparalel maksudnya rantai DNA yang merentang dari 5' ke 3' akan berpasangan dengan rantai DNA yang merentang dari 3' ke 5'. Basa-basa di satu rantai berikatan dengan basa-basa di rantai seberang atau komplementernya, sesuai aturan perpasangan basa sehingga menyusun apa yang disebut rantai *double helix*. Molekul DNA dengan dua rantai (*double helix*) tersebut, umum ditemukan dalam nukleus sel eukariotik. Molekul DNA yang direntangkan menyerupai tangga dengan anak tangganya berupa basa komplementer. Adapun pada bakteriofage (virus pemakan bakteri), DNA hanya berupa satu untai atau tunggal.

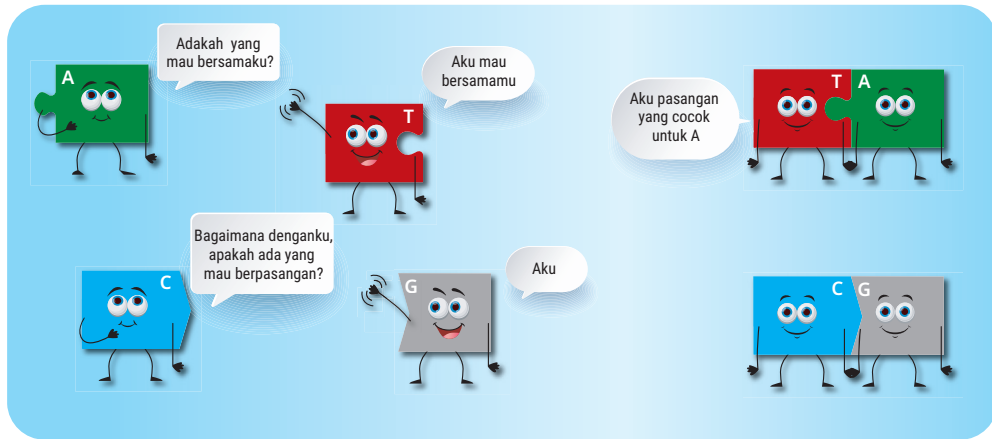


▲ Gambar 2.6 Polinukleotida.



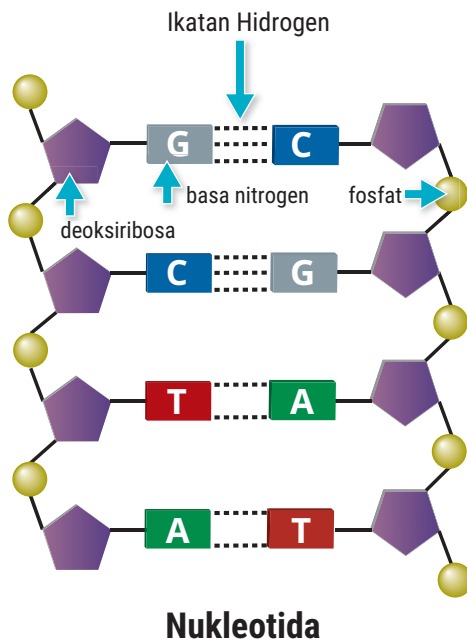
▲ Gambar 2.7 Rantai ganda DNA merupakan struktur yang berpilin.

3. Aturan Perpasangan Basa



▲ Gambar 2.8 Aturan perpasangan basa nitrogen.

Aturan perpasangan basa, yaitu adenin (A) selalu berpasangan dengan timin (T) dan sitosin (C) selalu berpasangan dengan guanin (G). Oleh sebab itu, adenin dan timin disebut basa komplementer, begitu juga dengan sitosin dan guanin. Basa-basa komplementer tersebut dihubungkan oleh ikatan hidrogen.



▲ Gambar 2.9 Pasangan basa komplementer.

AKTIVITAS 2.2

Membuat Model Molekul DNA

Tujuan:

Mengetahui struktur molekul DNA.

Alat:

1. gunting
2. penggaris
3. wadah
4. *cutter*
5. pulpen/spidol

Bahan:

1. koran
2. *gabus/styrofoam*
3. cat akrilik dan kuas
4. lem kayu
5. *double tape*
6. lidi

Langkah percobaan:

1. Gunting koran menjadi 4 bagian.
2. Linting koran tersebut dan tempel dengan *double tape* agar lintingan tidak terbuka kembali.
3. Ambil lintingan terpanjang dan masukkan lidi ke dalam lintingan tersebut. Buat 6 lintingan kertas koran. Lintingan akan menjadi pondasi DNA dan basa nitrogennya.
4. Ukur lintingan kertas koran sepanjang 8 cm dan gunting. Lalu, tandai bagian basa nitrogen dan ikatannya.
5. Beri warna pada basa nitrogen, misal merah untuk adenin, biru untuk timin, hijau untuk sitosin, orange untuk guanin, dan warna putih untuk ikatan hydrogen.
6. Beri warna pada pondasi DNA, misal warna kuning.
7. Potong gabus atau *styrofoam* berbentuk kubus.
8. Tancapkan pondasi rantai DNA pada *styrofoam* dan tempelkan basa nitrogen pada rantai DNA. Buat menjadi bentuk anak tangga yang memutar.
9. Buat bola-bola kecil sebagai gula deoksiribosa menggunakan bubuk kertas. Caranya, sobek kertas koran, lalu tambahkan air dan

hancurkan hingga menjadi bubur. Selanjutnya, tambahkan lem kayu pada bubur kertas dan buat bola-bola kecil. Lalu, keringkan bola-bola tersebut. Setelah kering, beri warna untuk membedakan tiap jenis gula deoksiribosa.

10. Tempelkan fosfat dan deoksiribosa pada rantai DNA.
11. Tampilkan model DNA yang sudah kalian buat, lalu jelaskan mengenai bentuk dan unit dasar penyusun DNA di depan kelas.

4. Model Molekul DNA oleh Watson dan Crick

Kalian telah mengetahui bahwa DNA memiliki struktur heliks ganda (*double helix*). Selain itu, DNA mengandung nukleotida yang terdiri atas deoksiribosa, gugus fosfat, dan pasangan basa yang mengandung nitrogen seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Penemuan fenomenal mengenai struktur DNA oleh James Watson dan Francis Crick pada tahun 1953, membuat mereka mendapatkan hadiah Nobel dalam Fisiologi atau Kedokteran pada tahun 1962 untuk temuan penting ini. Artikel riset mereka yang berjudul *A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid* dalam jurnal ilmiah *Nature* telah membuka jalan bagi banyak kemajuan di bidang rekayasa genetika yang kita lihat saat ini.



▲ Gambar 2.10. DNA model Watson dan Crick.

Sumber: thehistoryblog.com

AKTIVITAS 2.3

Ayo Berpikir Kritis

Kalian pasti sudah banyak mendengar mengenai metode pemeriksaan PCR, terkait dengan pandemi Covid-19 akhir-akhir ini. Pada metode pemeriksaan PCR yang dilakukan secara *in vitro*, ada tahap di mana DNA dikopi atau diamplifikasi menjadi banyak. Coba, lakukan studi literatur melalui sumber yang terpercaya untuk menjawab pertanyaan berikut.

1. Bagaimana mekanisme pemeriksaan PCR?
2. Apakah proses pengopian DNA pada metode PCR sama dengan proses replikasi yang terjadi di dalam sel?

Tulis jawaban kalian dalam bentuk laporan sederhana dan presentasikan di depan kelas.

5. Replikasi DNA

Setelah melakukan Aktivitas 2.3, Kalian telah mengetahui bahwa DNA dapat digandakan melalui metode PCR. Di dalam tubuh pun, DNA melalui proses penggandaan yang dinamakan replikasi. Jadi **replikasi DNA** adalah suatu tahapan penggandaan DNA yang terjadi pada saat sebelum pembelahan sel, yaitu pada tahap interfase. Replikasi dilakukan dalam upaya membentuk DNA yang sama pada sel anakan hasil pembelahan sel. Dalam proses replikasi DNA memerlukan beberapa komponen, seperti enzim helikase, DNA polimerase, dan enzim ligase. Enzim helikase berfungsi sebagai pembuka *double helix* DNA. Enzim DNA polimerase akan membentuk DNA baru sebagai suatu polimer, dari satu rantai tunggal DNA lama yang dijadikan cetakan menjadi dua untai DNA baru *double helix*. Adapun enzim ligase berperan dalam melekatkan setiap fragmen Okazaki yang merupakan rantai pasangan semula yang tidak berhubungan menjadi satu rantai yang utuh.

Replikasi diawali dengan sintesis RNA primer. Dengan kata lain, rantai DNA baru (DNA “anak”) disintesis dari arah 5'→3', sedangkan DNA polimerase bergerak pada DNA “induk” dengan arah 3'→5'. Kalian dapat melihat video animasi dengan kata kunci replikasi DNA pada kanal Youtube untuk memahami proses replikasi DNA.

Ada beberapa model replikasi DNA. Coba, kalian perhatikan Gambar 2.11. Berikut beberapa model replikasi DNA menurut para ahli.

a. Teori konservatif

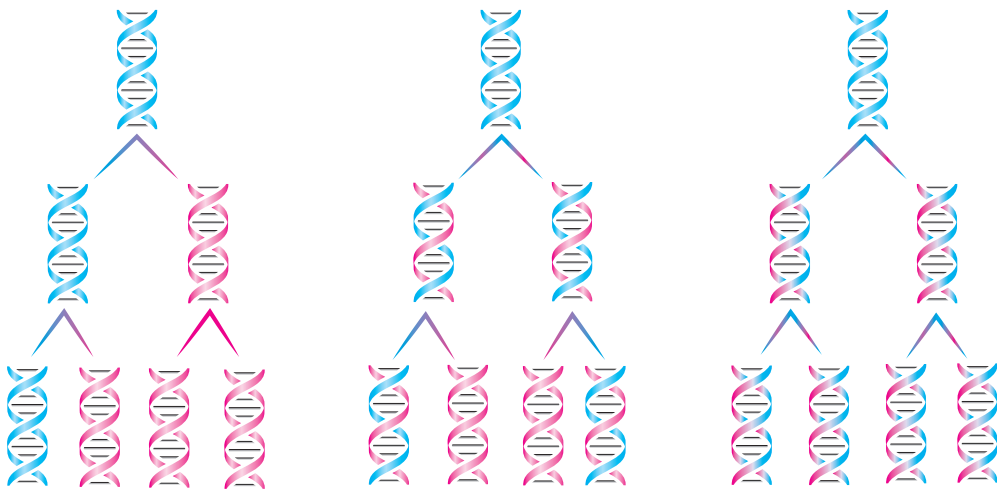
Pita DNA rangkap heliks tidak berpisah, tetapi langsung menjadi cetakan bagi pita DNA baru. Akhirnya, terbentuk dua pita rangkap heliks yang sama seperti asalnya.

b. Teori semikonservatif

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

c. Teori dispersive

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

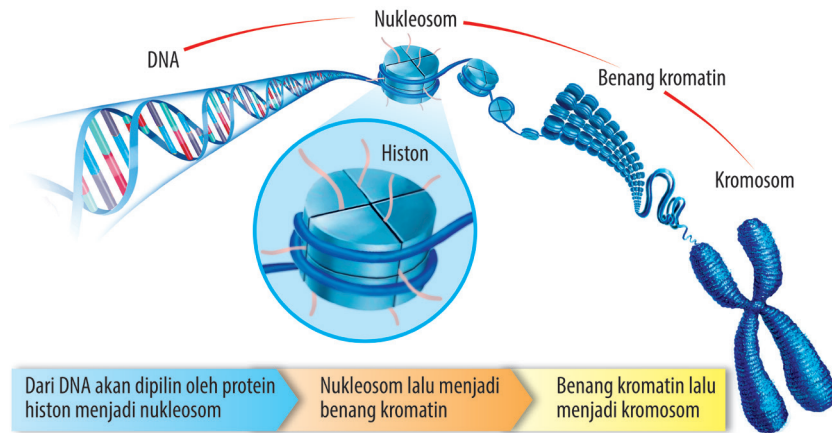


▲ Gambar 2.11 Tiga model replikasi DNA, yaitu (a) semikonservatif, (b) konservatif, dan (c) dispersif.

6. Pengaturan atau Pengemasan DNA di Dalam Sel?

Bagaimanakah DNA sepanjang kurang lebih 2 meter dapat masuk ke dalam sel yang sangat kecil? Untaian DNA di dalam sel sangat panjang. Untuk dapat dikemas dalam inti sel yang kecil, diperlukan suatu mekanisme tertentu. Mekanisme tersebut dimulai dari untai DNA dipintal dalam suatu protein yang dinamakan protein histon. Protein histon mengikat

DNA menjadi suatu unit yang disebut nukleosom. Nukleosom satu dengan yang lain akan bergabung membentuk benang yang lebih padat dan terpintal menjadi lipatan-lipatan yang disebut solenoid. Solenoid satu dengan yang lain bergabung membentuk benang yang dikenal dengan benang kromatin. Benang-benang kromatin memadat membentuk lengan kromatid. Selanjutnya, lengan kromatid akan berpasangan membentuk kromosom.



▲ Gambar 2.12 Pengemasan DNA di dalam sel.

7. Kromosom

Pada Aktivitas 2.1, kalian telah melakukan penelusuran video mengenai struktur DNA, gen, dan kromosom. Tentunya, kalian sudah mengetahui sedikit gambaran mengenai struktur kromosom. Kromosom adalah suatu struktur makromolekul yang tersusun atas asam nukleat (DNA/RNA) dan protein. Kromosom merupakan bagian penting dari inti sel yang berfungsi sebagai pembawa sifat pada keturunan.

Apakah kalian pernah melihat kromosom secara langsung? Biasanya, kromosom berukuran sangat kecil dan untuk melihatnya diperlukan mikroskop elektron. Namun, ada kromosom yang dapat dilihat dengan mikroskop cahaya yang dikenal dengan kromosom raksasa atau kromosom politen. Biasanya, kromosom ini ditemukan pada *Drosophilla melanogaster*, *Chironomus* sp., dan hewan lain yang termasuk ordo Diptera. Pada sel yang sedang tidak membelah, kromosom ini berupa benang-benang tipis yang dikenal dengan kromatin. Coba, kalian lihat bentuk kromosom *D. melanogaster* melalui Aktivitas 2.4.

AKTIVITAS 2.4

Pengamatan Bentuk Kromosom Lalat Buah (*D. melanogaster*)

Tujuan:

Mengetahui bentuk kromosom *D. melanogaster*.

Alat:

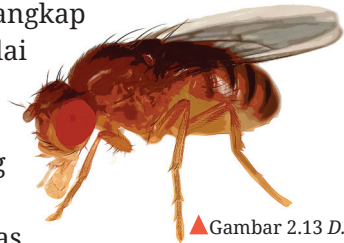
1. cawan petri
2. gelas penutup (*cover glass*)
3. gelas benda (*object glass*)
4. jarum
5. mikroskop
6. pinset
7. botol selai
8. kantong plastik besar

Bahan:

1. akuades
2. *D. melanogaster*
3. 1 buah pisang
4. tisu

Langkah percobaan:

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 4 – 5 orang.
2. Ambil beberapa ekor *D. melanogaster* dengan cara berikut.
 - a. siapkan botol selai beserta tutupnya dan kantong plastik besar.
 - b. pergi ke tempat di mana terdapat tempat sampah.
 - c. kembangkan kantong plastik besar dengan mulut plastik terbuka lebar. Lalu, pegang bagian pangkalnya dan arahkan mulut plastik ke tempat sampah yang terbuka. Buat kejutan dengan memukul atau mengguncang-guncangkan tempat sampah sehingga lalat buah terperangkap di dalam plastik.
 - d. masukkan lalat buah yang terperangkap di dalam plastik ke dalam botol selai berisi buah pisang. Berikut contoh gambar lalat buah *D. melanogaster*.
3. Letakkan lalat buah di cawan petri yang berisi air suling (akuades).
4. Ambil lalat buah dan letakkan pada gelas objek (*object glass*).
5. Tusuk bagian anterior (depan) dan posterior (belakang) menggunakan jarum, lalu tarik secara berlawanan.
6. Pisahkan lalat buah dengan kelenjar ludahnya, lalu tutup dengan gelas penutup (*cover glass*).
7. Amati di bawah mikroskop dan gambarlah hasil pengamatan kalian.
8. Diskusikan hasil pengamatan kalian bersama teman satu kelompok.
9. Buat laporan percobaan pengamatan kromosom *D. melanogaster*.



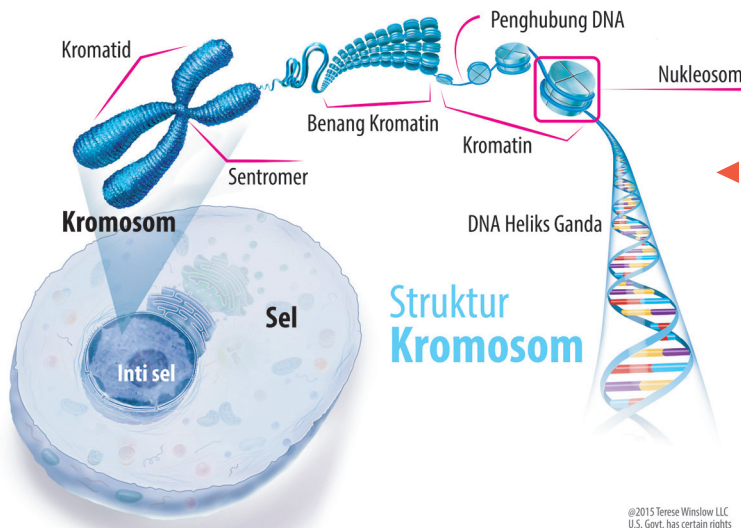
▲ Gambar 2.13 *D. melanogaster*.

Setelah mengamati kromosom *D. melanogaster*, kalian menjadi semakin paham mengenai bentuk kromosom. Mengapa kromosom lalat buah dikatakan kromosom raksasa? Hal ini dikarenakan kromosom ini terbentuk melalui penggandaan DNA (replikasi) berulang hingga 10 kali tanpa pembelahan sel.

Bentuk kromosom sebagai materi genetik hanya dimiliki kelompok makhluk hidup eukariotik. Materi genetik pada makhluk hidup, seperti virus dan bakteri tidak ditemukan dalam bentuk kromosom tetapi berupa asam nukleat murni, yaitu DNA atau RNA. Pada eukariotik, kromosom terdapat di dalam inti sel (nukleus) yang dilingkupi membran inti. Pada prokariotik, materi genetik terdapat di dalam sel tanpa dilingkupi membran inti yang dikenal dengan nukleoid.

8. Bagian Kromosom

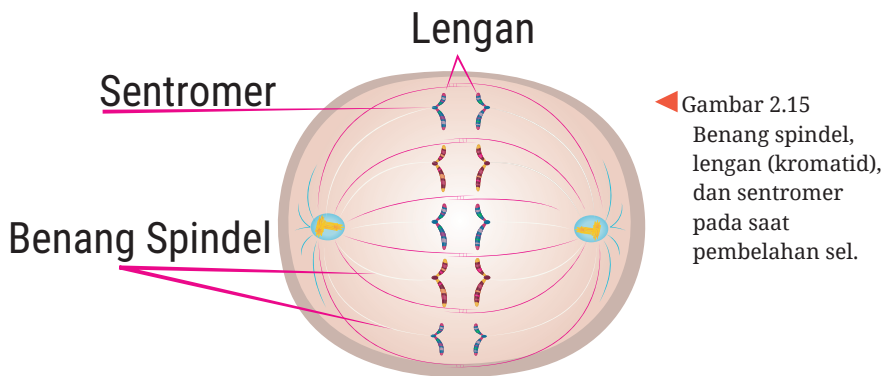
Bagian utama kromosom eukariotik, yaitu DNA yang merupakan rangkaian nukleotida yang dikemas oleh suatu protein yang disebut protein histon. Rangkaian nukleotida tertentu akan membentuk gen tertentu pula. Gen tertentu akan menyandi protein tertentu. Jadi, kromosom merupakan totalitas gen di dalam sel yang membawa semua faktor keturunan untuk kehidupan sel. Kromosom memiliki bagian berupa lengan dan sentromer. Satuan dasar kromatin yang melingkar disebut nukleosom. Nukleosom terdiri atas sebuah loop tunggal bahan DNA yang melilit protein histon.



Gambar 2.14 Struktur kromosom yang memperlihatkan lengan (kromatid) dan sentromer.

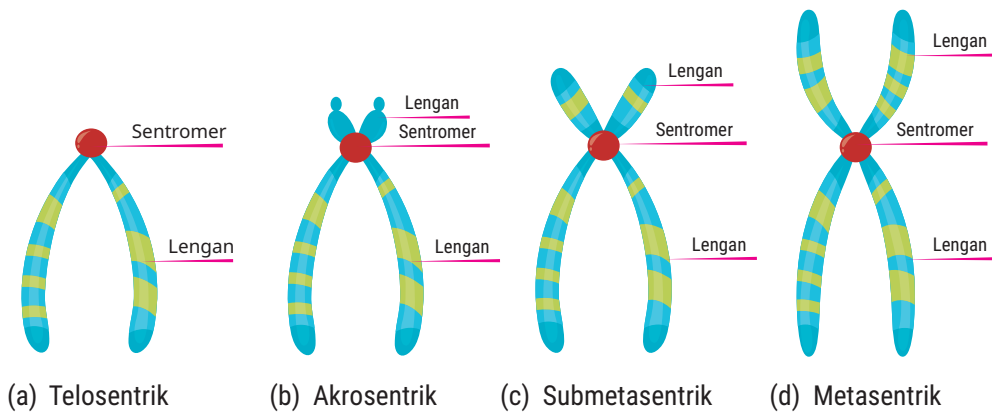
©2015 Terese Winslow LLC
U.S. Govt. has certain rights

Lengan kromosom disebut kromatid yang merupakan bagian dari badan kromosom itu sendiri. Bagian sentromer berperan dalam tahap pembelahan sel, yaitu sebagai tempat melekatnya benang-benang spindel. Apa itu benang spindel? Benang spindel adalah bagian yang menghubungkan sentriol pada saat pembelahan sel dan untuk menarik kromosom menuju kutub yang berlawanan pada saat pembelahan sel.



◀ Gambar 2.15 Benang spindel, lengan (kromatid), dan sentromer pada saat pembelahan sel.

Berdasarkan letak sentromernya, kromosom dapat dibedakan menjadi beberapa bentuk, yaitu telosentrik, akrosentrik, submetasentrik, dan metasentrik. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 2.16 Bentuk kromosom berdasarkan letak sentromer, yaitu (a) telosentrik, (b) akrosentrik, (c) submetasentrik, dan (d) metasentrik.

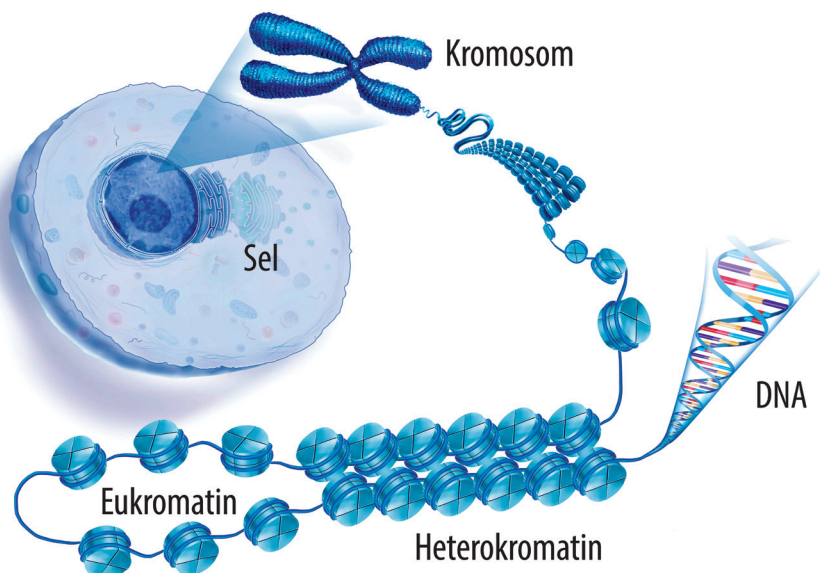
9. Struktur Kromosom pada Inti Eukariot

Berdasarkan aktivitas penelusuran video mengenai DNA, gen, dan kromosom, serta pengamatan bentuk kromosom *D. melanogaster*, kalian sudah melihat bentuk kromosom secara langsung. Dapat dikatakan

bahwa kromosom terdiri atas satu atau dua kromatid yang masing-masing tersusun atas benang-benang kromatin.

Kromosom berasal dari kata *chrome* yang artinya berwarna dan *soma* artinya badan atau tubuh. Istilah tersebut dapat diartikan sebagai badan yang dapat menyerap warna. Apa maksud dari badan yang menyerap warna? Apakah kromosom dapat menyerap warna?

Ternyata, studi mengenai kromosom memperlihatkan adanya pita-pita pada suatu kromosom sebagai akibat perbedaan intensitas penyerapan warna pada berbagai wilayahnya. Wilayah yang menyerap warna lebih pekat disebut heterokromatin, sedangkan yang berwarna lebih terang disebut eukromatin. Heterokromatin merupakan wilayah dengan DNA yang berpilin sangat kompak atau padat sehingga berwarna lebih pekat, sedangkan wilayah DNA yang berpilin lebih longgar merupakan wilayah eukromatin. Pada wilayah heterokromatin, terdapat gen-gen yang tidak aktif berekspresi, sedangkan gen-gen yang aktif berekspresi terdapat pada wilayah eukromatin.



▲ Gambar 2.17 Bagian eukromatin dan heterokromatin pada kromosom.

Secara sederhana, kromosom dapat diibaratkan sebagai asosiasi DNA dan protein histon yang memperlihatkan bentuk yang serupa dengan untaian manik-manik. Dalam keadaan sel sedang giat melakukan metabolisme, kromosom eukariotik tidak tampak. Namun, benang-benang

kromatinlah yang tampak. Biasanya, kromosom diambil pada jaringan yang sedang aktif membelah. Misalnya, jaringan yang terdapat di ujung batang, ujung akar, lingkaran kambium, kelenjar, epitel, dan tulang.

Komponen protein penyusun kromosom eukariotik, yaitu protein histon dan nonhiston. Protein histon adalah protein bersifat basa yang banyak mengandung asam amino arginin dan lisin. Terdapat lima macam protein histon, yaitu H1, H2A, H2B, H3, dan H4. Protein histon memiliki struktur primer yang stabil dan terpelihara selama evolusi. Protein ini penting dalam mempertahankan integritas fungsi dan struktur kromatin. Adapun protein nonhiston adalah protein yang bersifat asam. Separuh dari protein ini merupakan enzim-enzim dan faktor-faktor yang berperan dalam replikasi DNA dan RNA transkripsi.

AKTIVITAS 2.5

Jumlah Kromosom pada Makhluk Hidup

1. Buat kelompok yang terdiri atas 4 - 5 orang.
2. Coba lakukan studi literatur melalui internet untuk menjawab pertanyaan berikut.
 - a. Apakah jumlah kromosom ada hubungannya dengan besar kecilnya makhluk hidup?
 - b. Apakah jumlah kromosom yang sama antarmakhluk hidup dapat menunjukkan hubungan kekerabatannya?
3. Diskusikan hasil penelusuran kalian. Mintalah bantuan guru jika ada permasalahan yang belum dipahami.

10. Jumlah Kromosom

Berdasarkan Aktivitas 2.5, kalian sudah mengetahui bahwa setiap jenis organisme memiliki jumlah kromosom tetap dan dalam bentuk yang saling berpasangan. Kromosom yang saling berpasangan ini disebut kromosom homolog. Kromosom homolog memiliki ukuran, bentuk, dan jumlah gen yang sama. Jumlah kromosom spesies eukariotik beranekaragam baik hewan maupun tumbuhan, diploid maupun monoploid/haploid.

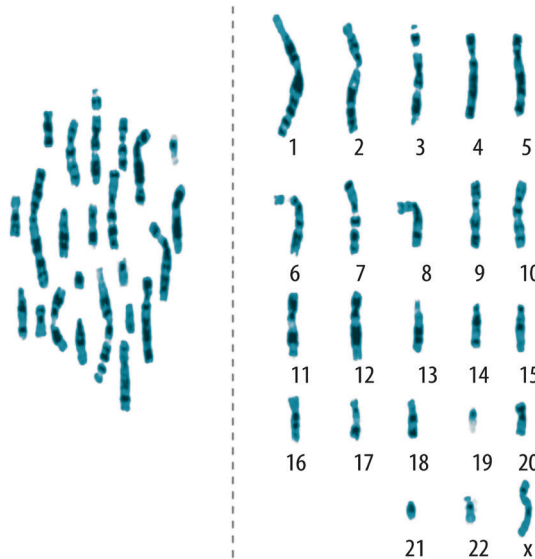
Haploid adalah kondisi pada suatu individu yang tidak memiliki pasangan kromosom dikarenakan hanya mempunyai genom tunggal. Kromosom haploid dapat digandakan dan akan menghasilkan individu

homozigot baru. Sel haploid terdapat pada gamet yang dapat menghasilkan sifat diploid. Hal ini dikarenakan sel gamet betina yang sudah dibuahi sel jantan akan melebur dan berkembang menjadi zigot yang bersifat diploid. Diploid merupakan kondisi berlawanan dari haploid, di mana pada diploid terdapat dua kromosom homolog dalam satu set ($2n$). Kondisi diploid ditemukan pada sel-sel tubuh/sel somatik. Selain haploid dan diploid, ada kondisi lain, yaitu triploid ($3n$) dan poliploid (memiliki banyak kromosom).

AKTIVITAS 2.6

Menyusun Kariotip

1. Perbanyaklah dengan mengopi atau menggambar sendiri kromosom-kromosom penyusun kariotip suatu individu di bawah ini.



Gambar 2.18
Kariotip.

2. Gunting masing-masing kromosom pada gambar di sebelah kiri.
3. Susun kromosom-kromosom berpasangan pada gambar di sebelah kanan. Mulai dari kromosom terbesar dengan nomor terendah.
4. Susun pasangan kromosom tersebut menjadi empat baris. Baris pertama nomor 1-5, baris kedua nomor 6 - 12, baris ketiga nomor 13 - 18, dan baris terakhir kromosom nomor 19 dan kromosom kelamin.
5. Setelah selesai, tentukan jenis kelamin apa yang ditunjukkan oleh kromosom tersebut.

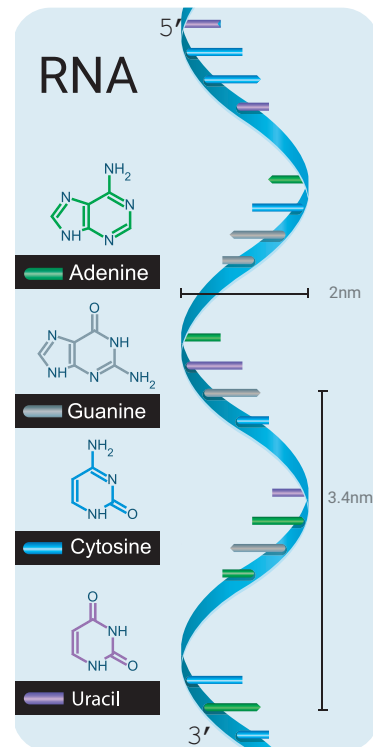
11. Jenis Kromosom

Dari hasil Aktivitas 2.6, kalian dapat melihat kariotip dari individu yang menunjukkan adanya kromosom autosom dan gonosom. Kromosom autosom disebut juga kromosom tubuh dan kromosom gonosom disebut juga kromosom seks. Istilah kromosom tubuh dan kromosom seks lebih sering menyebabkan miskonsepsi. Kromosom tubuh dianggap hanya berada di sel tubuh dan kromosom seks hanya berada di sel seks/kelamin. Sebenarnya, kromosom tubuh dan kromosom seks terletak di semua bagian sel individu baik sel tubuh maupun sel kelamin. Kedua kromosom tersebut mengekspresikan sifat-sifat yang terkait ciri fenotip baik morfologi, sifat, maupun ekspresi kelamin.

Berdasarkan dogma sentral yang telah dibahas sebelumnya, dapat diketahui bahwa gen sangat penting dalam pembentukan protein yang dapat menentukan sifat. Bagaimana urutan aktivasi gen dalam membentuk protein? Gen yang merupakan bagian dari DNA akan membentuk molekul perantara yang disebut *ribonucleic acid* (RNA).

12. RNA (*ribonucleic acid*)

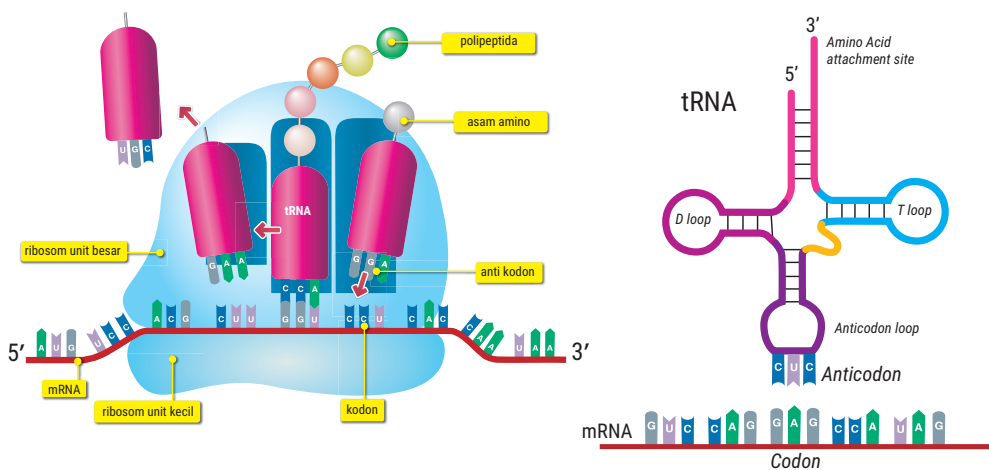
RNA atau asam ribonukleat merupakan polinukleotida seperti halnya DNA. Namun, RNA hanya terdiri atas satu rantai (*single stranded*). Gula pentosa yang menyusun RNA berupa gula ribose. Basa nitrogen pada RNA sedikit berbeda dibandingkan DNA. Jika pada DNA basa pirimidin berupa timin (T) maka pada RNA basa pirimidin timin (T) digantikan dengan urasil (U). Umumnya, RNA terletak di dalam inti sel, sitoplasma, dan ribosom. Jenis dan jumlah RNA dapat berubah bergantung aktivitas sintesis protein.



Gambar 2.19
RNA terdiri atas satu rantai.

Ada tiga jenis RNA, yaitu *messenger* RNA (mRNA) atau RNA duta (dRNA), transfer/transport RNA (tRNA), dan ribosom RNA (rRNA).

- Messenger* RNA (mRNA) berfungsi membawa pesan informasi genetik dari DNA di inti sel ke ribosom di sitoplasma. Pesan yang dibawa berupa triplet basa nitrogen yang ada pada mRNA yang disebut kodon. Kodon pada mRNA merupakan komplemen dari kodogen, yaitu urutan basa-basa nitrogen/nukleotida pada DNA yang dipakai sebagai pola cetakan. Pembentukan mRNA hanya terjadi saat akan dilakukan sintesis protein. Jika proses sintesis protein selesai, mRNA akan segera dihancurkan kembali.
- Transfer RNA (tRNA) atau RNA pemindah berfungsi mengenali kodon dan menerjemahkan menjadi asam amino di ribosom. tRNA dibuat di inti sel dan dibawa ke sitoplasma. Pada bagian tRNA terdapat basa-basa nitrogen yang saling berpasangan dan ada pula basa-basa nitrogen yang tidak saling berpasangan. Akibatnya, tRNA berbentuk seperti daun semangi. Di mana bagian yang tidak berpasangan membentuk struktur membulat. Ada tiga urutan basa yang terdapat di ujung lengan tRNA yang akan cocok dengan kodon yang terdapat di mRNA, urutan basa tersebut dikenal sebagai antikodon. Sebagai contoh, jika kodon dalam mRNA mempunyai urutan ACC UAU GGA maka antikodon yang sesuai pada tRNA urutannya UGG AUA CCU.
- Ribosom RNA (rRNA) dibuat di inti sel dan akan ditempatkan ke ribosom. rRNA berfungsi sebagai tempat sintesis protein. Ribosom terdiri atas 2 subunit, yaitu subunit kecil yang berperan mengikat mRNA dan subunit besar yang berperan mengikat tRNA yang sesuai.



▲ Gambar 2.20 Molekul RNA pada ribosom.

13. Genotip dan Keterkaitannya dengan Sifat

Sifat fenotip ditentukan oleh interaksi sifat gen dominan dan resesif. Gen dominan diberi simbol huruf kapital, sedangkan gen resesif diberi simbol huruf kecil. Gen dominan selalu muncul sebagai sifat yang tampak, sedangkan gen resesif hanya bisa muncul sebagai sifat yang tampak apabila berpasangan dengan gen resesif pasangannya. Jadi, genotip AA atau Aa akan muncul sebagai fenotip A. Adapun gen a hanya akan muncul sebagai fenotip a, apabila genotipnya aa. Organisme yang mempunyai dua gen yang sama pada satu lokus (AA atau aa) disebut homozigot, sedangkan yang mempunyai pasangan gen alternatif (Aa) disebut heterozigot. Contoh organisme homozigot memiliki batang tinggi dengan genotip (AA), sedangkan organisme heterozigotnya memiliki genotip (Aa) walaupun fenotipnya batang tinggi. Gen yang terdapat pada lokus yang sama pada kromosom homolog, tetapi sifatnya berlawanan atau gen alternatif (A atau a) disebut alel.

AKTIVITAS 2.7

Identifikasi Forensik dengan Teknologi Genetika

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 4 – 5 orang.
2. Simak dengan saksama uraian berikut!
Ada suatu kasus pembunuhan yang terjadi di sebuah rumah. Pelaku meninggalkan jejak berupa bercak darah dan puntung rokok yang terdapat sel epitel bibir tertinggal di sana. Polisi melakukan identifikasi forensik untuk mencari sang pelaku dengan menerapkan teknologi DNA. Ternyata, metode forensik tersebut menggunakan prinsip genetika untuk mengidentifikasi pelaku dengan kesamaan struktur DNA pelaku dan bukti yang berada di lokasi.
3. Jelaskan bagaimana prinsip pemeriksaan forensik dengan menerapkan teknologi DNA seperti pada kasus di atas! Lakukan eksplorasi melalui studi literatur mengenai hal tersebut.
4. Diskusikan dengan teman sekelompok. Lalu, tukarkan informasi dari hasil diskusi kalian dengan kelompok lain.

14. Kode Genetik

Aktivitas 2.7 menunjukkan bahwa para ahli forensik menggunakan profil DNA untuk menentukan apakah sampel dari tersangka cocok dengan sampel yang terdapat di lokasi kejadian. Dengan membandingkan DNA tersangka di tempat kejadian perkara dengan DNA anggota keluarga terdekat tersangka, seperti ayah atau saudara kandungnya maka identifikasi forensik dapat dilacak.

Sidik DNA berupa garis-garis seperti *barcode* di kemasan makanan atau minuman yang berkisar antara 30 sampai 100 sekuens (urutan basa nukleotida) rantai kode genetik. Apa itu kode genetik? Kode genetik adalah kode-kode yang menentukan macam protein yang akan dibuat. Kode genetik ditentukan oleh urutan tiga basa nitrogen atau kode triplet berupa urutan kodon pada mRNA. Urutan kodon ini akan menyandikan urutan asam amino yang akan dibentuk menjadi polipeptida yang kemudian akan menjadi protein.

Umumnya, jumlah asam amino yang ada sebanyak 20 jenis, sedangkan jumlah kemungkinan kode triplet yang disusun oleh 4 macam basa nitrogen sebanyak $4^3 = 64$ buah maka kemungkinan satu asam amino memiliki lebih dari satu kodon. Ciri khas suatu protein ditentukan oleh jumlah, macam, dan urutan asam amino yang membangunnya.

Tabel 2.1 Tabel Kode Genetika (Kodon) Asam Amino.

Basa Pertama	Basa Kedua				Basa Ketiga
	U	C	A	G	
U	UUU } <i>Phe</i>	UCU } <i>Ser</i>	UAU } <i>Tyr</i>	UGU } <i>Cys</i>	U
	UUC } <i>Phe</i>	UCC } <i>Ser</i>	UAC } <i>Tyr</i>	UGC } <i>Cys</i>	C
	UUA } <i>Leu</i>	UCA } <i>Ser</i>	UAA "Stop"	UGA "Stop"	A
	UUG } <i>Leu</i>	UCG } <i>Ser</i>	UAG "Stop"	UGG Trp	G
C	CUU } <i>Leu</i>	CCU } <i>Pro</i>	CAU } <i>His</i>	CGU } <i>Arg</i>	U
	CUC } <i>Leu</i>	CCC } <i>Pro</i>	CAC } <i>His</i>	CGC } <i>Arg</i>	C
	CUA } <i>Leu</i>	CCA } <i>Pro</i>	CAA } <i>Gln</i>	CGA } <i>Arg</i>	A
	CUG } <i>Leu</i>	CCG } <i>Pro</i>	CAG } <i>Gln</i>	CGG } <i>Arg</i>	G
A	AUU } <i>Ile</i>	ACU } <i>Thr</i>	AAU } <i>Asn</i>	AGU } <i>Ser</i>	U
	AUC } <i>Ile</i>	ACC } <i>Thr</i>	AAC } <i>Asn</i>	AGC } <i>Ser</i>	C
	AUA } <i>Met</i>	ACA } <i>Thr</i>	AAA } <i>Lys</i>	AGA } <i>Arg</i>	A
	AUG } <i>Met</i>	ACG } <i>Thr</i>	AAG } <i>Lys</i>	AGG } <i>Arg</i>	G
G	GUU } <i>Val</i>	GCU } <i>Ala</i>	GAU } <i>Asp</i>	GGU } <i>Gly</i>	U
	GUC } <i>Val</i>	GCC } <i>Ala</i>	GAC } <i>Asp</i>	GGC } <i>Gly</i>	C
	GUA } <i>Val</i>	GCA } <i>Ala</i>	GAA } <i>Glu</i>	GGA } <i>Gly</i>	A
	GUG } <i>Val</i>	GCG } <i>Ala</i>	GAG } <i>Glu</i>	GGG } <i>Gly</i>	G

Biasanya, kode triplet ditulis dengan mengatur tiga huruf alfabet A, U, G, dan C yang masing-masing mewakili adenin, urasil, guanin, dan sitosin. Tabel kode genetik dibaca dari sisi kiri dasar triplet sebagai yang pertama, lalu dilanjutkan ke bagian kedua dan ketiga. Misal, kodon UUU pada RNA sesuai dengan asam amino fenilalanin (Phe) di sudut kanan bawah. Terdapat tiga kodon, yaitu UAG, UAA, dan UGA yang tidak mengkode asam amino apapun sehingga disebut stop kodon, yang akan melepas rantai polipeptida atau menghentikan pembentukan asam amino ketika sintesis protein, ibaratnya seperti tanda titik pada akhir kalimat. Pada Tabel 2.1 ini, kalian dapat melihat juga start kodon, yaitu AUG (Met) yang berfungsi menandai awal proses dari sintesis protein.

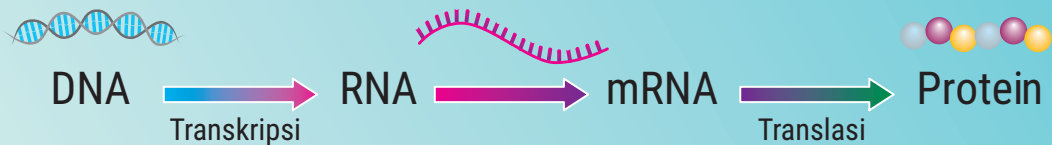
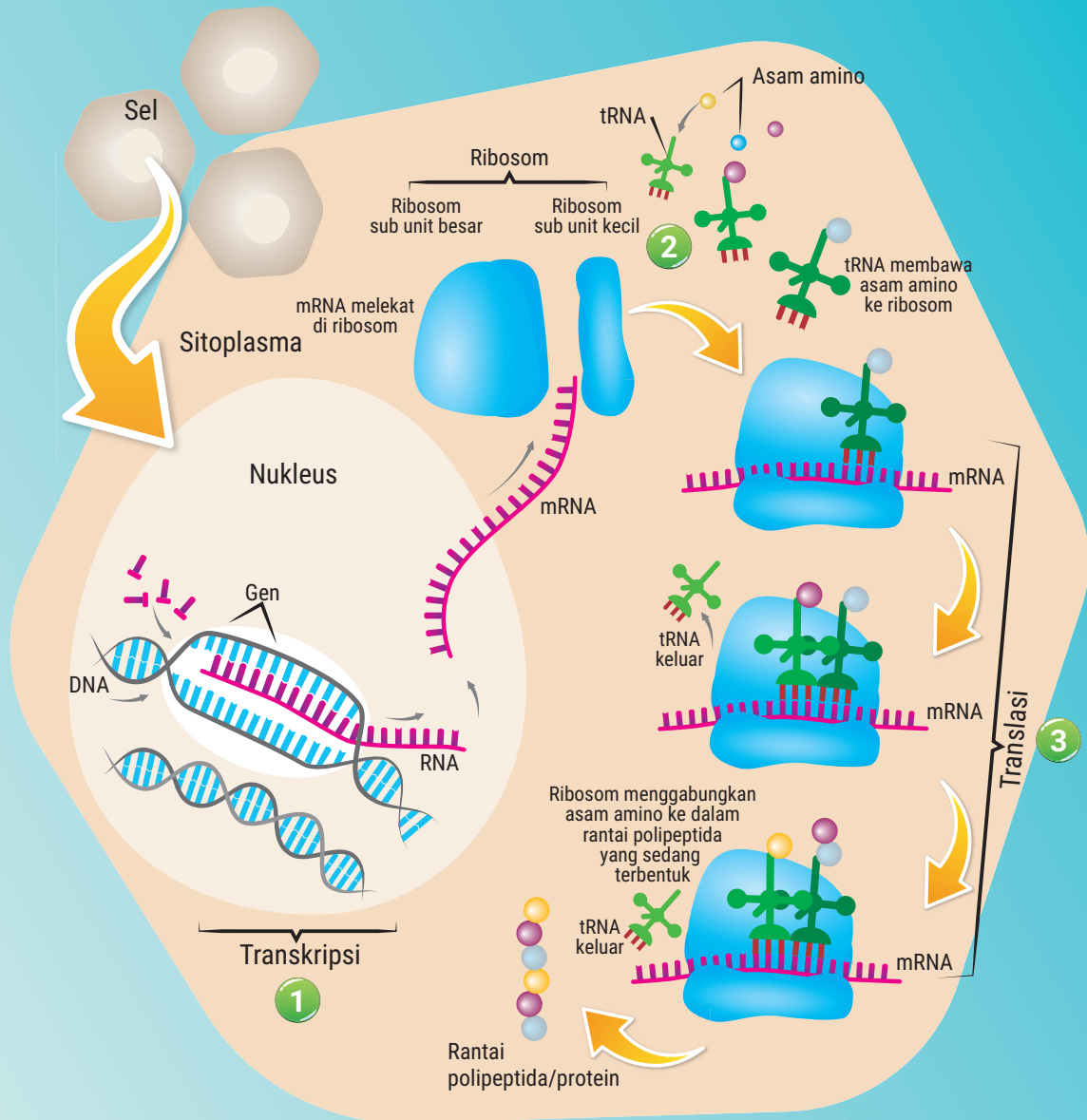
-----● B. Sintesis Protein

Apakah kalian pernah merasa lesu, gelisah, *moody*, dan galau? Tahukah kalian bahwa keadaan tersebut merupakan ciri orang yang kekurangan protein. Protein sendiri merupakan senyawa organik yang berperan penting dalam struktur dan fungsi sel makhluk hidup. Saat pembentukan protein, asam amino yang membentuk polipeptida akan melipat dan membentuk struktur khusus hingga akhirnya terbentuk protein.

Sintesis protein merupakan suatu proses yang kompleks, termasuk di dalamnya penerjemahan kode-kode RNA menjadi polipeptida. Sintesis protein melibatkan komponen DNA, RNA, asam amino, dan protein. Hubungan antara komponen yang terlibat dalam proses sintesis protein dikenal sebagai dogma sentral biologi, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Di dalam sel, DNA ditemukan di nukleus, mitokondria, dan kloroplas (misalnya, pada tumbuhan). Proses sintesis protein berlangsung di ribosom yang terletak di sitoplasma. Oleh karena DNA terletak pada suatu organel yang dibatasi membran inti maka DNA tidak dapat bergerak keluar dari kompartmen tersebut. Oleh sebab itu, dibutuhkan fasilitator berupa mRNA sebagai pembawa pesan untuk diterjemahkan di ribosom untuk pembentukan protein. Peristiwa pembacaan pesan genetik dari DNA menjadi mRNA disebut transkripsi. Selanjutnya, pesan genetik berupa kodon yang dibawa oleh mRNA diterjemahkan di ribosom menjadi urutan asam amino yang akan membentuk polipeptida, peristiwa ini disebut translasi. Secara keseluruhan proses ini disebut sebagai sintesis protein. Coba, kalian perhatikan gambar 2.21 berikut!

Sintesis Protein



▲ Gambar 2.21 Sintesis protein

Proses transkripsi terjadi di dalam nukleus. Tahap awal transkripsi, yaitu RNA polimerase akan memisahkan untaian DNA menjadi dua dengan cara bergerak dari daerah terminator ke daerah promoter. Ketika RNA polimerase sampai di promoter, terjadi proses inisiasi. Selanjutnya, RNA polimerase akan berjalan menuju terminator dan membentuk mRNA. Ketika RNA polimerase dan mRNA sampai di terminator maka proses transkripsi selesai. Proses akhir dari transkripsi ini disebut terminasi.

Setelah transkripsi selesai, selanjutnya akan masuk ke tahap translasi. Proses translasi terjadi di sitoplasma. Untuk dapat mensintesis protein yang berada di ribosom dibutuhkan fasilitator untuk membawa pesan hasil transkripsi dan membawanya ke ribosom. DNA tidak dapat bergerak sendiri menuju ke ribosom. Oleh karena itu, ketika mRNA terbentuk di proses transkripsi maka mRNA atau *messenger* RNA atau RNA “pembawa pesan” bisa membawa kode hasil salinan DNA ke ribosom. mRNA sendiri berisi kumpulan dari kodon-kodon DNA.

Ada tiga proses dalam tahap translasi, yaitu sebagai berikut.

1. Tahap inisiasi, yaitu tahap di mana kodon pertama mRNA bertemu dengan ribosom dan disebut kodon pemula (*start codon*). *Start codon* memiliki kode AUG.
2. Tahap elongasi, yaitu tahap di mana kodon yang dibawa mRNA akan diterjemahkan menjadi asam amino. Setelah itu, asam-asam amino akan digabungkan oleh tRNA yang akan membawa asam amino untuk disusun membentuk rantai polipeptida atau protein.
3. Tahap terminasi, yaitu tahap terakhir di mana proses sintesis akan berakhir setelah sampai pada kodon stop (*stop codon*). Ada tiga jenis kodon stop, yaitu UAA, UAG, dan UGA.

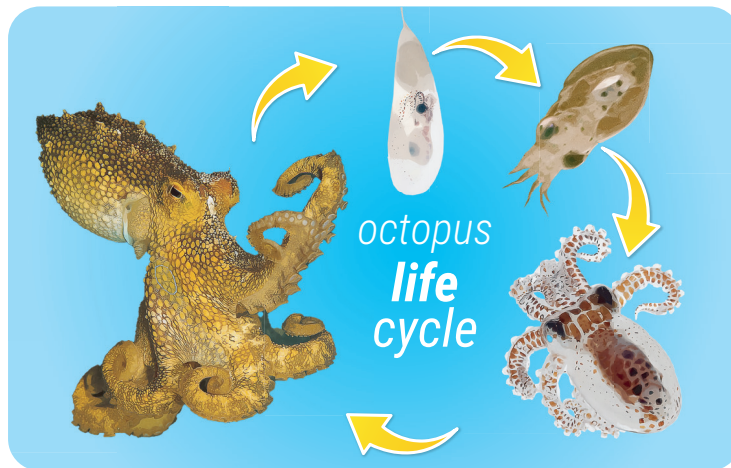
Untuk lebih mudah memahami proses sintesis protein, kalian dapat melihat video Youtube dengan kata kunci *from DNA to protein*, sintesis protein, atau dogma sentral biologi. Selain itu, coba lakukan aktivitas berikut untuk menambah pemahaman kalian mengenai sintesis protein.

AKTIVITAS 2.8

Memahami Sintesis Protein dengan Bermain Peran

1. Buat kelompok yang terdiri atas 7 - 8 orang.
2. Bagilah peran kepada setiap anggota kelompok. Misalnya, siswa bernama Steven menjadi mRNA, Mike menjadi tRNA, Afifa menjadi ribosom, Lia menjadi asam amino, dan anggota kelompok lainnya sesuai kebutuhan peran.
3. Buat properti-properti yang dapat mendukung peran masing-masing.
4. Lakukan simulasi proses sintesis protein dengan satu orang anggota kelompok menjadi narator cerita dan teman lainnya memperagakan proses sintesis protein.

C. Pembelahan Sel



▲ Gambar 2.22 Pertumbuhan *mimic octopus* (*Thaumoctopus mimicus*).

Mimic octopus merupakan gurita cerdas yang dapat menyamar saat diserang. *Mimic octopus* atau biasa disebut gurita penyamar dapat bertelur sampai sekitar 100 butir. Umumnya, telur-telur tersebut akan menetas setelah dierami induknya. Setelah menetas, telur akan menjadi anak gurita yang mirip induknya. Kemudian, anak gurita akan berubah menjadi gurita dewasa.

Bagaimana perubahan telur menjadi anak gurita dan tumbuh menjadi gurita dewasa? Perubahan ini pasti melibatkan proses pembelahan sel. Bagaimana terjadinya proses pembelahan sel pada makhluk hidup? Pembelahan sel pada makhluk hidup dapat terjadi melalui dua cara, yaitu mitosis dan meiosis. Untuk memahami proses mitosis, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 2.9

Pengamatan Mitosis pada Akar Bawang Bombai

Tujuan:

Mengetahui tahap-tahap pembelahan mitosis pada akar bawang bombai.

Alat:

- | | | |
|-----------------|------------------|-------------------|
| 1. mikroskop | 4. gelas arloji | 7. silet |
| 2. kaca objek | 5. pinset | 8. lampu spiritus |
| 3. kaca penutup | 6. wadah plastik | |

Bahan

1. bawang bombai
2. larutan *aceto orcein* 2%/aceto karmin
3. larutan HCl 1 M

Langkah percobaan:

1. Tumbuhkan bawang bombai selama empat hari pada wadah plastik berisi pasir yang dibasahi air.
2. Amati pertumbuhan bawang bombai. Dalam beberapa hari akan tumbuh akar yang akan digunakan sebagai sampel percobaan.
3. Pilih akar muda yang sedang aktif tumbuh dan potong 1 cm dari ujung. Lalu, letakkan pada gelas arloji.
4. Beri larutan HCl 1 M dan biarkan potongan akar terendam beberapa menit hingga menjadi lunak.
5. Ambil potongan akar yang sudah direndam HCl dan potong dengan silet hingga menjadi potongan-potongan kecil.
6. Letakkan potongan akar bawang pada kaca objek yang telah ditetesi *aceto orcein* 2%. Lalu, tutup dengan kaca penutup.
7. Panaskan di atas lampu spiritus, namun jangan sampai mendidih.
8. Tekan kaca penutup hingga akar bawang menyebar dan menjadi tipis.
9. Amati di bawah mikroskop dengan perbesaran rendah terlebih dahulu.
10. Gambar hasil pengamatan kalian dan bandingkan dengan literatur. lalu buatlah laporan.
11. Buat laporan dan presentasikan hasil pengamatan kalian di dalam kelas.

1. Mitosis

Pada Aktivitas 2.9, kalian telah melihat langsung proses mitosis yang terjadi pada sel tumbuhan. Kalian telah mengamati sel-sel hasil pembelahan dengan posisi kromosom yang berbeda-beda. Perbedaan posisi kromosom dapat menunjukkan tahapan-tahapan dalam pembelahan mitosis.

Mitosis merupakan pembelahan sel yang menghasilkan set kromosom dalam jumlah yang sama dengan sel induk. Dengan demikian, sel anakan yang dihasilkan identik secara genetik dengan induknya, baik jumlah maupun sifat kromosomnya. Contoh sel yang mengalami proses mitosis selain pada sel akar bawang, yaitu sel kulit dan sel darah.

Pembelahan mitosis terjadi dalam beberapa tahap. Coba kalian perhatikan Gambar 2.23 mengenai tahap pembelahan mitosis berikut.

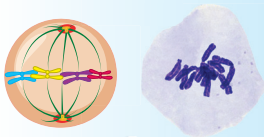
Tahap-Tahap Mitosis

Profase



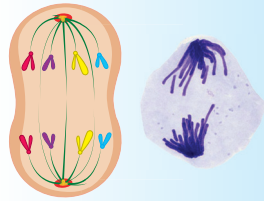
Memasuki profase benang kromatin yang telah berduplikasi pada fase interfase, mengalami kondensasi, kromosom menggulung pada protein histon membentuk kromosom. Kromosom memadat, memendek dan menjadi lebih tebal. Tiap kromosom terdiri atas 2 kromatid yang identik yang melekat pada sentromer. Nukleolus dan membran inti menghilang. Akhir profase terbentuklah benang spindel.

Metafase



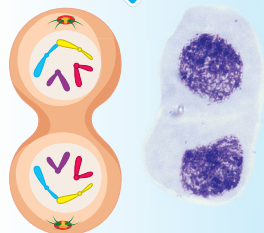
Pada fase ini, pasangan kromatid bergerak ke bagian tengah inti sel di sepanjang bidang ekuator dengan sentromer melekat pada benang spindel.

Anafase



Proses ini didahului dengan membelahnya sentromer. Benang-benang spindel memendek dan menarik kromatid hingga setiap kromatid memisahkan diri dari sentromer dan masing-masing bergerak sebagai kromosom anakan menuju kutub dari spindel yang berlawanan letaknya.

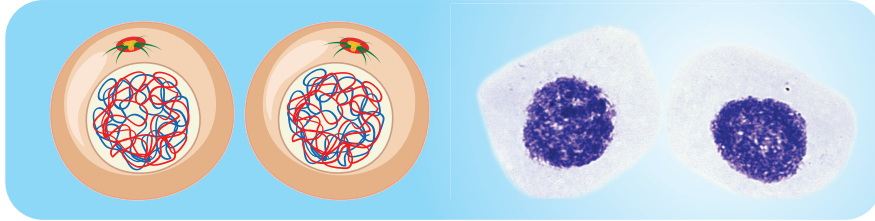
Telofase



Datangnya kromosom anakan di kutub spindel merupakan tanda dimulainya telofase. Benang-benang spindel terurai dan menghilang. Terbentuknya membran inti baru di sekeliling kromosom-kromosom pada masing-masing kutub sel.

◀ Gambar 2.23 Tahap pembelahan mitosis.

Hampir bersamaan dengan telofase, terjadi juga tahap sitokinesis. Dengan terbentuknya dua buah inti baru maka di bagian tengah sel terbentuk dinding baru. Dan berlangsunglah tahap sitokinesis atau pembelahan sitoplasma dan dibentuk oleh mikrofilamen dan mengalami pelekukan ke dalam.



▲ Gambar 24. Sitokinesis.

Selanjutnya, apa yang terjadi dengan sel anakan hasil pembelahan? Sel-sel anakan ini akan terus-menerus menghasilkan sel anakan berikutnya sehingga dari proses ini terjadilah pertumbuhan dan perkembangan dari suatu individu. Di samping untuk pertumbuhan dan perkembangan individu, hasil pembelahan mitosis dapat digunakan juga untuk mengganti sel-sel mati dan rusak.

AKTIVITAS 2.10

Siklus Sel

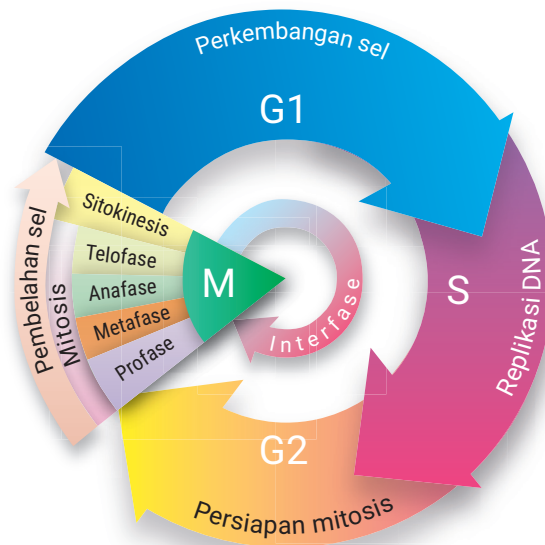
1. Bentuklah kelompok yang terdiri atas 3 – 4 orang.
2. Baca teks di bawah ini dengan cermat.
Sesekali, hasil pembelahan sel dapat mengalami masalah, tidak sesuai dengan kebutuhan. Pada keadaan ini, sel melakukan “*quality control*” sendiri. Apabila tidak sesuai, sel rusak harus dimatikan sendiri dan dibuang. Sel-sel rusak ini akan membunuh dirinya sendiri. Setiap waktu, ada saja kesalahan dalam pembelahan sel di tubuh kita. Namun, kita tidak pernah menyadarinya karena tubuh sudah mempunyai program yang secara otomatis berjalan. Namun, bagaimana jika suatu saat program “bunuh diri sel” gagal? Dalam keadaan ini, sel-sel yang salah dalam pembelahan sel tidak terdeteksi sehingga tidak musnah. Sebaliknya, sel-sel ini berkembang biak dengan mempertahankan kesalahannya.
3. Coba jelaskan bagaimana jika terjadi kasus seperti di atas? Apa yang terjadi pada tubuh kita? Diskusikan bersama kelompok kalian.
4. Coba cari satu contoh kasus melalui literatur ilmiah dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 2.10, kalian tahu bahwa tubuh memiliki proses pembelahan sel yang berjalan secara otomatis. Begitu pula jika ada sel yang rusak maka tubuh secara otomatis akan mengeliminasinya. Jika proses eliminasi tidak terjadi maka akan menimbulkan suatu gangguan terhadap individu, misalnya berupa penyakit.

2. Siklus Sel

Proses yang terjadi antara satu pembelahan sel dan pembelahan sel berikutnya disebut dengan **siklus sel**. Siklus sel terdiri atas tiga tahap, yaitu:

- interfase, yaitu tahap persiapan untuk proses berikutnya.
- mitosis, yaitu pembelahan inti atau kariokinesis.
- pembelahan sel, yaitu pembelahan sitoplasma atau sitokinesis.



▲ Gambar 2.25 Siklus sel.

Sebagian besar waktu siklus sel dihabiskan dalam tahap interfase. Interfase sering dikatakan sebagai tahap ketika sel beristirahat. Pada tahap ini, sel tidak melakukan pembelahan. Namun, hal ini tidak sepenuhnya benar. Hal ini dikarenakan pada fase ini terjadi proses penimbunan energi dengan menyerap energi dan membangun protoplasma untuk mempersiapkan proses pembelahan sel.

Pada tahap interfase, sentriol pada sel hewan akan membelah. Selama interfase, kromosom tampak seperti untaian benang tipis yang disebut kromatin. Sebelum sel membelah, masing-masing untai kromatin bereplikasi atau menduplikasi diri menghasilkan dua untai kromatin identik yang berada pada satu titik yang disebut sentromer.



▲ Gambar 2.26 Interfase.

Setelah melalui tahap interfase, selanjutnya siklus sel menuju ke tahap kariokinesis. Pada tahap ini, terjadi pembelahan inti sel yang meliputi profase, metafase, anafase, telophase, dan sitokinesis. Tahapan tersebut sama seperti tahapan pada fase mitosis.

AKTIVITAS 2.11

Sel Gamet dan Sel Tubuh

Semua makhluk hidup tidak ada yang abadi. Pada akhirnya, semua makhluk hidup akan mati. Untuk dapat mempertahankan keberlangsungan jenisnya sehingga tidak punah maka makhluk hidup melakukan reproduksi dengan menghasilkan makhluk hidup baru yang mirip dengan induknya.

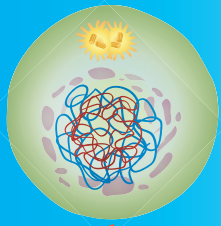
Untuk dapat lebih memahami bagaimana reproduksi seksual terjadi, coba jawab pertanyaan berikut!

1. Apa itu sel gamet?
2. Apa perbedaan sel gamet dan sel tubuh?
3. Bagaimana pembelahan sel pada organisme untuk menghasilkan sel gamet?

Coba cari jawaban dari pertanyaan di atas melalui studi literatur terpercaya. Lalu, presentasikan jawaban kalian di depan kelas!

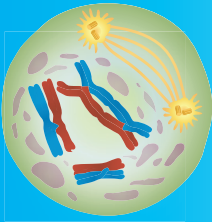
3. Meiosis

Setelah melakukan Aktivitas 2.11, kalian sudah mengetahui bahwa salah satu jenis pembelahan sel pada organisme yang bereproduksi secara seksual, yaitu meiosis. Meiosis merupakan pembelahan sel yang menghasilkan empat sel anak dengan masing-masing sel anakan memiliki setengah dari jumlah kromosom sel induk. Meiosis terjadi saat pembentukan gamet-gamet saja. Pembelahan ini berlangsung dalam dua tahap, yaitu meiosis I dan meiosis II.



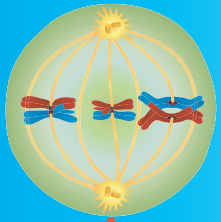
Interfase

Tahapan yang terjadi sebelum pembelahan sel yaitu seluruh kebutuhan yang diperlukan pada pembelahan sel dipersiapkan. Tahap ini dibagi menjadi 3 yaitu fase G1 (gap pertama), fase S (sintesis), fase G2 (gap kedua). Nukleus dan *nucleolus* terlihat jelas, kromosom pada sel tidak terlihat karena masih dalam bentuk kromatin.



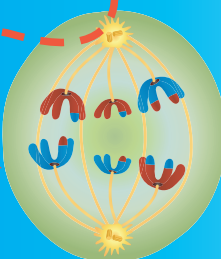
Profase I

Pada tahap profase I, kromatin menebal dan berubah menjadi kromosom. Kromosom tersebut terdiri dari 2 kromatid. Kromosom tersebut kemudian saling berpasangan dengan homolognya. Pasangan kromosom homolog pada posisi ini disebut sinapsis. Karena posisinya yang saling berdekatan antara dua kromatin memungkinkan terjadinya pindah silang. Selanjutnya membran inti mulai menghilang.



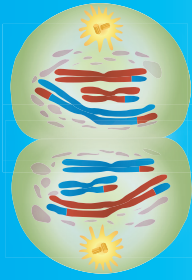
Metafase I

Pada tahap metaphase I, kromosom homolog mulai bersusun sedemikian rupa di bagian tengah atau ekuator dengan posisi berpasangan. Serat spindel menempel pada dua sentromer di masing-masing kromosom homolog.



Anafase I

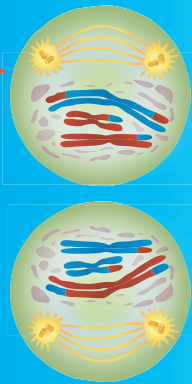
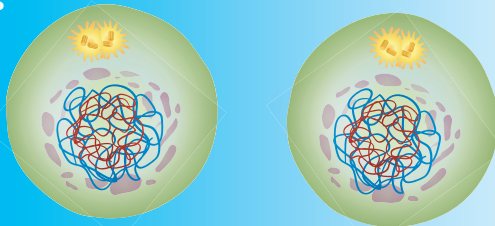
Pada anafase I, masing-masing kromosom homolog akan bergerak menuju kutub yang berlawanan akibat adanya tarikan dari benang gelendong. Dengan terpisahnya kedua kromosom homolog ini, maka pada tahap selanjutnya yaitu telophase I, jumlah kromosom telah menjadi setengah dari kromosom induk.



Telofase I dan Sitokinesis

Pada tahap telophase I ini, membrane inti mulai terbentuk kembali dan terjadi proses sitokinesis dimana sitoplasma dari satu sel membelah menjadi dua sel anak dengan kromosom haploid atau setengah dari kromosom induk (n).

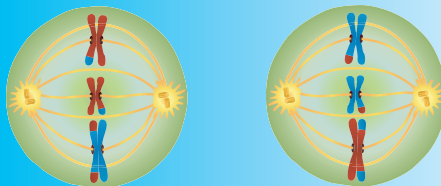
Interkinesis



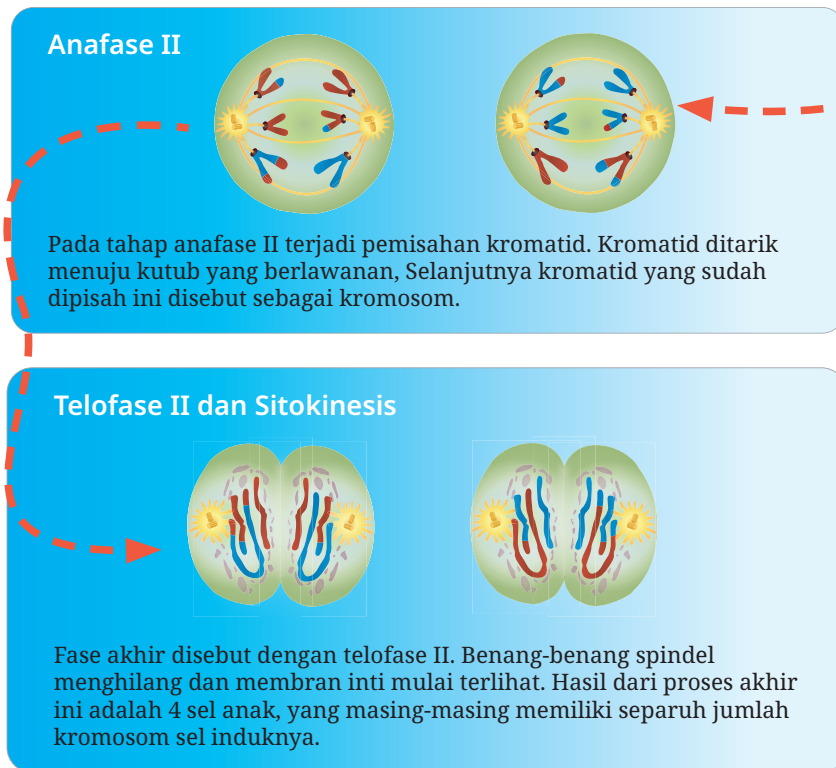
Profase II

Profase II ini, sentrosom membelah menjadi 2 sentriol yang akan bergerak ke kutub yang berlawanan. Selanjutnya, kromosom akan mulai memendek dan menebal diikuti dengan menghilangnya membran inti sel. Pada tahap ini mulai terbentuk benang-benang spindel.

Metafase II



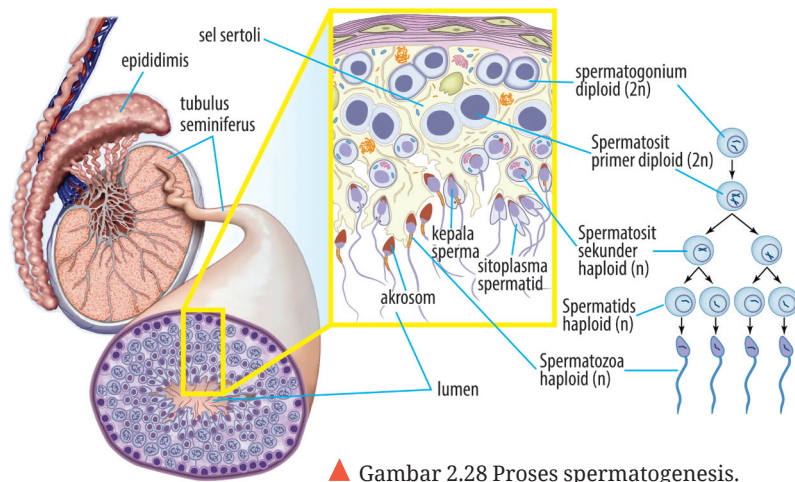
Pada tahap metafase II, kromosom mulai tersusun rapi pada bidang ekuator. Dengan susunan seperti pada metaphase mitosis. Mulai tersusun benang-benang spindel yang salah satu ujungnya melekat pada sentromer, ujung lainnya melekat pada kutub yang berlawanan.



▲ Gambar 2.27 Tahapan meiosis I dan meiosis II.

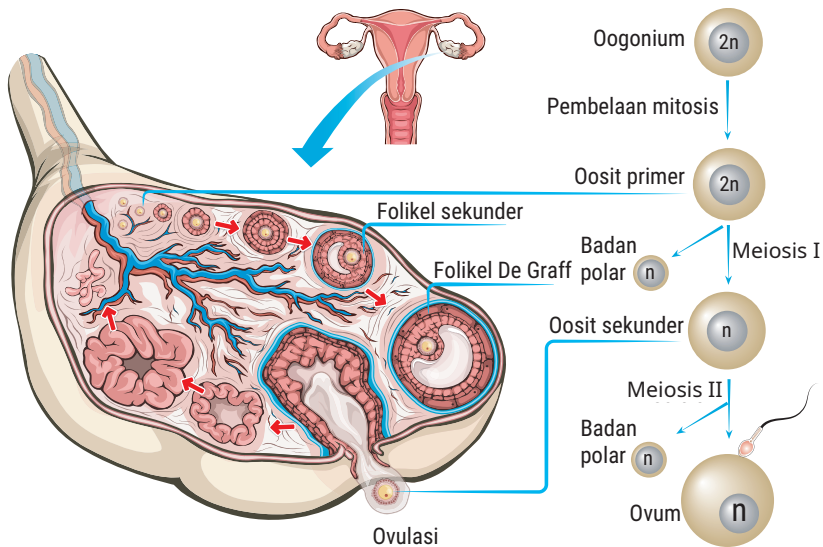
4. Gametogenesis

Setelah mempelajari meiosis, kalian sudah mengetahui bahwa pada proses meiosis terjadi pembentukan gamet atau gametogenesis. Gametogenesis merupakan proses pembentukan dan perkembangan sel germinal diploid ($2n$) menjadi sel kelamin (ovum dan spermatozoa) haploid (n). Proses pembentukan ovum disebut oogenesis. Adapun proses pembentukan spermatozoa disebut spermatogenesis.



▲ Gambar 2.28 Proses spermatogenesis.

Coba, kalian perhatikan Gambar 2.28. Spermatogenesis adalah proses di mana sel-sel germinal primer jantan mengalami pembelahan dan menghasilkan sejumlah sel yang disebut spermatogonium. Selanjutnya, spermatogonium (diploid/ $2n$) berdiferensiasi menjadi spermatisit primer yang masih bersifat diploid ($2n$). Setiap spermatisit primer ($2n$) akan membelah menjadi dua spermatisit sekunder yang bersifat haploid (n) melalui meiosis I. Kemudian, masing-masing spermatisit sekunder membelah menjadi 2 spermatis (n) melalui meiosis II. Selanjutnya, spermatis berkembang menjadi spermatozoa matang haploid (n) dan dikenal sebagai sel sperma.



▲ Gambar 2.29 Proses oogenesis.

Coba, kalian perhatikan Gambar 2.29. Gambar tersebut menunjukkan proses oogenesis. Oogenesis adalah proses pembentukan sel telur. Sel induk telur yang dikenal dengan oogonium ($2n$) menjadi besar sebelum membelah secara meiosis. Sel ini disebut oosit primer ($2n$). Berbeda dengan spermatogenesis, sel oosit primer jauh lebih besar dibandingkan spermatosit primer karena mengandung komponen sitoplasmik lebih banyak. Oosit primer membelah menjadi dua oosit sekunder melalui meiosis I. Satu oosit sekunder (n) akan melakukan meiosis II dan menghasilkan satu sel telur fungsional dan satu badan kutub yang berdegenerasi. Satu sel oosit sekunder lain yang berukuran lebih kecil yang disebut badan kutub pertama akan mengalami degenerasi (mati). Dengan demikian, oogenesis menghasilkan empat sel haploid (n), di mana hanya ada satu sel fungsional dan tiga lainnya berdegenerasi.

AKTIVITAS 2.12

Membedakan Mitosis dan Meiosis

1. Buatlah kelompok yang terdiri atas 4 - 5 orang untuk bekerja sama menyusun gambar sel dalam proses mitosis dan meiosis, layaknya menyusun suatu puzzle.
2. Susun gambar sel tersebut sesuai dengan tahapan mitosis dan meiosis yang benar.
3. Presentasikan di depan kelas mengenai tahapan serta perbedaan mitosis dan meiosis menggunakan gambar yang telah kalian susun.
4. Perhatikan pula saat kelompok lain sedang melakukan presentasi. Coba utarakan pendapat kalian mengenai pekerjaan teman kelompok lain tersebut.

● D. Pewarisan Sifat

Berdasarkan aktivitas sebelumnya, tentunya kalian sudah memahami mengenai proses mitosis dan meiosis. Kalian juga sudah memahami bahwa proses gametogenesis mendasari pewarisan sifat dari induk kepada keturunannya. Oleh karena itu, tidak menutup kemungkinan anak dapat menyerupai orang tuanya. Pada subbab ini, kalian akan mempelajari pewarisan sifat. Sebagai pendahuluan, coba kalian lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 2.13

Mencocokkan Kemiripan Orang Tua dan Anak

1. Bawa foto ayah dan ibu kalian ke sekolah.
2. Tukar foto yang dibawa dengan teman sebangku kalian.
3. Amati foto tersebut dengan saksama.
4. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, isilah tabel di bawah ini.

Fenotipe	Ayah	Ibu	Anak (teman kalian)
Rambut (berombak, keriting, atau lurus)			
Warna kulit (terang atau gelap)			
Warna mata			
Bentuk mata			
Bentuk hidung			
Telinga (berlobus atau menempel)			

5. Berikan kesimpulan mengenai kemiripan teman kalian dengan orang tuanya. Tentukan apakah teman kalian lebih mirip ayah atau ibunya.
6. Jawablah pertanyaan berikut.
 - a. Mengapa anak menyerupai orang tuanya?
 - b. Apa yang menjadikan anak mirip dengan orang tuanya?

Dari Aktivitas 2.13, kalian mengetahui bahwa bentuk/jenis rambut, warna mata, bentuk mata, bentuk hidung, bentuk telinga, dan warna kulit merupakan sejumlah **sifat** atau **ciri** yang dapat diwariskan dari orang tua kepada anak. Sifat-sifat tersebut merupakan sifat warisan karena dapat diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Coba, kalian amati Gambar 2.30 di bawah ini. Dari foto keluarga tersebut, kalian dapat melihat adanya ciri atau sifat yang diturunkan dari orang tua kepada anak-anaknya.



▲ Gambar 2.30 Foto keluarga.
Sumber: Remigius Gunawan Susilowarno

Pewarisan sifat dipelajari dalam ilmu genetika. Para ilmuwan yang mempelajari pewarisan sifat disebut ahli genetika. Gregor Johann Mendel dianggap sebagai peletak dasar ilmu genetika atau dikenal sebagai Bapak Genetika. Semasa hidupnya, beliau senang melakukan percobaan di kebunnya untuk menyelidiki bagaimana sifat-sifat tanaman induk diturunkan kepada keturunannya.

Eksperimen Mendel dimulai pada saat beliau berada di Biara Brunn, didorong oleh keingintahuannya tentang suatu ciri tumbuhan diturunkan dari induk ke keturunannya. Mendel sangat memperhitungkan sifat atau karakter dari keturunan dan keturunan tersebut diteliti sebagai satu kelompok. Mendel juga memisahkan berbagai macam ciri dan meneliti satu jenis ciri saja pada waktu tertentu, tidak memusatkan perhatian pada tumbuhan secara keseluruhan. Dalam eksperimennya, Mendel memilih tumbuhan kacang polong. Mendel melakukan penyilangan terhadap kacang polong. Dari percobaan tersebut, Mendel melahirkan hukum pewarisan sifat, yaitu:

- a. Hukum Mendel I atau hukum pemisahan (*segregation*). Pada hukum ini, gen yang merupakan pasangan alel yang terletak pada lokus yang sama di kromosom homolog mengalami pemisahan secara bebas saat pembentukan gamet.
- b. Hukum Mendel II atau hukum berpasangan secara bebas (*independent assortment*). Pada hukum ini, gen di dalam gamet mengalami penggabungan secara bebas saat pembentukan individu baru.


1. Persilangan Monohibrid







Persilangan monohibrid adalah persilangan dengan satu sifat beda. Dengan kata lain, kita hanya memerhatikan satu sifat saja dari setiap individu, seperti warna bunga (ungu, putih, dan sebagainya) atau bentuk buah (bulat, keriput, dan sebagainya).

Hukum Mendel I ditemukan berdasarkan persilangan monohibrid, di mana pada saat pembentukan gamet kedua (G₂), gen di dalam alel yang sebelumnya berpasangan akan mengalami pemisahan secara bebas dalam sel anakan yang berbentuk gamet.

Mendel melakukan persilangan monohibrid dengan satu sifat beda yang menunjukkan sifat dominansi yang muncul secara penuh. Persilangan pada kasus dominan penuh akan terjadi apabila sifat gen yang satu lebih kuat dibandingkan dengan sifat gen yang lain. Sifat gen yang lebih kuat tersebut dapat menutupi sifat gen yang lemah. Gen yang memiliki sifat kuat disebut gen dominan dan gen yang memiliki sifat lemah disebut gen resesif. Perlu kalian ingat, fenotip merupakan sifat yang tampak dan dapat diamati secara langsung.

Tabel 2.2 Percobaan Mendel yang Melibatkan Pewarisan Sifat Monohibrid.

Sifat Tumbuhan Induk	Generasi F1 (sifat yang muncul dominan)	Generasi F2	Rasio Dominan terhadap Resesif pada Generasi F2
biji bulat x biji keriput 	semua bulat	5474 bulat 1850 keriput	2.96 : 1

biji kuning x biji hijau 	semua kuning	6022 kuning 2001 hijau	3.01 : 1
bunga ungu x bunga putih 	semua ungu	705 ungu 224 putih	3.15 : 1
polong gembung x polong kisut 	semua gembung	882 gembung 299 kisut	2.95 : 1
polong hijau x polong kuning 	semua hijau	428 hijau 152 kuning	2.82 : 1
bunga aksial x bunga terminal 	semua aksial	651 aksial 207 terminal	3.14 : 1
batang panjang x batang pendek 	semua panjang	787 panjang 277 pendek	2.84 : 1

Berdasarkan persilangan pada tabel di atas, kalian dapat mengetahui perbandingan fenotip dan genotip dari percobaan monohibrid yang dilakukan Mendel. Jika kalian perhatikan, keturunan pertama dari persilangan bunga berwarna ungu (PP) dan bunga berwarna putih (pp) didapatkan keturunan semuanya memiliki bunga berwarna ungu (Pp). Persilangan monohibrid tersebut menunjukkan pada F1 dengan genotip Pp di mana karakter p (resesif) tertutupi oleh karakter P dominan yang berwarna ungu. Untuk hasil F2, kalian dapat mengetahui bahwa didapatkan hasil perbandingan fenotipi sebesar 3:1.

2. Persilangan Dihibrid

Pada persilangan monohibrid sebelumnya, kalian hanya memerhatikan satu sifat beda. Pada persilangan dihibrid, kalian akan memerhatikan dua sifat beda atau lebih. Misalkan, warna buah dan bentuk buah atau bentuk bibir bunga dan warna bunga.

Hukum Mendel II ditemukan berdasarkan persilangan dihibrid, karena ketika pembentukan F₂, gen di dalam gamet yang semula mengalami pemisahan akan bergabung secara bebas. Contoh persilangan dihibrid, yaitu persilangan antara biji bulat kuning (BBKK) dengan biji kisut hijau (bbkk). Biji berbentuk bulat (B) dominan terhadap biji berbentuk kisut (b) dan biji warna kuning (K) dominan terhadap biji warna hijau (k). Pada persilangan tersebut dihasilkan F₁ yang semuanya berbiji bulat dan berwarna kuning. Kemudian, Mendel menyilangkan sesama tanaman F₁. Perhatikan persilangan tanaman sesama F₁ berikut.

P2:	Biji bulat warna kuning		x biji bulat warna kuning	
	BbKk		BbKk	
Gamet :	BK, Bk, bK, bk		BK, Bk, bK, bk	
F2:				
	BK	Bk	bK	bk
BK	BBKK (bulat kuning)	BBKk (Bulat kuning)	BbKK (Bulat kuning)	BbKk (Bulat kuning)
Bk	BBKk Bulat kuning	BBkk Bulat hijau	BbKk Bulat kuning	Bbkk Bulat hijau
bK	BbKK Bulat kuning	BbKk Bulat kuning	bbKK Keriput kuning	bbKk Keriput kuning
bk	BbKk Bulat kuning	Bbkk Bulat hijau	bbKk Keriput kuning	bbkk Keriput hijau
Fenotip:	9 Bulat kuning	: 3 bulat hijau	: 3 keriput kuning	: 1 keriput hijau
	9	: 3	: 3	: 1

Dari persilangan tanaman sesama F₁ dihasilkan tanaman F₂ yang memiliki empat kombinasi fenotip, yaitu berbiji bulat kuning, bulat hijau, keriput kuning, dan keriput hijau dengan perbandingan 9 : 3 : 3 : 1. Kombinasi hasil F₂ tersebut menunjukkan adanya pengelompokan dua pasang gen secara bebas yang dikenal dengan hukum Mendel II.

Untuk mempermudah perhitungan hasil persilangan genetik, kalian dapat menggunakan metode Punnett atau dikenal dengan metode segi empat Punnett. Metode Punnett adalah cara cepat dan bermanfaat untuk merangkum dan berlatih melacak persilangan genetik. Berikut contoh

metode Punnett untuk menentukan persilangan sesama antara tumbuhan dengan buah bulat (Bb).

Gamet	B	b
B	BB (bulat)	Bb (bulat)
b	Bb (bulat)	bb (keriput)

Setelah mempelajari mengenai persilangan monohybrid, dihibrid, dan metode Punnett, sekarang coba kalian terapkan konsep tersebut untuk menjawab pertanyaan pada kegiatan berikut di aktivitas 2.14.

AKTIVITAS 2.14

Ayo Berlatih

- Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.
 - Seorang siswa melakukan percobaan monohybrid terhadap 20 tumbuhan kacang ercis untuk menguji teori Mendel. Namun, siswa tersebut tidak memperoleh rasio 3 : 1 seperti yang diharapkan pada generasi F₂.
Mengapa rasio tersebut tidak tercapai? Berikan alasannya!
Untuk menjawab hal tersebut, kalian dapat melakukan percobaan menggunakan kancing genetika.
 - Seorang petani manggis melakukan persilangan tanaman manggis berbuah manis (Aa) dengan tanaman manggis berbuah asam (aa).
Berapa rasio kemungkinan munculnya tanaman manggis buah manis dari persilangan tersebut?
 - Tanaman berbatang tinggi dan berbuah manis (TTMM) disilangkan dengan tanaman berbatang pendek dan berbuah asam (ttmm).
Berapa persen tanaman berbatang tinggi dan berbuah asam serta berbatang pendek dan berbuah manis apabila persilangan sampai F₂?
- Setelah mendapatkan jawabannya, coba cocokkan jawaban kalian dengan teman sebangku kalian. Apabila ada jawaban yang berbeda, kalian dapat berdiskusi bersama.

AKTIVITAS 2.15

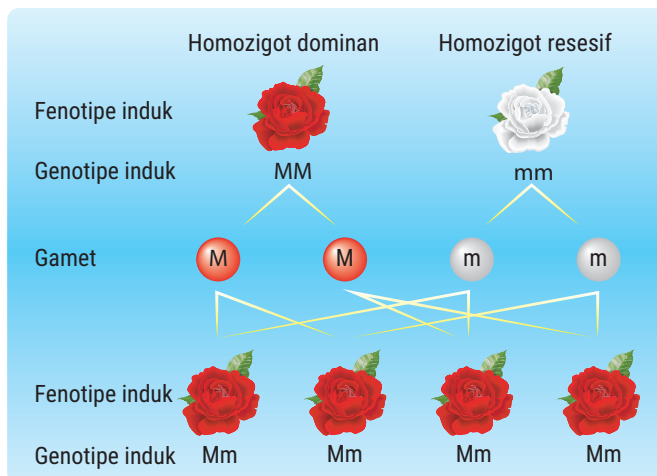
Sifat Resesif dan Dominan

Organisme yang memiliki sifat dominan tidak lebih sehat atau kuat daripada organisme yang memiliki sifat resesif dan sebaliknya. Carilah fakta-fakta mengenai berbagai penyakit mematikan tertentu pada manusia yang melibatkan sifat resesif dan dominan. Pilih satu penyakit dan buat makalah mengenai penyakit tersebut kaitannya dengan sifat resesif dan dominan. Lalu, presentasikan makalah tersebut di depan kelas.

3. Uji Silang

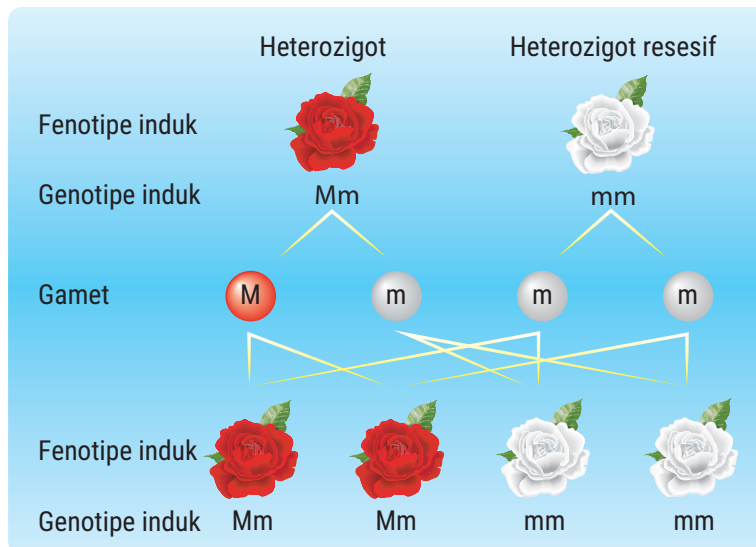
Setelah melakukan Aktivitas 2.15, kalian sudah tahu mengenai sifat resesif dan dominan. Genotip organisme yang menunjukkan sifat dominan dapat ditentukan dengan cara menyilangkan organisme induk homozigot dominan dengan organisme induk homozigot resesif. Cara tersebut dikenal sebagai **uji silang**.

Mari kita coba menyilangkan bunga mawar merah (MM) dengan mawar putih (mm) di mana M bersifat dominan penuh. Persilangan untuk menentukan genotip keturunannya 100% merah heterozigot (Mm) ditunjukkan pada persilangan berikut.



▲ Gambar 2.31 uji silang melibatkan genotipe homozigot dominan.

Bila organisme heterozigot disilangkan maka setengah jumlah total keturunan akan menunjukkan sifat dominan. Sisanya lagi akan menunjukkan sifat resesif. Perhatikan persilangan berikut.



▲ Gambar 2.32 uji silang melibatkan genotipe heterozigot

4. Penyimpangan Semu Hukum Mendel

Penyimpangan semu hukum Mendel merupakan bentuk persilangan yang menghasilkan rasio fenotip yang berbeda dengan dasar hukum Mendel. Mengapa disebut dengan penyimpangan semu? Hal tersebut dikarenakan hukum Mendel masih berlaku dalam pola pewarisan tersebut, namun terdapat sedikit perbedaan akibat sifat gen-gen yang unik. Ada beberapa macam penyimpangan semu hukum Mendel. Coba, kalian lakukan Aktivitas 2.16 sebagai permulaan dalam mempelajari penyimpangan semu hukum Mendel.

AKTIVITAS 2.16

Ayo Bereksplorasi

1. Buat kelompok yang terdiri atas 5 orang.
2. Amati jari anggota kelompok kalian untuk melihat ada tidaknya rambut di bagian jari.
3. Coba cari tahu, apa penyebab munculnya fenotip tersebut melalui sumber terpercaya.
4. Diskusikan dalam kelompok kalian dan persentasikan di depan kelas.

a. Alel majemuk

Setelah melakukan Aktivitas 2.16, ternyata ada gen yang bertugas menentukan genotip sifat rambut jari yang dipengaruhi oleh alel majemuk atau alel ganda. Selain itu, golongan darah manusia juga merupakan contoh sifat dengan alel majemuk.

Alel majemuk adalah istilah untuk gen yang memiliki lebih dari dua alel. Misalnya, pada penggolongan darah AB0. Ada empat golongan darah AB0 dalam populasi manusia, yaitu golongan darah A, B, AB, dan 0. Sejauh ini, kita mengasumsikan bahwa hanya ada dua alel yang mungkin untuk suatu sifat tertentu. Ternyata, dalam suatu populasi dimungkinkan ada sifat yang ditentukan oleh lebih dari dua alel. Alel untuk golongan darah A, B, dan 0 disimbolkan secara berturut-turut dengan I^A , I^B , dan I^O . I^A dan I^B dominan terhadap I^O , namun I^A dan I^B menunjukkan kodominansi. Apa itu kodominansi?

Tabel 2.3 Golongan Darah Manusia dan Genotipnya

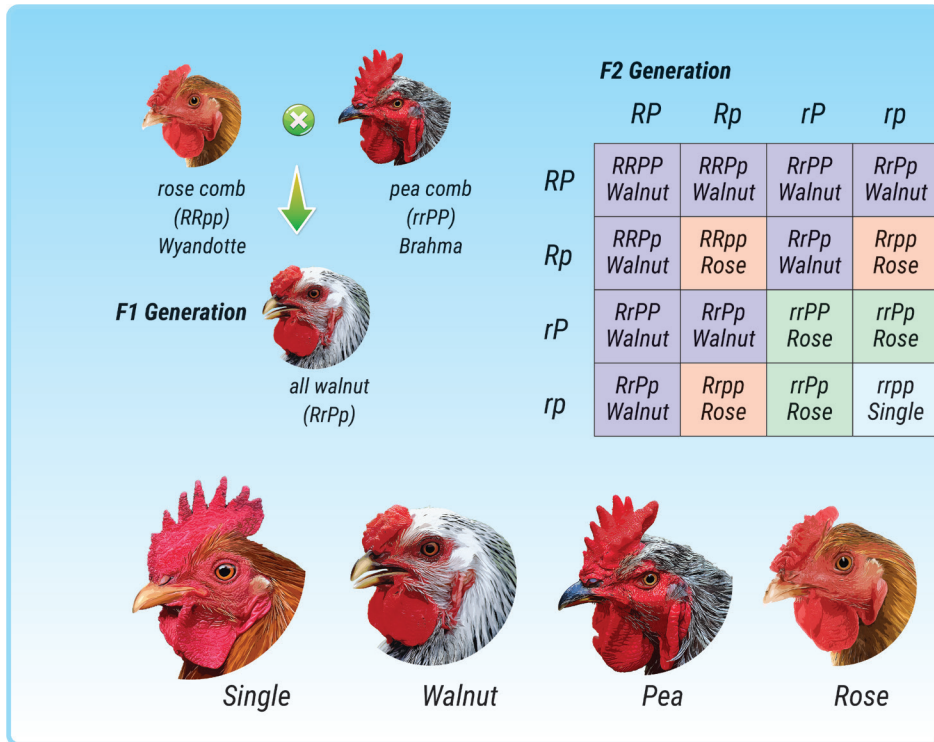
Golongan Darah	Genotip
A	$I^A I^A$ atau $I^A I^O$
B	$I^B I^B$ atau $I^B I^O$
AB	$I^A I^B$
O	$I^O I^O$

b. Kodominansi

Pada Tabel 2.5, kalian dapat melihat contoh kodominansi pada golongan darah AB dengan genotipe $I^A I^B$. Pada golongan darah AB, genotipnya menunjukkan bahwa tidak ada salah satu alel yang lebih dominan antara $I^A I^B$ sehingga fenotipnya muncul sebagai golongan darah AB. Jadi, dapat dikatakan bahwa kodominansi terjadi ketika dua alel yang mengendalikan satu sifat sama-sama terekspresikan pada organisme.

c. Atavisme

Atavisme adalah interaksi antargen berbeda alel yang menghasilkan keturunan dengan fenotip yang berbeda dari induknya. Salah satu contoh persilangan kasus atavisme yang terkenal, yaitu kasus jengger ayam.



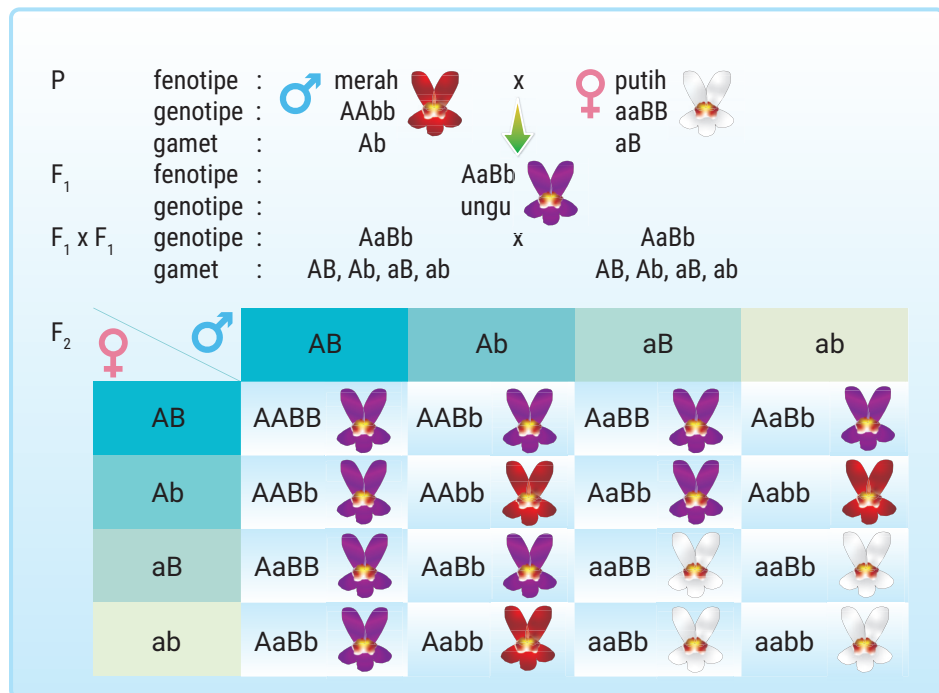
▲ Gambar 2.33 Interaksi gen antara alel R dengan alel P dalam menentukan model jengger ayam.

Bentuk jengger ayam dipengaruhi oleh dua gen berbeda alel, yaitu gen R mengatur jengger untuk bentuk rose, gen P untuk fenotip pea, gen R dan gen P jika bertemu membentuk fenotip walnut. Jika gen r bertemu p menimbulkan fenotip single. Berdasarkan hasil persilangan pada gambar di atas, diperoleh rasio fenotip 9 Walnut : 3 Rose : 3 Pea : 1 single. Dengan adanya interaksi antara dua gen dominan dan gen resesif seluruhnya akan menghasilkan variasi fenotip baru, yaitu pea. Gen dominan R yang berinteraksi dengan gen dominan P akan menghasilkan bentuk jengger pea. Perbedaan bentuk jengger ayam ini yang dinamakan atavisme.

d. Kriptomeri

Kriptomeri adalah peristiwa tersembunyinya suatu gen dominan jika tidak berpasangan dengan gen dominan dari alel lainnya. Ketika gen dominan berdiri sendiri maka sifatnya akan tersembunyi (*kriptos*). Warna bunga *Linaria maroccana* dipengaruhi oleh 4 gen, yaitu A = terbentuk pigmen antosianin, a = tidak terbentuk pigmen antosianin, B = protoplasma basa, dan b = protoplasma asam. Salah satu contoh kasus kriptomeri terdapat

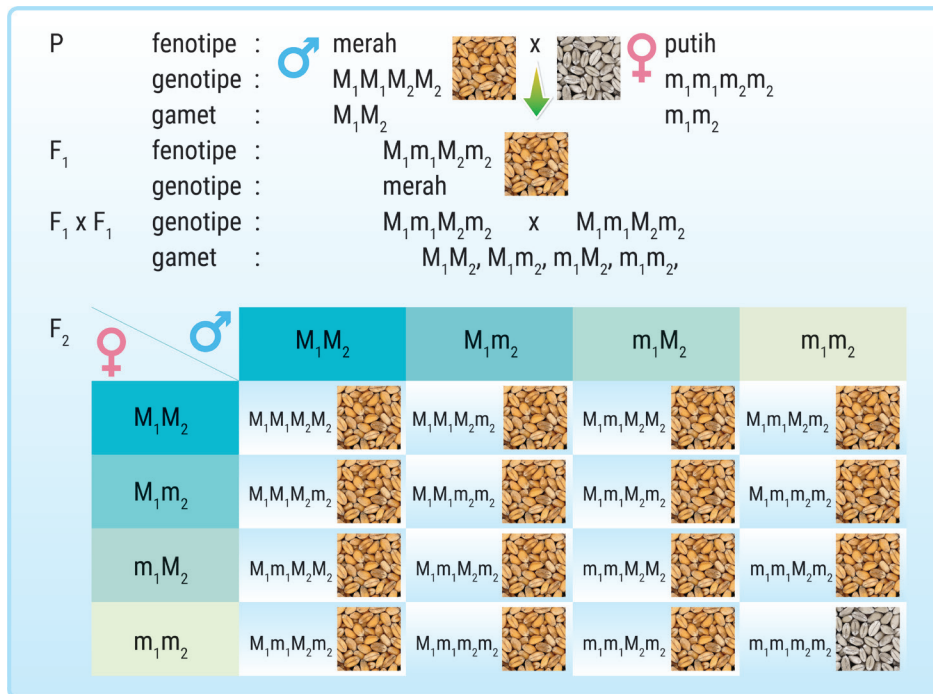
pada persilangan bunga *Linaria maroccana*. Antosianin merupakan pigmen akan memicu pembentukan warna pada bunga, warna yang timbul juga dipengaruhi oleh tingkat keasaman (pH) protoplasma sel. Jika protoplasma bersifat basa (dipengaruhi oleh gen B) maka warna yang muncul ungu, sedangkan jika protoplasma bersifat asam (dipengaruhi gen b) maka akan muncul warna merah. Dari persilangan bunga *Linaria maroccana* di bawah ini, kalian dapat melihat bahwa F₂ yang dihasilkan dari persilangan kriptomeri memiliki rasio fenotip 9 : 3 : 4.



▲ Gambar 2.34 Kriptomeri pada pewarisan sifat warna bunga *Linaria maroccana*.

e. Polimeri

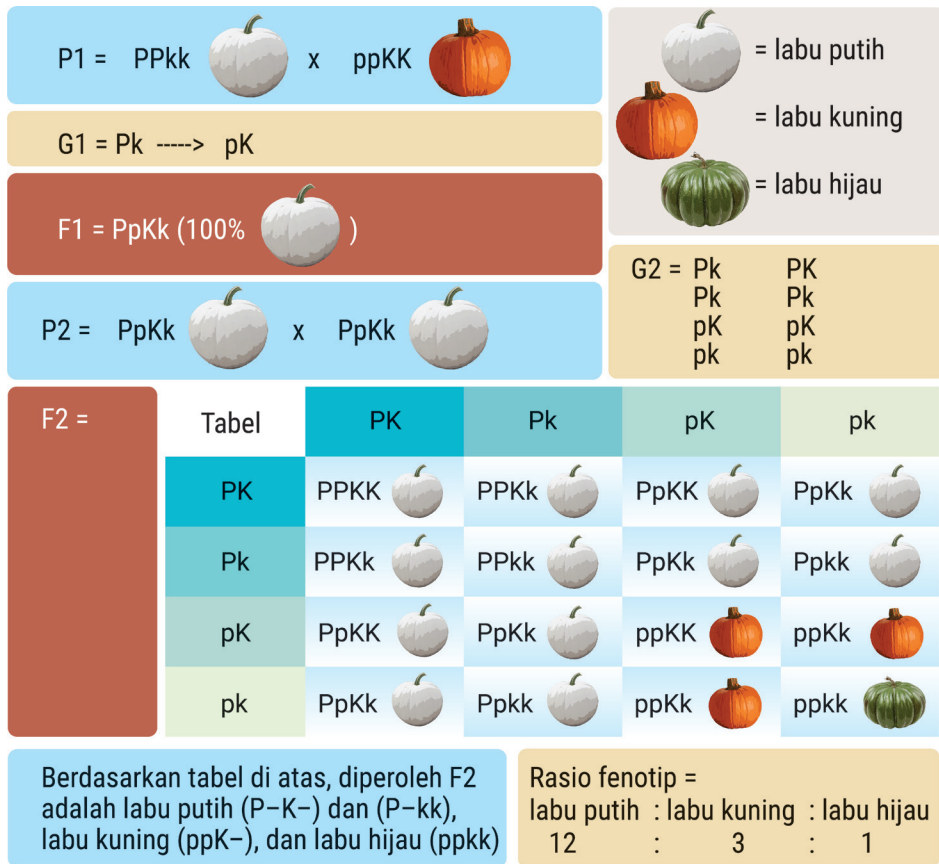
Polimeri adalah kondisi di mana terdapat banyak gen yang tidak se-alel, namun memengaruhi sifat yang sama. Ada beberapa ciri yang menandakan adanya polimeri, yaitu semakin banyak gen yang bersifat dominan maka sifatnya semakin kuat dan hasil persilangan polimeri rasio fenotip pada F₂-nya, yaitu 15 : 1. Perhatikan contoh persilangan polimeri berikut!



▲ Gambar 2.35 Contoh persilangan polimeri.

f. Epistasis - Hipostasis

Epistasis-hipostasis merupakan peristiwa ketika gen yang bersifat dominan akan menutupi pengaruh gen dominan lain yang bukan alelnya. Gen yang menutupi disebut dengan epistasis dan gen yang ditutupi disebut hipostasis. Salah satu contoh kasus epistasis-hipostasis pada persilangan labu, yaitu pembentukan warna kulit labu (*Cucurbita pepo*). Perhatikan contoh persilangan epistasis-hipostasis pada gambar berikut!



▲ Gambar 2.36 Contoh persilangan epistasis-hipostasis

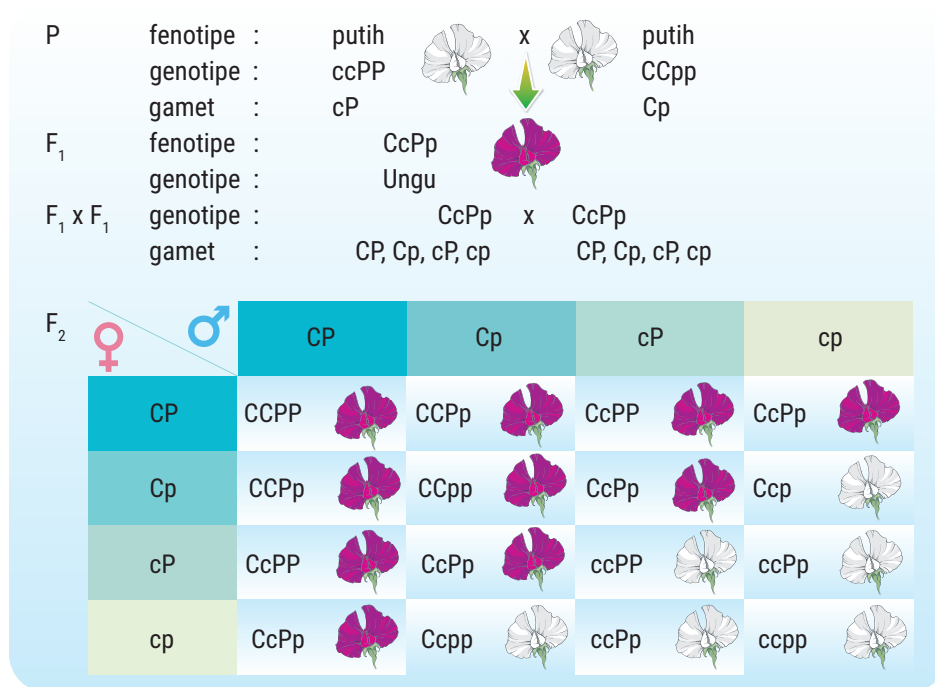
Diketahui bahwa gen P dominan terhadap gen p dan gen K dominan terhadap gen k. Gen P menyebabkan labu berwarna putih, gen K menyebabkan labu berwarna kuning, sementara gen p dan k menyebabkan labu berwarna hijau. Pada F1, gen P dan K berada bersama dan keduanya dominan, namun sifat yang muncul adalah warna putih. Hal ini menandakan bahwa gen P bersifat epistasis (menutupi) terhadap gen K, gen K bersifat hipostasis (ditutupi) oleh gen P.

g. Komplementer

Penyimpangan semu hukum Mendel komplementer adalah interaksi antara dua gen dominan berbeda alel yang saling melengkapi untuk memunculkan fenotip tertentu. Apabila salah satu gen tidak muncul maka sifat yang dimaksud tidak akan muncul. Salah satu contoh komplementer dapat ditemukan pada persilangan bunga *Lathyrus odoratus* yang memiliki

gen C = membentuk pigmen warna, c = tidak membentuk pigmen warna, P = membentuk enzim pengaktif, dan p = tidak membentuk enzim pengaktif.

Pada tumbuhan *Lathyrus odoratus*, warna bunga ungu hanya muncul jika tumbuhan memiliki gen C dan gen P, yang berarti warna bunga ungu akan muncul tumbuhan membentuk pigmen warna yang dipengaruhi oleh gen C dan membentuk enzim pengaktif yang dipengaruhi oleh gen P. Misalkan dilakukan persilangan antara bunga *Lathyrus odoratus* yang berwarna putih dengan yang berwarna putih pula. Maka akan diperoleh keturunan dan rasio seperti di bawah ini.



▲ Gambar 2.37 Contoh persilangan komplementer

Berdasarkan persilangan di atas, diperoleh F₂ dengan warna bunga berwarna ungu dengan pigmen warna dan enzim pengaktif (C-P-), bunga berwarna putih dengan pigmen warna dan tanpa enzim pengaktif (C-pp), bunga berwarna putih tanpa pigmen warna dan ada enzim pengaktif (ccP), bunga berwarna putih tanpa pigmen warna dan tanpa enzim pengaktif (ccpp), hasil F₂ dari persilangan tersebut menghasilkan fenotip 12 : 7.

AKTIVITAS 2.17

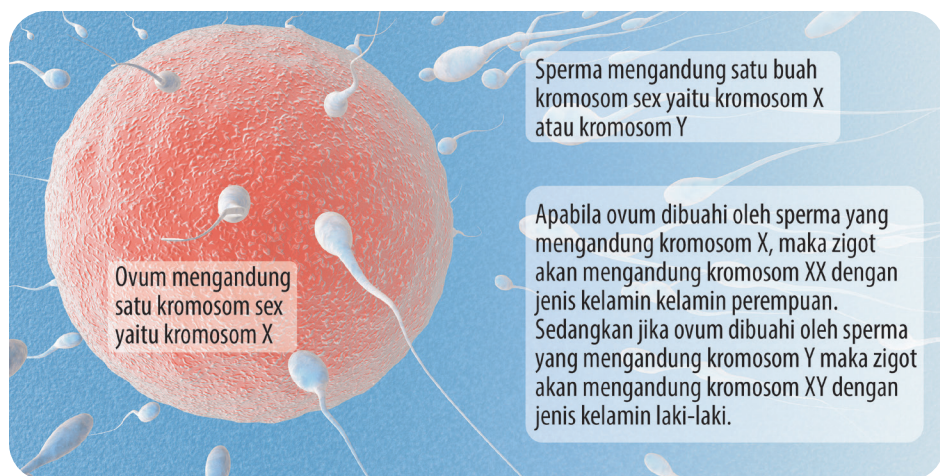
Penyimpangan Semu Hukum Mendel

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 – 4 orang.
2. Telusurilah jurnal-jurnal penelitian yang berkaitan dengan penyimpangan semu hukum Mendel.
3. Buktikan melalui jurnal-jurnal penelitian tersebut bahwa peristiwa atavisme, kriptomeri, polimeri, epistasis-hipostasis, dan komplementer merupakan penyimpangan semu hukum Mendel.
4. Buat kumpulan jurnal penelitian dan ringkasan dari keseluruhan jurnal yang kalian temukan.

5. Penentuan Jenis Kelamin

Sebagian besar makhluk hidup dibedakan menjadi dua berdasarkan jenis kelaminnya, yaitu jantan atau laki-laki dan betina atau perempuan. Apa yang menyebabkan makhluk hidup dapat berjenis kelamin tersebut? Seperti yang dijelaskan sebelumnya pada materi kromosom, hal ini karena faktor genetik yang ditentukan oleh kromosom gonosom.

Organisme dengan jenis kelamin terpisah, kromosom gonosom yang menentukan jenis kelamin organisme mungkin berbeda pada jantan dan betina. Misalnya pada manusia, laki-laki memiliki satu kromosom X dan satu kromosom Y dalam setiap sel tubuh normal. Adapun pada perempuan memiliki sepasang kromosom X dalam setiap sel tubuh normal.



▲ Gambar 2.38 Penentuan jenis kelamin manusia saat proses fertilisasi.

Sel manusia mengandung 23 pasang kromosom yang terdiri atas 22 pasang kromosom autosom dan sepasang kromosom seks. Gambar di atas menunjukkan sel telur hanya mengandung satu kromosom X, sedangkan laki-laki menghasilkan dua jenis sperma yang satu mengandung satu kromosom X dan kromosom Y. Contoh lain penentuan jenis kelamin yang sama dengan manusia terjadi pada lalat buah (*D. melanogaster*).

Ada beberapa tipe penentuan jenis kelamin. Tahukah kalian, ada yang unik dengan tipe penentuan jenis kelamin pada belalang. Belalang betina memiliki kromosom kelamin terdiri atas sepasang kromosom X dan belalang jantan memiliki kromosom kelamin terdiri atas satu kromosom X dan tidak memiliki kromosom Y. Coba, kalian temukan tipe penentuan jenis kelamin yang lain dengan melakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 2.18

Penentuan Jenis Kelamin pada Lebah Madu

1. Bentuklah kelompok yang terdiri atas 3 – 4 orang.
2. Bacalah teks berikut.

Apakah kalian tahu penentuan jenis kelamin pada lebah madu sangat unik. Setelah melakukan perkawinan, lebah jantan akan mati. Setelah kawin, seekor lebah ratu dapat menghasilkan telur sebanyak kurang lebih 2.000 butir per hari. Apabila telur terbuahi oleh sperma yang tersimpan dalam ovarium lebah ratu maka akan menghasilkan individu baru yang memiliki jenis kelamin yang sama dengan ratu, yaitu betina. Adapun jika telur tidak terbuahi oleh sperma yang tersimpan dalam ovarium lebah ratu maka akan menghasilkan individu berjenis kelamin jantan.

3. Apa tipe penentuan jenis kelamin pada lebah madu? Mengapa demikian?
Coba cari jawaban dari pertanyaan di atas melalui sumber referensi yang terpercaya di internet.
4. Buat kesimpulan dari jawaban kalian, lalu kumpulkan dan diserahkan kepada guru.

6. Mutasi dan Penyakit Keturunan

Sebelum mempelajari mutasi dan penyakit keturunan, coba kalian lakukan kegiatan berikut.

AKTIVITAS 2.19

Ayo Berpikir Kritis

Ada suatu kasus di mana seseorang berjenis kelamin laki-laki memiliki testis yang tidak berkembang (*Testicular dysgenesis*) sehingga tidak dapat menghasilkan sperma. Namun, laki-laki tersebut memiliki payudara yang tumbuh.

Coba, kalian cari tahu apakah penyebab hal tersebut? Apakah dapat diobati? Diskusikan bersama dengan teman kelompok kalian. Kemudian, presentasikan hasil kalian di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 2.19, kalian menjadi sadar bahwa mutasi tidak hanya terjadi di film-film. Namun, mutasi juga dapat terjadi di sekeliling kita. Seseorang yang memperlihatkan perubahan sifat (fenotip) akibat mutasi disebut mutan.

Pewarisan gen diturunkan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Sebelum sel membelah, kromosom direplikasi dan gen-gen yang dibawanya disalin sama persis. Oleh karena itu, pewarisan sifat bergantung kepada **replikasi** yang akurat. Kesalahan mungkin terjadi saat proses replikasi. Bila kesalahan tersebut tidak diperbaiki, gen kemungkinan akan termodifikasi atau kromosom mungkin berubah. Peristiwa inilah yang disebut mutasi. Jadi, **mutasi** adalah perubahan acak mendadak pada struktur gen atau jumlah kromosom.

Mutasi juga dapat menyebabkan keanekaragaman dalam suatu spesies. **Mutasi gen** menghasilkan variasi di antara individu, sebab mutasi gen menyebabkan timbulnya alel-alel baru. Jika mutasi terjadi saat produksi gamet, perubahan genetik yang dihasilkan dapat diwariskan ke keturunan. Mutasi yang terjadi pada sel tubuh selain pada gamet disebut **mutasi somatik**. Mutasi somatik tidak bisa diwariskan dari induk ke keturunannya.

Mutasi dapat menyebabkan penyakit keturunan. Penyakit ini tidak dapat dicegah keberadaannya karena disebabkan oleh kelainan genetik yang diwariskan dari orang tua kepada keturunannya. Berikut beberapa contoh penyakit keturunan.

a. Albinisme

Albinisme adalah penyakit keturunan yang disebabkan oleh adanya mutasi gen resesif. Individu yang memiliki alel albinisme homozigot inilah yang disebut albino. Albinisme ditandai dengan tidak adanya pigmen pada kulit, rambut, dan mata. Individu dengan kondisi albino memiliki kulit putih pucat kemerahan dan rambut putih. Individu dengan kondisi ini memiliki kulit yang sangat sensitif. Kulit mereka mudah terbakar oleh sinar matahari. Iris mata albinisme berwarna merah karena tidak mengandung pigmen sehingga yang terlihat hanya pembuluh darahnya.

b. Sindrom Down

Sindrom Down merupakan penyakit keturunan yang terjadi karena mutasi jumlah kromosom. Seperti yang kalian ketahui, jumlah normal kromosom manusia sebanyak 46. Namun, pada sebagian orang ada yang memiliki satu kromosom tambahan di dalam sel-sel tubuh mereka sehingga terdapat 47 kromosom. Kasus inilah yang dikenal sebagai sindrom Down. Sindrom Down disebabkan gagalnya pembelahan sel gamet pada proses meiosis I dan II sehingga menyebabkan kelebihan kromosom 21 sel gamet.

Sindrom Down merupakan penyebab genetik disabilitas intelektual yang jarang sekali diturunkan. Sindrom Down ini dapat

terlihat dari perawakan yang muncul, seperti hidung pesek, mata sipit, telinga kecil, lidah besar, dan perawakan tubuh yang pendek.



▲ Gambar 2.39 Anak dengan sindrom Down.

c. Buta warna

Buta warna adalah suatu kondisi di mana manusia tidak dapat melihat warna tertentu, atau tidak dapat membedakan warna tertentu. Penyakit keturunan ini disebabkan adanya mutasi pada kromosom X. Seseorang akan mengalami buta warna, jika memiliki kromosom X dengan gen buta warna (X^c).

Seorang pria hanya memiliki 1 kromosom X, sehingga pasti akan mengalami buta warna apabila memiliki gen buta warna (X^c). Berbeda dengan wanita yang memiliki 2 kromosom X. Jika seorang wanita memiliki 1 kromosom X dengan gen buta warna atau memiliki genotip X^cX^c maka wanita tersebut hanya menjadi pembawa (*carrier*). Namun, jika memiliki 2 kromosom X dengan gen buta warna atau memiliki genotip X^cX^c maka wanita menjadi penderita buta warna. Wanita *carrier* tampak normal dan dapat melihat warna seperti biasa. Namun, wanita tersebut kemungkinan akan mewariskan penyebab buta warna ke anaknya.

7. EPIGENETIK

Apakah kalian pernah melihat kembar identik? Mereka terlihat mirip sekali secara fisik namun mungkin salah satu diantara mereka ada yang menderita penyakit ginjal kronik (CKD), sedangkan yang satunya lagi tidak. Apakah yang menyebabkan hal tersebut?

Dalam beberapa kasus, kembar identik dapat mengidap penyakit genetik, sementara kembar lain tidak, meskipun genom mereka identik. Kembar identik memiliki perbedaan dalam kerentanan terhadap suatu penyakit. Variasi epigenetik dapat menjelaskan hal ini.

Jadi apakah epigenetik itu? Epigenetik adalah ilmu yang mempelajari faktor eksternal dan lingkungan yang mengaktifkan atau menonaktifkan gen sehingga gen dapat terekspresi atau tidak terekspresi, aktif atau tidaknya suatu gen dapat menentukan sifat yang muncul pada suatu individu melalui gen yang terekspresikan (ekspresi gen). Epigenetik juga dikenal sebagai perubahan dalam regulasi ekspresi gen yang dapat diturunkan

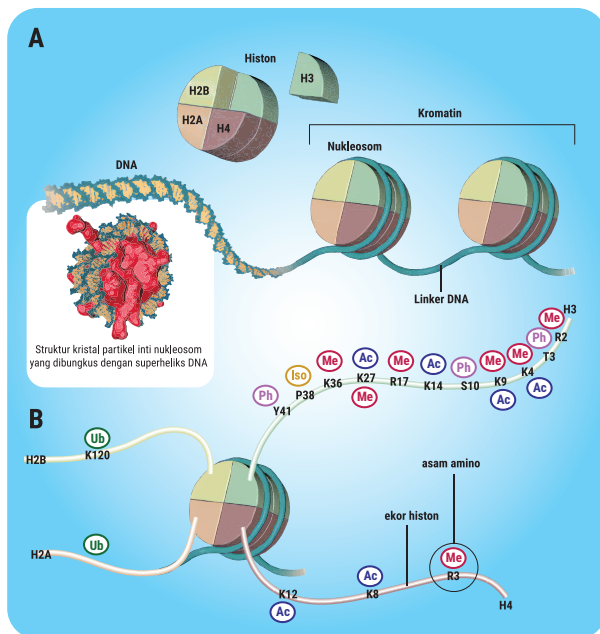


▲ Gambar 2.40 Kembar Identik

tanpa mengubah urutan DNA, hal ini pertama kali diperkenalkan oleh Conrad Waddington.

Masih ingat apa itu kromatin, eukromatin, heterokromatin dan nukleosom? Mari kita sedikit mengulas kembali. Polimer DNA yang disebut kromatin terdiri dari DNA yang mengelilingi “bantalan benang” protein yang disebut protein histon, yang berperan dalam menyokong seluruh genom materi genetik dalam sel eukariot. Nukleosom merupakan unit dasar kromatin, terdiri dari oktamer berisikan dua histon (H2A, H2B, H3, dan H4, terbungkus di dalam 147 bp DNA).

Nukleosom dipisahkan oleh DNA linker dengan panjang 20 hingga 50 bp. Oleh karena itu, posisi genom dan perubahan nukleosom dapat mempengaruhi kemampuan protein untuk berikatan dengan sekuens target DNA. Eukromatin memiliki konformasi yang lebih longgar yang memungkinkan transkripsi aktif, sedangkan heterokromatin memiliki kromatin yang terbungkus ketat, terutama mengandung gen tidak aktif. Modifikasi kromatin atau histon adalah beberapa kondisi yang dapat mempengaruhi proses epigenetik (gambar 2.41).



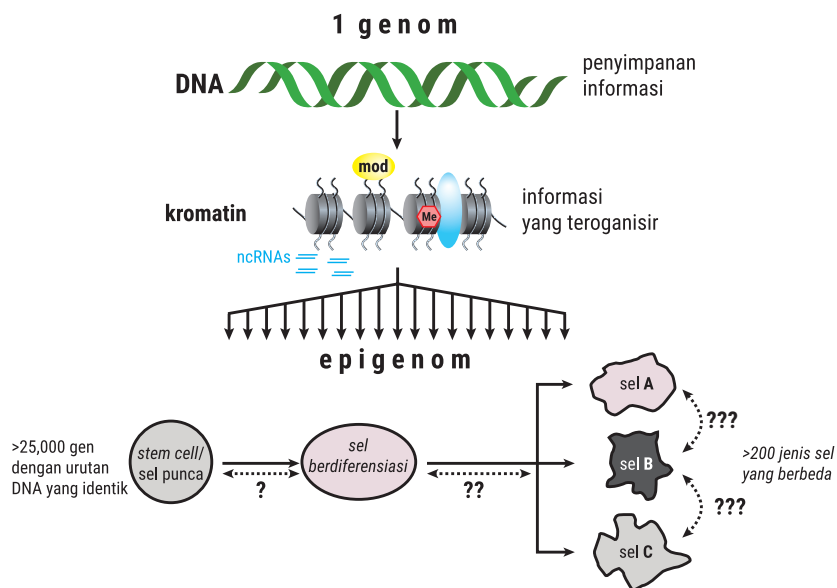
▲ Gambar 2.41 Nukleosom.

Unit dasar fungsional kromatin adalah nukleosom (Panel A), tersusun atas oktamer histon dikelilingi DNA. Oktamer dipisahkan oleh DNA linker. Oktamer histon dibentuk oleh histon tetramer H3:H4 dan dua dimer H2A: H2B. Ekor histon terdiri dari empat histon inti yang dipengaruhi oleh modifikasi post-translasi (Panel B). Hal ini meliputi metilasi (Me), asetilasi (Ac), fosforilasi (Ph), ubiquiliasi (Ub) dan isomerisasi prolin (Iso), yang terjadi pada tempat asam amino yang spesifik, seperti K4 dan K9 pada ekor histon H3. Asam amino histon yang sama juga mengalami modifikasi post translasi yang berbeda. *Dikutip dari Dawson MA, Tony Kouzarides T, Huntly BJP. Targeting epigenetic readers in cancer. N Engl J Med 2012;367:647-57.*

Meskipun semua sel di dalam tubuh mempunyai urutan DNA yang identik, namun setiap sel mempunyai fenotipe dan pola ekspresi gen yang berbeda. Misalnya, perubahan kromatin di jantung dapat mempengaruhi ekspresi gen yang berupa ‘epigenetik’ dan menetap walaupun terjadi pembelahan sel.

Epigenetik mengatur kromatin di dalam genom. Oleh karena itu, epigenetik menghasilkan pola indeks yang diturunkan pada pembelahan sel, yang menghasilkan “memori” seluler, yang merupakan ekstensi informasi yang berasal dari kode genetik (DNA). Akibatnya, epigenetik dapat didefinisikan sebagai perubahan dalam transkripsi gen melalui perubahan kromatin tanpa adanya perubahan urutan DNA. Proses epigenetik menyebabkan perubahan ekspresi gen biasanya melalui metilasi DNA, modifikasi kromatin/histon, dan non-coding RNA.

Misalnya pada proses perkembangan sel telur yang dibuahi dapat dimulai dengan satu genom tunggal, yang menghasilkan sejumlah “epigenom” yang berbeda pada lebih dari 200 jenis sel (Gambar 2.42). Variasi program ini dikenal sebagai “kode epigenetik”, yang mempengaruhi kondisi kromatin selama pembelahan dan perkembangan sel.



▲ Gambar 2.42 Mekanisme Epigenetik dalam Proses Perubahan Fenotip Pada Individu.

Komposisi kromatin pada seluruh genom bergantung pada tipe sel, dan respon terhadap signal internal dan eksternal. (Panel bawah) Divertifikasi genom pada organisme multiseluler selama perkembangan dan diferensiasi dari satu stem cell (embrio yang telah dibuahi) menjadi sel terdiferensiasi. Pengembalian diferensiasi (de-diferensiasi) atau transdiferensiasi (garis biru) memerlukan *reprogramming* epigenom sel. Dikutip dari Allis CD, Jenuwen T, Reinberg D. *Overview and concepts*. In: Allis CD eds., *Epigenetics* Cold Spring Harbour Laboratory Press 2007, p. 23-61.

Waddington menggambarkan perubahan fenotipe dari sel ke sel selama perkembangan organisme multiseluler sebagai “*epigenetic landscape*”. Namun, spektrum sel dari stem cell ke sel yang mengalami diferensiasi memiliki urutan DNA yang sama, tetapi profil gen yang diekspresikan sangat berbeda. Regulasi epigenetik terhadap stem cell meliputi modifikasi DNA, modifikasi ekor histon setelah translasi, *remodelling nukleosom*, dan *long noncoding RNA*. Pemahaman terbaru tentang modifikasi histon pada *remodeling* kromatin, juga dikenal sebagai kode histon, telah menunjukkan banyak hubungan epigenetik yang kompleks. Modifikasi DNA atau histon terdiri dari enzim yang mengkatalisis modifikasi. Proses epigenetik yang menyebabkan perubahan ekspresi gen biasanya melibatkan proses metilasi DNA, modifikasi kromatin/histon, dan non-coding RNA.

a. Metilasi DNA

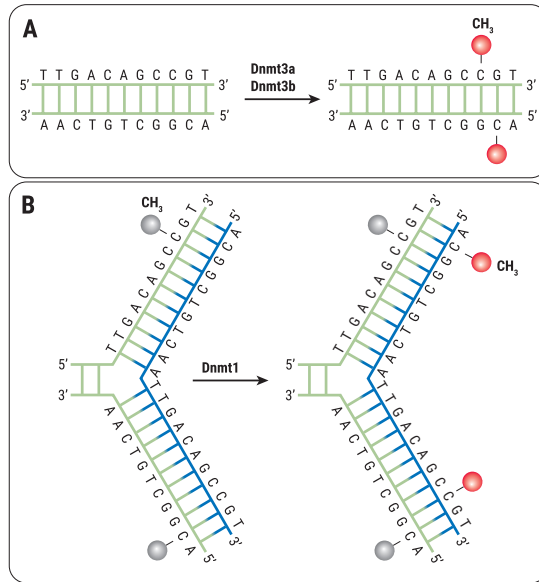
Meskipun hampir semua sel dalam suatu organisme mengandung informasi genetik yang sama, tidak semua gen diekspresikan secara bersamaan oleh semua jenis sel. Dalam pengertian yang lebih luas, mekanisme epigenetik memediasi profil ekspresi gen yang beragam di berbagai sel dan jaringan pada organisme multiseluler.

Sekarang ini, kita akan membahas mekanisme epigenetik utama yang melibatkan modifikasi kimia langsung pada DNA, yang dikenal sebagai metilasi DNA. Metilasi DNA telah ditemukan pada mamalia sejak DNA pertama kali diidentifikasi sebagai materi genetik. Avery dan rekannya, (1944; McCarty dan Avery, 1946). Meskipun banyak peneliti mengusulkan bahwa metilasi DNA mungkin mengatur ekspresi gen, baru pada tahun 1980-an beberapa studi menunjukkan bahwa metilasi DNA terlibat dalam regulasi gen dan diferensiasi sel. (Holliday and Pugh, 1975; Compere and Palmiter, 1981). Sekarang ini sudah diakui dengan baik bahwa metilasi DNA bersama dengan pengatur lainnya, adalah faktor epigenetik utama yang mempengaruhi aktivitas gen.

Jadi, apakah yang dimaksud dengan metilasi DNA? Metilasi DNA adalah modifikasi epigenetik yang berkarakteristik baik yang memainkan peran kunci dalam regulasi gen. Ini melibatkan penambahan kovalen dari gugus metil pada karbon posisi ke-5 dari cincin sitosin dari suatu gen, misalnya pada mamalia. Metilasi dalam daerah promotor gen penekan tumor menyebabkan gen tersebut tidak aktif, dan metilasi dalam gen itu sendiri dapat memicu peristiwa mutasi.

Metilasi sering terjadi pada histon H3 (13) dan H4 pada residu lisin (K) dan arginin (A) tertentu, merupakan salah satu metode penting untuk modifikasi protein histon. Metilasi lisin histon dapat menyebabkan aktivasi dan juga dapat menyebabkan penghambatan, biasanya tergantung pada situasi di mana ia berada. Misalnya, H3K9, H3K27, dan H4K20 dikenal sebagai penanda ‘inaktivasi’ yang penting, yaitu tanda repressor, karena hubungan antara metilasi ini dan pembentukan heterokromatin. Namun, metilasi H3K4 dan H3K36 dianggap sebagai tanda ‘aktivasi’. Asetilasi, yang dalam banyak kasus terjadi pada residu lisin konservatif di terminal N, juga merupakan cara penting untuk memodifikasi protein histon, misalnya, asetilasi residu lisin 9 dan 14 dari histon H3 serta lisin 5, 8, 12, dan 16 dari histon H4. Kedua asetilasi tersebut terkait dengan aktivasi atau pembukaan kromatin. Sebaliknya, deasetilasi residu lisin menyebabkan kompresi kromatin dan inaktivasi transkripsi gen. Modifikasi histon yang berbeda dapat saling mempengaruhi dan dapat berinteraksi dengan metilasi DNA.

Sekelompok metiltransferase DNA (Dnmts) mengkatalisis metilasi DNA, mentransfer kelompok metil dari S-adenosil metionin (SAM) ke karbon kelima residu sitosin pada 5mC (Gambar 1). Dnmt1 berfungsi selama replikasi DNA untuk menyalin pola metilasi DNA dari untai DNA induk ke untai DNA anak yang baru disintesis. Sebaliknya, Dnmt3a dan Dnmt3b memiliki kemampuan untuk membentuk pola metilasi baru pada DNA yang tidak dimodifikasi, yang disebut Dnmt de novo (Gambar 2.43). Ketiga Dnmts berkontribusi pada pengembangan embrio. Ekspresi Dnmt sangat berkurang saat sel mencapai diferensiasi terminal. Ini tampaknya menunjukkan pola metilasi DNA yang stabil pada sel postmitotik.



▲ Gambar 2.43 Jalur metilasi DNA.

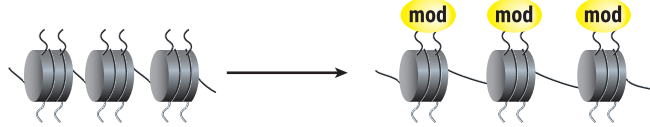
Sebuah kelompok dari DNA metiltransferase (Dnmts) mengkatalisis transfer kelompok metil dari S-adenil metionin (SAM) ke karbon kelima dari residu sitosin untuk membentuk 5-metil sitosin. (5mC). (a) Dnmt3a dan Dnmt3b adalah Dnmts “de novo” yang mentransfer kelompok metil (merah) ke DNA telanjang. (b) Dnmt1 adalah Dnmt pemeliharaan yang menjaga pola metilasi DNA selama replikasi. Ketika DNA mengalami replikasi semikonservatif, untai DNA induk mempertahankan pola metilasi DNA yang asli. (abu). Dnmt1 berasosiasi ketika replikasi dan dengan tepat mereplikasi pola metilasi DNA yang asli dengan menambahkan grup metil (merah) pada untai anak yang baru terbentuk. (biru)”

b. Modifikasi Kromatin

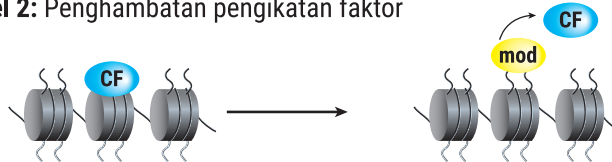
Histon adalah unsur pembentuk nukleosom, dengan struktur berbentuk oktamer yang membungkus DNA pada sel eukariot. Struktur yang terbentuk dikenal sebagai kromatin. Histon mudah mengalami modifikasi melalui proses dikenal sebagai *posttranslational modification* (PTM). Dua kelompok mengubah struktur kromatin yaitu molekul kimia kecil (asetilasi, fosforilasi, dan metilasi) dan peptida yang lebih besar (ubikuitilasi dan sumoilasi).

Mekanisme perubahan *histone posttranslational* (HPTM) yang memengaruhi kromatin dapat berupa represi atau transkripsi gen. Terdapat tiga model seperti di bawah ini (Gambar 2.44). Model pertama menunjukkan histon yang mengalami perubahan yang mempengaruhi struktur kromatin, dan model kedua dapat menghambat ikatan faktor terhadap kromatin, dan model ketiga menciptakan tempat ikatan untuk protein tertentu.

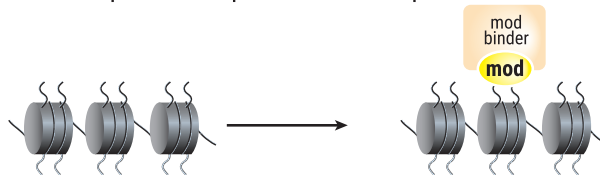
Model 1: Perubahan struktur kromatin



Model 2: Penghambatan pengikatan faktor



Model 3: Menciptakan tempat ikatan untuk protein tertentu



▲ Gambar 2.44

Model menunjukkan bagaimana *histone posttranslational modification* berpengaruh terhadap kromatin. Dikutip dari Kouzarides T, Berger SL. *Chromatin modifications and their mechanism of action*. In : Allis CD eds., *Epigenetics*. Cold Spring Harbour Laboratory Press 2007, p. 191-209.

c. Non-Coding RNA

Kumpulan DNA (genome) seseorang dapat memiliki daerah RNA coding dan non-coding. RNA coding berfungsi untuk menghasilkan protein sedangkan RNA non-coding adalah RNA yang tidak dapat diterjemahkan menjadi protein. RNA non-coding berfungsi untuk mengontrol ekspresi genetik dengan cara menempel pada daerah RNA coding.

RNA non-coding, RNA yang tidak dapat diterjemahkan menjadi protein, dapat dibagi menjadi dua kategori. Kategori pertama terdiri dari RNA non-coding rantai pendek seperti short interfering RNA (siRNA), microRNA (miRNA), dan piwi-interacting RNA (piRNA) dan RNA non-coding panjang (seperti lncRNA). Keempat non coding RNA ini dapat berperan dalam menghambat proses translasi dengan cara mendegradasi mRNA atau memodifikasi protein histon untuk mengaktifkan atau menonaktifkan gen. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian telah menunjukkan bahwa RNA non-coding berperan penting dalam modifikasi epigenetik dan dapat mengontrol ekspresi pada tingkat gen dan kromosom untuk mengendalikan diferensiasi sel.

Setelah mempelajari mengenai epigenetik, coba kalian lakukan kegiatan berikut.

AKTIVITAS 2.20

Ayo berpikir kritis

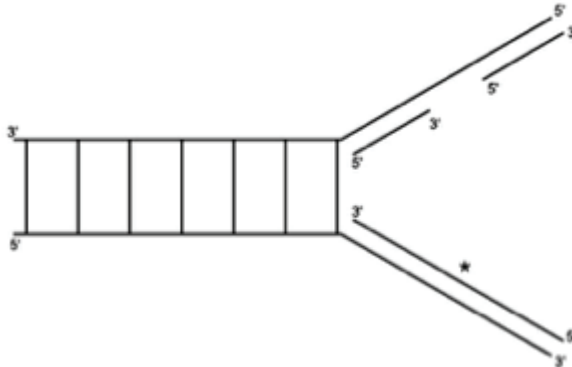
Akibat perubahan metilasi, efek epigenetik serupa juga terjadi pada manusia. Selama musim dingin 1944–1945 menjelang akhir Perang Dunia II, pekerja kereta api di Belanda melakukan pemogokan untuk mencoba mencegah Nazi mengirimkan lebih banyak tentara. Sebaliknya, Nazi menghentikan semua pasokan makanan. Selama “Musim Dingin Belanda Dilanda Kelaparan”, lebih dari 20.000 orang meninggal. Para dokter kemudian menemukan bahwa keturunan pada wanita hamil muda saat itu banyak yang mengalami masalah kesehatan saat dewasa, seperti obesitas, kadar trigliserida dan kolesterol yang tinggi, diabetes tipe 2, dan skizofrenia. Jika dibandingkan dengan saudara mereka yang berada dalam kandungan dengan kondisi makanan tersedia dengan mudah, memiliki tingkat kematian 10% lebih tinggi setelah usia 68 tahun. Sebuah kolaborasi antara laboratorium di Belanda dan Amerika Serikat pada tahun 2018 membandingkan orang dewasa tersebut. Para peneliti menyimpulkan bahwa perbedaan antara saudara kandung dalam metilasi DNA dari gen-gen tertentu menyebabkan kondisi medis jangka panjang yang merugikan.

Coba, kalian cari tahu apakah penyebab hal tersebut? Diskusikan bersama dengan teman kelompok kalian. Kemudian, presentasikan hasil diskusi kalian di depan kelas.

UJI KOMPETENSI

Pilihlah salah satu jawaban dengan cara memberi tanda silang pada huruf a, b, c, d, dan e

- Promoter adalah segmen DNA yang berfungsi sebagai ...
 - tempat protein represor berikatan sehingga transkripsi tidak terjadi
 - tempat protein represor berikatan sehingga transkripsi dapat terjadi
 - tempat awal terbentuknya proses replikasi DNA
 - tempat awal RNA polimerase berikatan untuk proses translasi
 - tempat awal RNA polimerase berikatan untuk proses transkripsi
- Genom adalah ...
 - kumpulan molekul DNA yang tersimpan secara sistematis di dalam sel
 - kumpulan molekul RNA yang tersimpan secara sistematis di dalam sel
 - materi genetika di dalam suatu individu atau spesies, bersifat berubah-ubah sesuai umur individu tersebut
 - materi genetika di dalam suatu individu atau spesies, bersifat tetap tidak dipengaruhi waktu
 - total informasi genetika yang dimiliki oleh suatu individu dan tersimpan di dalam kromosom
- Kodon 5' ACA 3' ; 5' ACU 3' dan 5' ACC 3' dapat dikenali oleh antikodon...
 - 5' IGU 3'
 - 5' GGU 3'
 - 5' UGU 3'
 - 5' UGI 3'
 - 5' IGC 3'
- Perhatikan gambar berikut ini.

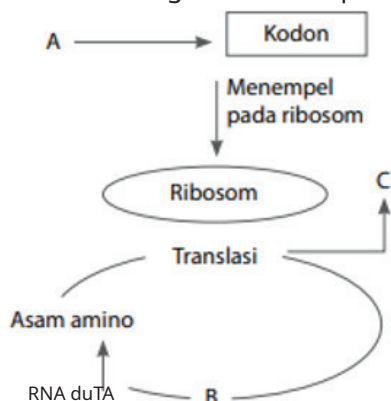


Pada gambar di atas, rantai bertanda (*) adalah

- Promoter
- Fragmen Okazaki
- Lagging strand
- Template
- Leading strand

5. Salah satu perbedaan antara DNA dan RNA adalah
 - a. DNA: Menterjemahkan kode genetik; RNA: Menyusun kode genetik
 - b. DNA: Membentuk kodon; RNA: Membentuk kodogen
 - c. DNA: Mengandung basa urasil; RNA: Tidak mengandung basa urasil
 - d. DNA: Arsitek sintesa protein; RNA: Pelaksana sintesa protein
 - e. DNA: Berupa rantai tunggal; RNA: Berupa rantai ganda
6. RNA ada 3 macam, yaitu r-RNA, m-RNA, dan t-RNA. Ketiganya mempunyai komponen penyusun yang sama, tetapi fungsinya berbeda. Fungsi m-RNA adalah
 - a. melakukan translasi dengan membawa pesan dari DNA
 - b. membantu DNA membentuk DNA baru di dalam inti sel
 - c. membawa pesan dari DNA dan disampaikan ke ribosom
 - d. menterjemahkan maksud r-RNA untuk dibuat rangkaian polinukleotida
 - e. menggabung-gabungkan asam amino dari t-RNA untuk dirangkai menjadi protein
7. Selama berlangsungnya tahap translasi pada sintesis protein terjadi peristiwa...

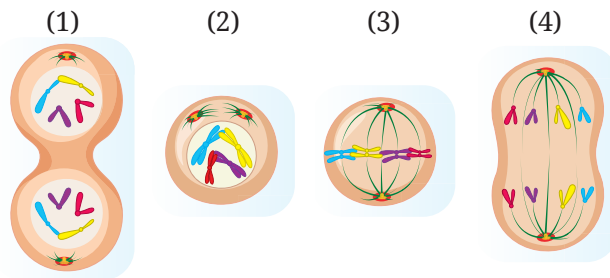
a. Duplikasi rantai DNA	d. Pengenalan daerah gen DNA
b. Membukanya rantai DNA	e. Penerjemahan mRNA oleh tRNA
c. Pencetakan mRNA oleh DNA	
8. Berikut ini bukan merupakan proses yang terjadi pada sintesis protein adalah
 - a. RNAd keluar dari inti sel menuju ribosom
 - b. RNAd dibentuk oleh DNA di dalam sitoplasma
 - c. RNAt membawa asam amino menuju ribosom
 - d. DNA merancang sintesis protein
 - e. Di dalam ribosom terdapat RNAr
9. Perhatikan diagram sintesis protein berikut!



Pada diagram tersebut A, B, dan C berturut-turut adalah

- RNA duTA, RNA transfer, dan protein
- DNA, RNA transfer, dan polipeptida
- RNA transfer, RNA duta, dan RNA ribosom
- Kodogen, kodon, dan anticodon
- Kodogen, RNA ribosom, dan asam amino

10. Perhatikan gambar tahapan-tahapan mitosis berikut.



Urutan tahapan-tahapan pembelahan mitosis yang tepat adalah

- 1-2-3-4
 - 3-4-2-1
 - 3-2-4-1
 - 2-3-4-1
 - 4-2-1-3
11. Fase metaphase mempunyai ciri-ciri sebagai berikut
- Kromosom bergerak ke arah kutub melalui benang gelendong
 - Plasma sel mengalami penyempitan di bagian equator
 - Plasma sel membentuk sekat di bagian equator
 - Kromosom mulai tampak jelas, selaput inti menghilang
 - Terbentuk benang gelendong dan kromosom tersusun pada bidang pembelahan
12. Membran nukleus dan nukleolus menghilang pada fase
- anafase
 - metafase
 - profase
 - interfase
 - telophase
13. Perhatikan hal berikut ini.
- tujuan pembelahan
 - tempat pembelahan
 - susunan kromosom
 - tahapan pembelahan
 - besarnya ukuran sel yang membelah
- Mitosis dan meiosis dapat dibedakan dalam hal
- 1, 2, 3 dan 4
 - 1, 2, 3 dan 5
 - 1, 2 dan 5
 - 1, 3, dan 5
 - nomor 5 saja

14. Gen-gen di bawah ini menyatakan bulu yang diwarisi oleh beberapa hewan.
Gen A bulu keriting (dominan) dan gen a bulu lurus (resesif)
Gen B bulu hitam (dominan) dan gen b bulu putih (resesif)
Hewan yang mewarisi gen AaBb akan memiliki fenotip
- lurus hitam
 - keriting hitam
 - lurus putih
 - keriting putih
 - keriting abu-abu
15. Tanaman mawar berbunga merah (dominan) disilangkan dengan tanaman mawar berbunga putih (resesif), ternyata dihasilkan (F1) tanaman yang semuanya berbunga....
- 100% berbunga merah
 - 100% berbunga putih
 - 75% berbunga merah : 25% berbunga putih
 - 50% berbunga merah : 50% berbunga putih
 - 25% merah : 50% merah muda : :25% putih
16. Pada percobaan Mendel, tanaman kapri dengan fenotip tinggi dan bunga di ketiak batang (TTBB) disilangkan dengan tanaman kapri dengan fenotip pendek dan bunga di ujung batang (ttbb). Jika F1 mengalami penyerbukan sendiri, peluang munculnya genotip Ttbb sebesar
- 6,25%
 - 12,5%
 - 25%
 - 50%
 - 75%
17. Tanaman labu bulat (B) dominan terhadap kisut, tinggi dominan (T) terhadap rendah (t). Tanaman labu dengan genotip BbTt disilangkan Bbtt dan menghasilkan keturunan sebanyak 240 tanaman. Labu berfenotip bulat tinggi akan dihasilkan sebanyak
- 30
 - 60
 - 90
 - 120
 - 180

18. Diketahui seorang ayah dengan gen Aa (normal *carrier*) dan seorang ibu juga dengan gen Aa (normal *carrier*). Dari perkawinan keduanya diperoleh empat orang anak. Perbandingan anak-anaknya menjadi
- 3 albino, 1 normal
 - 3 normal, 1 albino
 - tidak ada yang normal
 - tidak ada yang albino
 - semua albino
19. Duplikasi kromosom X pada laki-laki menghasilkan XXY yang muncul sekali dalam 200 kelahiran. Orang dengan kelainan ini menderita sindrom
- Patau
 - Turner
 - Down
 - Edwards
 - Klinefelter
20. Di bawah ini yang termasuk penyebab mutasi yang termasuk faktor fisika adalah
- kolkisin dan formalin
 - bakteri dan virus
 - sinar UV dan sinar radioaktif
 - disinfektan dan sinar radioaktif
 - virus dan formalin

REFLEKSI

Untuk meninjau ulang keseluruhan proses pembelajaran, lakukan refleksi dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut!

1. Apa sajakah yang sudah kalian pahami pada pembelajaran ini?
2. Apa sajakah yang belum kalian pahami pada pembelajaran ini?
3. Apakah yang menyebabkan kalian belum menguasai bagian tertentu pada pembelajaran ini?
4. Upaya yang akan kalian dilakukan untuk mengatasi bagian yang belum dikuasai pada pembelajaran ini?
5. Apa saja manfaat yang kalian peroleh pada pembelajaran ini?

PENGAYAAN

Gen Buat Orang Korea Tidak Bau Badan

Bau badan atau bau ketiak memang terkadang menjengkelkan. Ada beberapa orang yang punya masalah ini sehingga membuat mereka tidak percaya diri. Pada suhu udara yang panas, keringat biasanya tidak terhindarkan. Berbagai hal pun dilakukan demi tidak bau badan. Namun tahukah Anda kalau ternyata orang Korea tak punya masalah dengan bau badan? Di musim panas, orang Korea tidak perlu khawatir tentang bau badan dan ketiak ketika mereka berkeringat. Menurut penelitian di Universitas Bristol, orang Korea bermutasi secara genetik dalam soal bau badan. Penelitian menyebut bahwa mereka memiliki masalah keringat yang lebih sedikit dibanding orang pada umumnya.

Mengutip *The Korea Times*, hal ini disebabkan oleh gen bau badan, ABCC11. Studi menyebut hanya 0,006 persen orang Korea yang memiliki gen ABCC11, yang menjadi penyebab utama di balik masalah bau. Penelitian ini didasarkan pada *Allele Frequency Database (ALFRED)*, database gen yang dirancang oleh Universitas Yale. Para peneliti mengatakan rasio Korea adalah yang terendah di dunia.

“Gen ABCC11 pada dasarnya adalah satu-satunya penentu apakah Anda menghasilkan bau ketiak atau tidak,” kata Ian Day, seorang ahli epidemiologi genetika di *University of Bristol* yang menerbitkan sebuah makalah tentang gen ABCC11 pada *Live science*. “Penelitian menunjukkan bahwa saat ini hanya


2 persen orang Eropa tidak memiliki gen bau badan, sebagian besar orang Asia Timur dan hampir semua orang Korea hanya sedikit yang punya gen ini.” Hal serupa ternyata juga dibenarkan oleh Dr. Joshua Zeichner, direktur penelitian kosmetik dan klinis di Departemen Dermatologi, Rumah Sakit Mount Sinai. “Sebagian besar pasien Korea mengalami mutasi yang disebut ABCC11 yang mengubah komposisi keringat sehingga mereka tidak menghasilkan bau badan.”

Bau badan dihasilkan ketika keringat dipecah oleh bakteri yang hidup secara alami di kulit. Tergantung pada komposisi keringat, bau mungkin berbeda atau tidak berbau sama sekali ketika dipecah oleh bakteri. Mutasi sama sekali tidak mengubah produksi keringat, untuk jadi basah itu sendiri tidak terpengaruh.

Sumber: CNN Indonesia (2020)

Setelah membaca uraian di atas, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apa yang menyebabkan orang korea tidak memiliki bau badan? Jelaskan!
2. Bagaimana dengan orang Indonesia (Asia Tenggara), apakah memiliki gen bau badan? Cobalah lakukan studi literatur lanjutan!



Ini bukan yang terkuat dari spesies yang bertahan, juga bukan yang paling cerdas, tetapi yang paling responsif terhadap perubahan.

--Charles Darwin

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2022

Biologi
untuk SMA Kelas XII

Penulis Shilviani Dewi, dkk.

ISBN 978-602-427-958-5 (jil.2)

BAB 3



Evolusi

Bagaimanakah asal-usul kehidupan dan mekanisme terjadinya evolusi?

Tujuan Pembelajaran

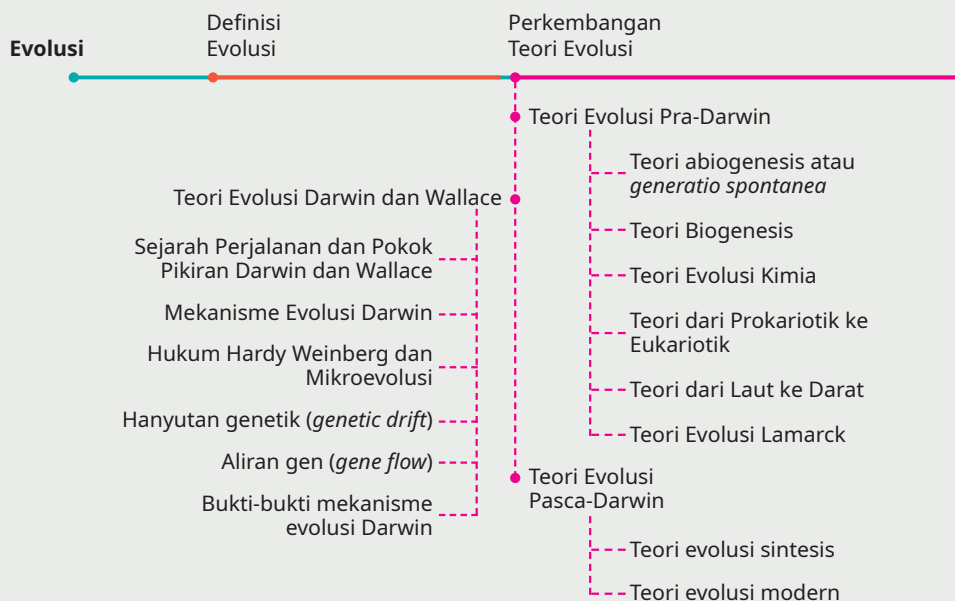
Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian dapat:

1. menjelaskan berbagai teori terkait asal-usul makhluk hidup.
2. menjelaskan mekanisme terjadinya evolusi disertai dengan bukti-bukti adanya evolusi.
3. menghubungkan prinsip adaptasi dan seleksi alam dengan mekanisme evolusi.
4. menganalisis prinsip *genetic drift* dan *gene flow* dengan mekanisme evolusi.
5. membuktikan perubahan frekuensi gen melalui hukum Hardy Weinberg.

Kata Kunci

evolusi, adaptasi, seleksi alam, *genetic drift*, *gene flow*, hukum Hardy Weinberg, mekanisme evolusi.

Peta Materi





◀ Gambar 3.1 Burung maleo endemik Sulawesi, Indonesia.

Tahukah Kalian

Coba, kalian amati keberadaan makhluk hidup di sekitar kalian. Dari manakah asal mula keberadaan makhluk hidup tersebut? Saat melihat seekor burung, pikirkan dari mana asal burung tersebut? Mungkin kalian akan berpikir bahwa burung berasal dari telur. Lalu, dari manakah asal telur tersebut?

Pernahkah kalian mendengar kisah tentang burung maleo? Burung Maleo merupakan jenis burung endemik yang hidup di Sulawesi. Burung ini dianggap lebih menyerupai ayam dibandingkan anggota burung lainnya. Hal ini disebabkan burung tersebut lebih sering menggunakan kakinya untuk berjalan daripada sayap untuk terbang. Mengapa hal tersebut dapat terjadi? Apakah ada sejarah kekerabatan antara ayam dan burung maleo? Pada bab ini, kalian akan mempelajari tentang asal-usul makhluk hidup, perkembangan kehidupan serta kekerabatan antarmakhluk hidup.

Dalam bukunya yang berjudul *The Origin Of Species*, Charles Darwin menyampaikan teori evolusi. Profesor Richard Dawkins mencoba menjelaskan teori evolusi Darwin tersebut dengan menggunakan analogi sebuah arloji yang tanpa sengaja ditemukan dalam sebuah perjalanan. Ketika dibongkar, ternyata arloji tersebut tersusun oleh berbagai material, seperti mesin penghubung baterai, per, dan berbagai materi lainnya yang saling terhubung sehingga dapat menjalankan fungsi sebagai penunjuk waktu. Berdasarkan hal tersebut

dapat disimpulkan bahwa keberadaan arloji bukanlah kebetulan, melainkan memiliki perancang khusus untuk mendesain fungsinya.

Analogi arloji di atas dapat digunakan untuk memahami asal-usul kompleksitas tubuh makhluk hidup. Seperti halnya struktur tubuh burung maleo yang diperlihatkan pada gambar di atas memiliki berbagai organ tubuh antara lain kaki, bulu, sayap, dan lain sebagainya sehingga keberadaan organ tersebut saling bersinergi untuk membangun suatu sistem regulasi di dalam tubuh.

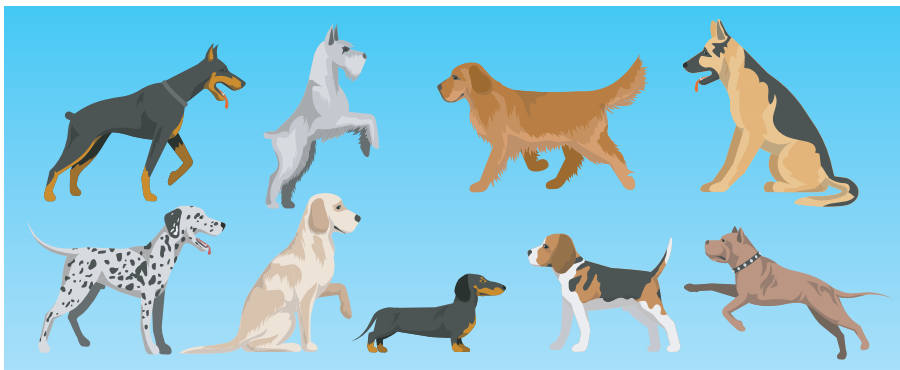
Ayo Mengingat Kembali

Masih ingatkah kalian pembahasan mengenai Materi Genetik dan Pewarisan Sifat yang sudah kalian pelajari di bab sebelumnya? Coba, kalian ingat kembali dengan melakukan kegiatan berikut.

AKTIVITAS 3.1

Mengamati Variasi Anjing

1. Amati gambar variasi anjing berikut.



▲ Gambar 3.2 Variasi anjing.

2. Berdasarkan pengamatan gambar, tuliskan minimal 5 persamaan dan perbedaan secara morfologi yang kalian temukan dari gambar tersebut.

Karakter	Persamaan	Perbedaan
Telinga	Memiliki dua telinga	Bentuk telinga panjang Bentuk telinga pendek

Rambut		
Pola warna		
dst		

3. Diskusikan bersama teman dan guru kalian tentang hal-hal terkait dengan penyebab munculnya berbagai variasi dalam satu spesies yang sama.

Berdasarkan aktivitas di atas, kalian tahu bahwa ada begitu banyak perbedaan yang ditemukan, namun perbedaan tersebut tidak menunjukkan perbedaan spesies. Variasi yang terjadi pada Gambar 3.2 memperlihatkan satu spesies yang sama.

Variasi anjing pada Gambar 3.2 disebabkan adanya perbedaan pada level gen. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa terdapat hubungan yang sangat erat antara genotip dan fenotip pada makhluk hidup.

A. Definisi Evolusi

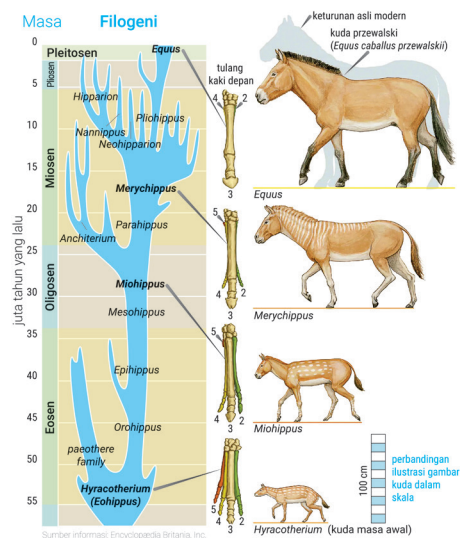
Sebelum kalian mempelajari lebih jauh mengenai perkembangan teori evolusi, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 3.2

Mengamati Proses Evolusi Kuda

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 3 – 4 orang.
2. Amati dengan cermat gambar evolusi kuda di samping!

Gambar 3.3
Evolusi kuda.



3. Jawablah pertanyaan berikut dengan berdiskusi!
 - a. Berdasarkan gambar di atas, apa yang dapat kalian amati?
 - b. Bandingkan struktur tubuh kuda *Eohippus* yang hidup kisaran 56 juta tahun lalu dengan fosil *Equus* kuda yang hidup sekitar dua juta tahun lalu dan dikenal sebagai kuda modern.
 - c. Apa perbedaan dari kedua kuda tersebut?
 - d. Bisakah kalian melihat perkembangan perubahan ukuran tubuh kuda *Eohiphus* hingga kuda modern? Kira-kira, apa penyebab dari perubahan ukuran tersebut?
4. Dari hasil pengamatan kalian, susunlah sebuah definisi dari evolusi.
5. Presentasikan hasil pengamatan kalian di depan kelas.

Evolusi berasal dari bahasa Inggris, *evolution* yang berarti perkembangan. Dalam ilmu biologi, evolusi adalah perubahan pada makhluk hidup yang terjadi secara perlahan dalam waktu yang sangat panjang. Salah satu contoh peristiwa evolusi, yaitu evolusi pada kuda. Perkembangan ukuran tubuh kuda yang semula seukuran kucing butuh waktu puluhan juta tahun untuk mencapai ukuran kuda modern saat ini.

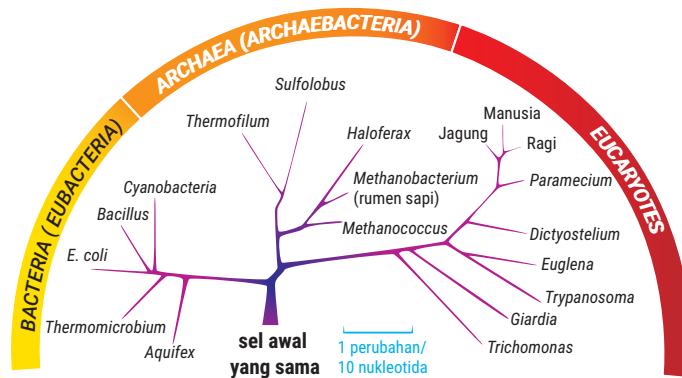
Perkembangan ukuran kuda seperti diuraikan di atas merupakan contoh dari evolusi progresif. Selain progresif, evolusi juga dapat terjadi secara regresif. Evolusi regresif terjadi karena adanya perubahan pada makhluk hidup dari yang kompleks menjadi sederhana, bahkan menuju punah. Contohnya, burung kasuari diturunkan dari burung bersayap dan bisa terbang menjadi tidak bersayap dan tidak bisa terbang. Contoh lainnya, yaitu perkembangan dinosaurus yang berakhir dengan kepunahan karena ketidakmampuan dalam adaptasi.

Pada Aktivitas 3.1, kalian telah mengingat kembali hubungan antara genotip dan fenotip. Kalian telah memahami bahwa sifat yang muncul di permukaan dipengaruhi oleh gen yang terdapat dalam makhluk hidup tersebut. Lalu, bagaimana hubungan antara makhluk hidup berkaitan dengan peristiwa evolusi? Coba, kalian lakukan aktivitas 3.3 berikut.

AKTIVITAS 3.3

Mengamati Gambar Hubungan Dasar Evolusi Makhluk Hidup

- Lakukanlah pengamatan pada gambar 3.4 berikut ini.



▲ Gambar 3.4 Pohon filogeni yang menunjukkan hubungan evolusi berbagai makhluk hidup.

Sumber: Albert B, dkk (2008)

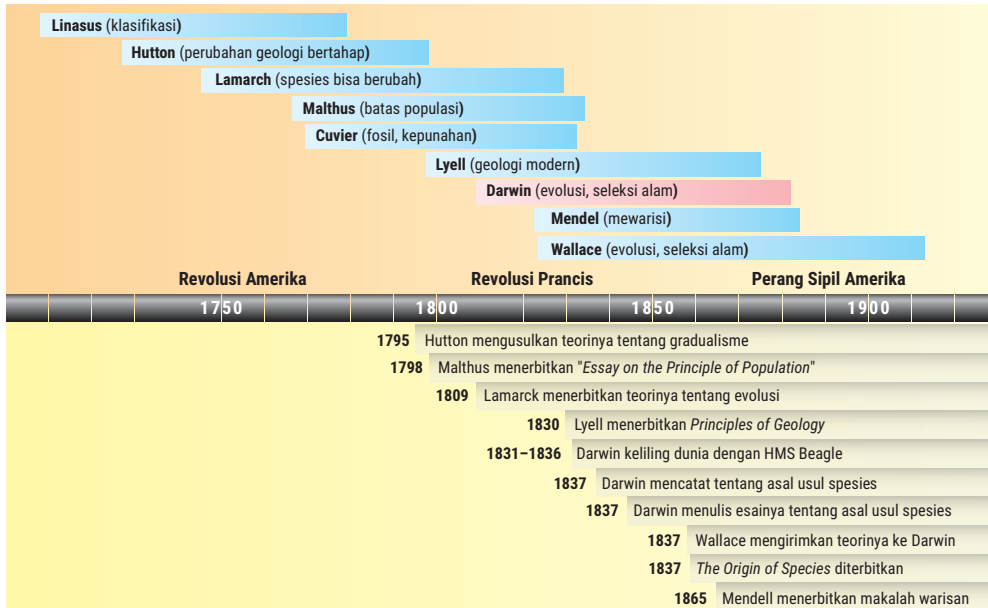
- Berdasarkan pengamatan gambar, isilah tabel di bawah ini dengan memberikan tanda (v) untuk hal-hal yang berhasil kalian amati.

Pernyataan	Saya berhasil memahami	
	Ya	Tidak
Saya memahami bahwa makhluk hidup mula-mula berasal dari satu sel tunggal sebagai <i>common ancestor</i> yang selalu dilestarikan.		
Saya memahami bahwa makhluk hidup berkembang dari spesies sederhana menjadi semakin kompleks seiring berjalannya waktu.		
Saya memahami bahwa makhluk hidup dikelompokkan dalam tiga domain yang berkembang dari <i>common ancestor</i> .		
Saya memahami bahwa setiap spesies yang memiliki kesamaan ciri dalam pohon filogeni disusun saling berdekatan.		

- Jika dari sel *origin of life* diperlukan waktu jutaan tahun untuk membentuk organisme yang kompleks, apakah garis waktu evolusi masih bekerja saat ini? Prediksilah kemungkinan jutaan tahun yang akan datang apakah masih terjadi evolusi pada manusia? Diskusikan hal tersebut bersama teman sebangku kalian.
- Presentasikan hasil diskusi kalian didepan kelas!
- Dengarkanlah penjelasan dan umpan balik yang diberikan oleh guru.

B. Perkembangan Teori Evolusi

Bagaimana asal-usul kehidupan makhluk hidup di muka bumi? Pertanyaan tersebut masih menjadi perdebatan hingga saat ini dikarenakan keterbatasan bukti yang tersedia untuk memperlihatkan asal-usul kehidupan. Perkembangan teori terkait mekanisme evolusi dapat kalian lihat pada Gambar 3.5 berikut.



▲ Gambar 3.5 Perkembangan teori mekanisme evolusi.

Sumber: Campbell (2003)

Berdasarkan Gambar 3.5, terdapat tiga kelompok besar perkembangan teori evolusi, yaitu teori pra-Darwin, teori Darwin, dan teori pasca-Darwin.

1. Teori Evolusi Pra-Darwin

a. Teori abiogenesis atau *generatio spontanea*

Pernahkah kalian membiarkan sepotong roti tawar tergeletak di atas meja dalam hitungan hari atau bahkan minggu? Fenomena apa kira-kira yang mungkin terjadi? Mungkin saja dalam peristiwa tersebut, kalian akan menemukan belatung di permukaan roti. Kira-kira, dari manakah asal belatung tersebut? Apakah belatung berasal dari roti?

Pada kasus ini, penganut teori abiogenesis memberikan argumen sebagai jawaban pertanyaan asal-usul munculnya belatung. Sesuai dengan nama teorinya, “*a*” yang artinya tidak, “*bio*” artinya hidup, dan

“*genesis*” artinya kejadian maka teori abiogenesis menyatakan bahwa makhluk hidup berasal dari makhluk tidak hidup atau kejadian makhluk hidup terjadi secara spontan (*generatio spontanae*). Teori ini dikemukakan oleh Aristoteles (tahun 384 SM) dan didukung oleh beberapa filsuf lainnya, di antaranya berikut ini.

● **Antonie Van Leeuwenhoek**

Bayangkan, jika kalian mengamati setetes air di bawah mikroskop dan menemukan makhluk kecil yang mampu bergerak. Kira-kira, dari mana asal makhluk tersebut? Apakah mungkin air menghasilkan mikroorganisme tersebut? Coba, kalian pikirkan!

Pendapat Antonie Van Leeuwenhoek mengenai teori abiogenesis didasarkan pada pengamatan di bawah mikroskop sekitar abad ke-17. Ia melihat adanya mikroorganisme (makhluk hidup kecil) di dalam tetesan air hujan dan air jerami sehingga ia menyimpulkan bahwa makhluk hidup (mikroorganisme) berasal dari benda mati, yaitu air hujan atau air rendaman Jerami.

● **John Turberville Needham**

Coba, kalian pikirkan apa yang akan terjadi jika ayam direbus dalam sebuah wadah, lalu air bekas rebusannya dibiarkan hingga beberapa hari. Mungkin kalian akan menemukan bahwa air kaldu tersebut berubah warna menjadi lebih keruh, berbau busuk, dan tidak segar.

Pendapat Needham mengenai teori abiogenesis didasarkan pada pengamatannya di bawah mikroskop pada setetes air kaldu yang telah tersimpan beberapa hari ternyata banyak dijumpai mikroorganisme. Dengan demikian, Needham menyimpulkan bahwa makhluk hidup berasal dari benda mati.

b. Teori Biogenesis

Teori biogenesis dikemukakan oleh tiga orang ahli, yaitu Francesco Redi, Lazzaro Spallanzani, dan Louis Pasteur. Teori yang mereka ajukan muncul sebagai bentuk perlawanan terhadap teori abiogenesis. Secara harfiah “*bio*” dapat diartikan hidup dan “*genesis*” berarti kejadian. Teori ini menyatakan bahwa makhluk hidup berasal dari makhluk hidup sebelumnya.

● Percobaan Francesco Redi

Untuk lebih memahami mengenai teori abiogenesis yang dikemukakan oleh Francesco Redi, coba lakukan aktivitas 3.4 berikut!

AKTIVITAS 3.4

Memahami Percobaan Francesco Redi

Alat:

1. 3 buah toples dengan ukuran dan jenis yang sama
2. 1 lembar kain kasa seukuran penutup toples
3. alat tulis
4. kertas label

Bahan:

3 potong daging segar

Langkah percobaan:

1. Masukkan potongan daging pada setiap toples.
2. Beri label I, II, dan III pada masing-masing toples tersebut.
3. Berikan perlakuan pada ketiga toples, yaitu:
 - a. toples I dibiarkan terbuka.
 - b. toples II ditutup dengan kain kasa.
 - c. toples III ditutup dengan rapat sehingga tidak memungkinkan ada celah.
4. Letakkan ketiga toples tersebut di tempat yang aman.
5. Lakukan pengamatan terhadap ketiga toples tersebut.
6. Catat hasil pengamatan yang telah dilakukan pada tabel berikut.

Toples yang Diamati	Hasil Pengamatan Perubahan Daging pada Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Toples I (dibiarkan terbuka)							
Toples II (ditutup dengan kain kasa)							
Toples III (ditutup dengan rapat)							

7. Berdasarkan tabel hasil pengamatan, jawablah pertanyaan berikut.
 - a. Tuliskan hal yang terjadi pada kaldu yang ada pada masing-masing toples setelah tujuh hari pengamatan.

- b. Jika pada toples I dan II ditemukan belatung, dari mana kira-kira asal dari belatung tersebut?
- c. Mengapa tidak ditemukan belatung pada toples III?
- d. Buatlah kesimpulan dari percobaan yang telah kalian lakukan.

Francesco Redi melakukan percobaan seperti percobaan yang telah kalian lakukan. Ia memberikan tiga perlakuan pada daging yang diletakkan di dalam toples. Perhatikan Gambar 3.6 berikut!



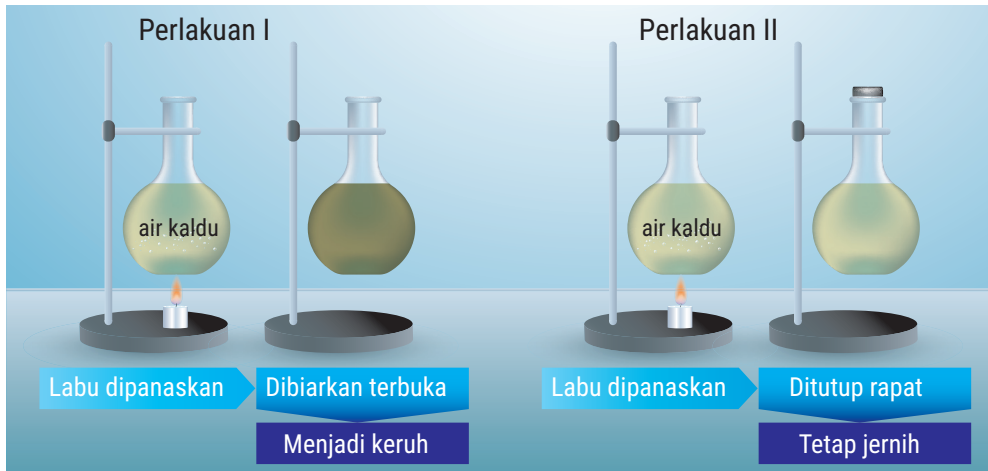
▲ Gambar 3.6 Hasil percobaan Francesco Redi.

Berdasarkan hasil percobaan, Francesco Redi menyimpulkan bahwa belatung-belatung yang muncul di atas permukaan kasa dan permukaan daging dalam toples terbuka berasal dari telur-telur lalat yang tertinggal ketika lalat-lalat tersebut menghinggapi daging. Dengan demikian, Francesco Redi menyimpulkan bahwa makhluk hidup muncul dari makhluk hidup sebelumnya dan bukan dari benda mati.

● Percobaan Lazzaro Spallanzani

Pada tahun 1765, Spallanzani melakukan percobaan yang berlawanan dengan Needham. Hal ini dilakukan untuk mendukung teori Redi. Spallanzani mengatakan bahwa Needham tidak merebus tabung cukup

lama sampai semua organisme terbunuh (proses sterilisasi) dan Nedham juga tidak menutup leher tabung dengan rapat sehingga masih ada organisme yang masuk dan tumbuh. Spallanzani melakukan percobaan dengan dua bentuk perlakuan. Perhatikan Gambar 3.7 berikut.



▲ Gambar 3.7 Percobaan Lazzaro Spalanzani.

Berikut penjabaran dari percobaan yang dilakukan Lazzaro Spalanzani.

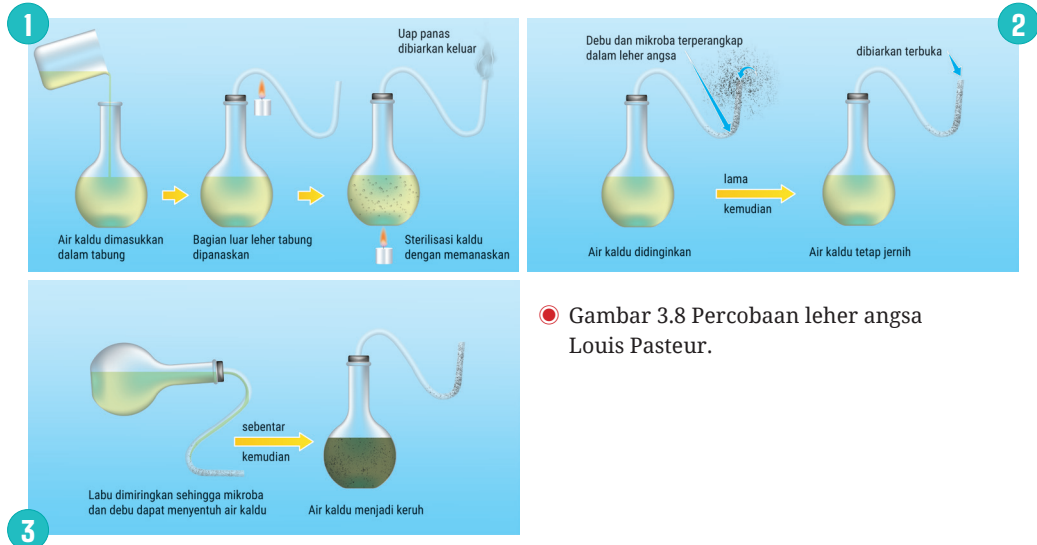
Perlakuan ① Labu diisi air kaldu dan dididihkan sampai semua mikroorganisme di dalam labu tersebut mati. Kemudian, labu dibiarkan dalam kondisi terbuka. Setelah beberapa hari, air kaldu di dalam labu berubah warna menjadi keruh dan terdapat mikroorganisme.

Perlakuan ② Labu diisi air kaldu dan dididihkan sampai semua mikroorganisme di dalam labu tersebut mati. Kemudian, labu dibiarkan dalam kondisi tertutup rapat. Setelah beberapa hari, air kaldu di dalam labu masih tetap jernih dan tidak ditemukan mikroorganisme di dalamnya.

Berdasarkan percobaannya, Spalanzani menyimpulkan bahwa mikroorganisme yang terdapat di dalam labu terbuka berasal dari mikroorganisme yang tersebar di udara. Hal ini mendukung teori biogenesis bahwa makhluk hidup berasal dari makhluk hidup sebelumnya.

● Percobaan Louis Pasteur

Louis Pasteur adalah seorang ahli biologi. Pada tahun 1864, ia melakukan percobaan menggunakan tabung leher angsa untuk menyempurnakan percobaan Spallanzani. Perhatikan Gambar 3.8 berikut untuk mengamati percobaan yang dilakukan oleh Pasteur.



● Gambar 3.8 Percobaan leher angsa Louis Pasteur.

Berikut adalah langkah-langkah percobaan Pasteur:

1. Labu diisi 70 cc air kaldu dan ditutup rapat dengan gabus. Lalu, celah antara gabus dan mulut labu diolesi parafin cair sehingga meminimalisir celah. Selanjutnya, pada gabus tersebut dipasang pipa kaca berbentuk leher angsa dan dipanaskan untuk sterilisasi.
2. Labu didinginkan dan diletakkan pada tempat yang aman. Setelah beberapa hari, air kaldu diamati dan keadaan air kaldu tersebut tetap jernih serta tidak mengandung mikroorganisme.
3. Lalu, labu tersebut dimiringkan sampai air kaldu di dalamnya mengalir ke permukaan pipa hingga bersentuhan dengan udara. Selanjutnya, labu diletakkan kembali pada kondisi yang aman. Setelah beberapa hari, air kaldu diamati dan keadaan air kaldu menjadi keruh serta mengandung mikroorganisme.

Dari hasil percobaan Louis Pasteur dapat disimpulkan bahwa mikroorganisme yang tumbuh tidak berasal dari benda mati (cairan kaldu), tetapi dari mikroorganisme yang terdapat di udara. Mikroorganisme yang merupakan makhluk hidup terdapat di udara bersama dengan debu.

Setelah percobaan yang dilakukan oleh Louis Pasteur, tumbanglah pemahaman evolusi yang didasarkan pada teori abiogenesis dan muncul paham baru tentang asal-usul makhluk hidup yang dikenal dengan teori biogenesis. Teori tersebut menyatakan:

1. *omne vivum ex ovo* = semua makhluk hidup berasal dari telur.
2. *omne ovum ex vivo* = semua telur berasal dari makhluk hidup.
3. *omne vivum ex vivo* = semua makhluk hidup berasal dari makhluk hidup sebelumnya.

AKTIVITAS 3.5

Membandingkan Beberapa Percobaan yang Mendukung Perkembangan Teori Evolusi

1. Bandingkan percobaan yang mendukung teori perkembangan mekanisme evolusi beberapa ilmuwan berikut. Tulis dalam tabel di bawah ini.

Uraian	Van Leuwenhook	Needham	Francesco Redi	Lazzaro Spalanzani	Louis Pasteur
Bahan					
Percobaan yang dilakukan					
Hasil					
Kelemahan					

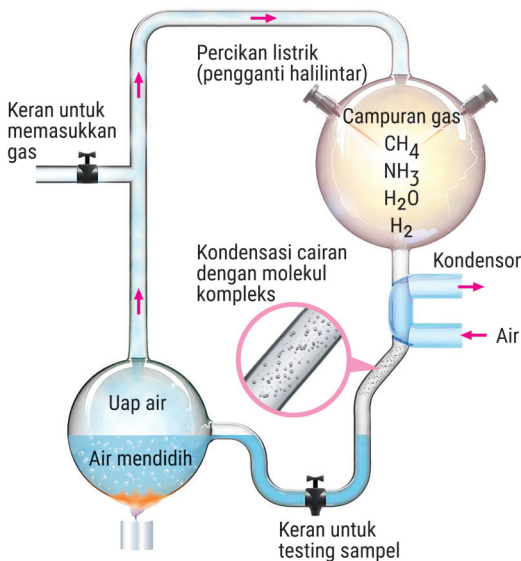
2. Tulis pendapat kalian (pro atau kontra) secara pribadi terkait beberapa teori yang telah dipelajari. Lengkapi juga pendapat kalian dengan alasan yang ilmiah dan dapat diterima.
3. Bagikan dan diskusikan hasil penugasan kalian di depan kelas.

c. Teori Evolusi Kimia

Percobaan Pasteur telah berhasil menumbangkan paham abiogenesis sekaligus membangkitkan paham biogenesis, akan tetapi belum mampu memberi jawaban atas pertanyaan asal-usul makhluk hidup pertama kali. Bisakah kalian membayangkan munculnya suatu makhluk hidup dari ketiadaan? Oleh karena itu, paham biogenesis tetap mempertanyakan dari mana asal makhluk hidup pertama tersebut.

Menurut teori evolusi kimia, makhluk hidup berasal dari reaksi senyawa CH_4 , NH_3 , H_2 , dan H_2O dengan bantuan energi sinar kosmik dan halilintar sehingga terakumulasi menjadi senyawa organik serupa asam amino. Teori tersebut dikemukakan oleh Harold Urey.

Kemudian, teori tersebut dibuktikan oleh Stanley Miller dalam percobaannya di laboratorium menggunakan alat yang diberi nama pesawat uratmosphare. Perhatikan Gambar 3.9 untuk memahami rangkaian percobaan yang dilakukan Miller.



Gambar 3.9 Alat percobaan Miller.

Percobaan ini didasarkan pada pemahaman bahwa bahan organik merupakan bahan dasar organisme. Percobaan tersebut dapat dijelaskan dalam beberapa fase, di antaranya:

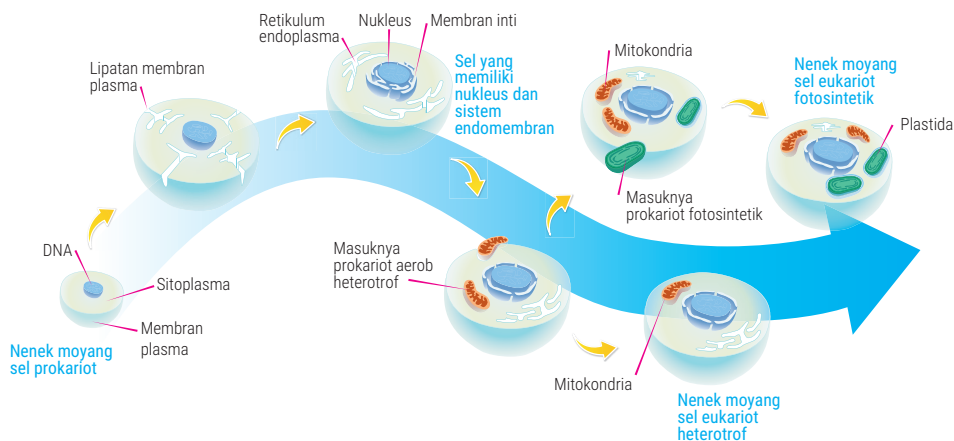
- Fase 1** tersedianya molekul metana (CH_4), amonia (NH_3), hidrogen, dan uap air yang sangat banyak di dalam atmosfer.
- Fase 2** keberadaan halilintar dan radiasi sinar-sinar kosmik sebagai sumber energi dapat menyebabkan terjadinya reaksi molekul-molekul di atas untuk membentuk suatu zat.
- Fase 3** hasil reaksi yang terjadi menghasilkan suatu zat hidup yang lebih kompleks dari unsur sebelumnya.
- Fase 4** zat hidup yang terbentuk diperkirakan berupa asam amino yang kemudian berkembang selama berjuta-juta tahun menjadi sejenis organisme yang lebih kompleks.

Dari percobaan yang dilakukannya, Miller berhasil membuktikan teori Urey. Alat percobaan Miller disimpan dalam sebuah kondisi yang diperkirakan sama dengan kondisi pada waktu sebelum ada kehidupan yang terdiri atas kumpulan zat anorganik dan energi kosmik yang bersumber dari sinar kosmik dan halilintar seperti dugaan Urey. Ke dalam alat tersebut dimasukkan bermacam-macam gas, seperti uap air yang dihasilkan dari air yang dipanaskan, hidrogen, metan, dan amonia. Kemudian, alat tersebut dialiri listrik 75.000 volt (sebagai pengganti kilatan halilintar). Setelah seminggu, Miller mendapatkan zat organik berupa asam amino yang berperan sebagai komponen kehidupan. Selain R - CH(NH₂) - COOH (asam amino), diperoleh juga HCN (asam sianida) dan CH₄N₂O (urea).

Penemuan yang dilakukan Miller masih memunculkan pertanyaan terkait mekanisme perkembangan makhluk hidup dari yang sederhana menjadi kompleks. Misalnya, perubahan organisme prokariot menjadi eukariot dan teori yang menjelaskan asal-usul kehidupan terjadi di darat. Oleh karena itu, muncullah teori yang menjelaskan asal-usul terkait sel.

d. Teori dari Prokariotik ke Eukariotik

Sel prokariotik dianggap sebagai *ancestor of life*. Lalu, dari manakah sel eukariotik terbentuk? Atau bagaimanakah mekanisme perubahan sel prokariotik menjadi sel eukariotik? Sebelum melanjutkan uraiannya lebih lanjut, perhatikan Gambar 3.10 di bawah ini.



▲ Gambar 3.10 Mekanisme endosimbiosis.

Sel eukariotik terbentuk karena adanya interaksi yang sangat erat antara dua sel. Gambar 3.10 di atas menjelaskan suatu interaksi perubahan sel prokariotik menjadi sel eukariotik yang disebut endosimbiosis. Interaksi sampai terjadinya endosimbiosis setidaknya melibatkan dua sel. Salah satu sel akan berperan sebagai inang (*ancestral host cell*) dan sel lainnya masuk ke dalam sel inang untuk menjadi organel.

Teori ini menjelaskan bahwa asal usul sel eukariotik dimulai ketika sel prokariotik purba “dimakan” oleh sel eukariotik sederhana yang berukuran lebih besar dan berperan sebagai sel inang. Sementara, sel prokariotik purba yang masuk akan menjadi cikal bakal organel sel berupa mitokondria dan kloroplas. Jadi, pembentukan organel sel pada sel eukariot dengan endosimbiosis.

e. Teori dari Laut ke Darat

Jika teori interaksi endosimbiosis dapat diterima, dapatkah kalian menafsirkan bahwa kehidupan pertama kali berada di dasar laut? Lalu, bagaimana kehidupan dari laut dapat berpindah ke darat sehingga terbentuk kehidupan seperti yang saat ini dapat kita amati?

Teori ini menjelaskan bahwa pertama kali sel-sel berada di laut dan berkembang menjadi organisme yang hidup di laut. Adanya faktor kompetisi untuk bertahan hidup, seperti adanya predator antarorganisme laut menyebabkan beberapa organisme mencoba beralih hidup dari laut ke darat. Fakta yang mendukung teori ini, yaitu siklus hidup amfibi yang sebagian masa hidupnya dilalui di air. Dari fertilisasi sampai berudu, amfibi hidup di air. Kemudian, mengalami metamorfosis untuk hidup di darat.

f. Teori Evolusi Lamarck

Sebelum mempelajari mekanisme teori evolusi yang dikemukakan oleh Lamarck, coba kalian lakukan aktivitas 3.6 berikut!

AKTIVITAS 3.6

Menarik Kesimpulan Sementara terkait Teori Evolusi Lamarck

Pengamatan Lingkungan

1. Coba, kalian amati lingkungan sekitar.
2. Lalu, jawablah pertanyaan berikut berdasarkan pengamatan kalian.

- a. Apakah kalian pernah melihat jerapah berleher pendek? Ya/Tidak
- b. Apakah kalian setuju dengan pernyataan bahwa semua jerapah berleher panjang? Ya/Tidak

Pengamatan Gambar

1. Coba, kalian amati gambar berikut



▲ Gambar 3.11 Asal-usul jerapah berleher panjang.

2. Lalu, jawablah pertanyaan berikut sebagai hasil pengamatan kalian.
 - a. Tuliskan fakta-fakta tentang perubahan ukuran tubuh jerapah yang kalian temukan berdasarkan pengamatan gambar.
 - b. Tuliskan alasan terjadinya perubahan ukuran tubuh jerapah berdasarkan fakta-fakta yang kalian temukan pada nomor a.

Pada Aktivitas 3.6, kalian menemukan bahwa jerapah berleher pendek pernah menjadi salah satu variasi dari jerapah. Tetapi, saat ini kita tidak dapat menemukan lagi jenis tersebut dan hanya tersisa jerapah berleher panjang. Jean Lamarck memberikan penjelasan terkait perkembangan dan perubahan organisme yang dimulai dari organisme sederhana menjadi organisme kompleks. Berikut beberapa hal yang menjadi pokok dasar teori Lamarck.

- 1) Makhluk hidup sederhana merupakan nenek moyang makhluk hidup yang kompleks atau sempurna.
- 2) Makhluk hidup akan terus beradaptasi dan menyesuaikan diri dengan lingkungannya sebagai upaya untuk bertahan hidup.
- 3) Organ yang mengalami perubahan karena dipakai secara terus-menerus akan berkembang secara sempurna, sedangkan organ yang tidak diperlukan lagi akan mengalami penurunan atau tidak berkembang lagi. Prinsip ini dinyatakan sebagai teori *use and disuse*.
- 4) Evolusi organik terjadi karena perubahan yang disebabkan pengaruh lingkungan dan perubahan ini dapat diwariskan ke generasi berikutnya.

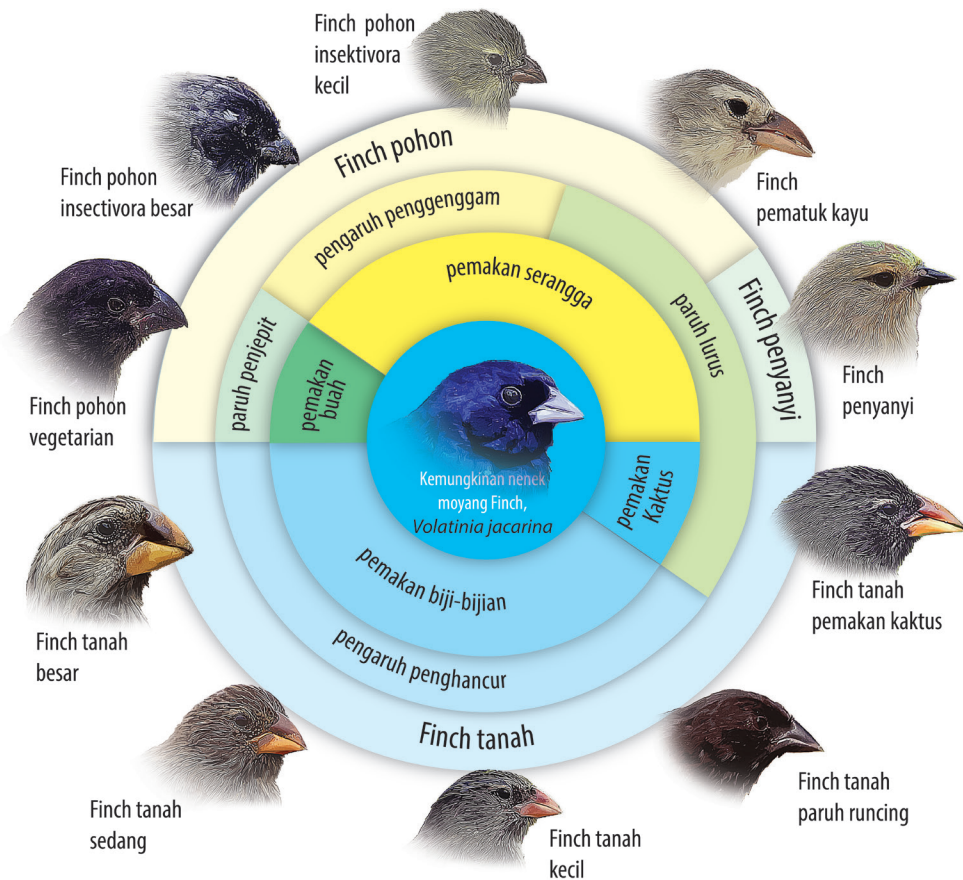
Teori Lamarck menjelaskan bahwa pada awalnya seluruh jerapah berleher pendek. Namun, jerapah akan beradaptasi seiring berjalannya waktu dan semakin sering menggunakan lehernya untuk menjangkau makanan demi bertahan hidup, sehingga terbentuklah jerapah berleher panjang. Sifat tersebut akan diwariskan kepada generasi berikutnya.

2. Teori Evolusi Darwin dan Wallace

a. Sejarah Perjalanan dan Pokok Pikiran Darwin

Teori evolusi yang dicetuskan Charles Darwin memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap perkembangan ilmu biologi dimulai dari sebuah perjalanan yang dilakukan menggunakan kapal H.M.S Beagle saat berusia 22 tahun pada Desember 1831. Pada saat pelayaran tersebut, Charles Darwin terkesan dengan persebaran flora dan fauna di Amerika Serikat. Menurut Darwin, fakta tersebut merupakan sebuah petunjuk menjawab pertanyaan tentang asal-usul spesies. Charles Darwin merupakan seorang naturalis yang memiliki ketertarikan dengan organisme di kawasan Benua Amerika. Darwin mengamati berbagai adaptasi tumbuhan dan hewan yang menempati hutan Brazil, bentangan padang rumput di Argentina, daratan terpencil Tierra del Fuego dekat Argentina, dan pegunungan Andes. Setelah mencatat dan mengamati berbagai flora dan fauna di Amerika. Ia menyimpulkan bahwa terdapat perbedaan karakteristik flora dan fauna yang ia temui di Amerika dan Eropa.

Fauna yang paling membuat Charles Darwin terkesan, yaitu keberadaan burung finch di Galapagos, suatu kepulauan yang berada di sebelah Barat pesisir Amerika Selatan. Darwin menemukan berbagai jenis burung finch yang berbeda bentuk paruhnya. Perhatikan Gambar 3.12 untuk mengamati variasi paruh burung finch yang ditemukan Charles Darwin.



▲ Gambar 3.12 Variasi paruh burung finch yang ditemukan Charles Darwin.

AKTIVITAS 3.7

Jawablah pertanyaan berikut ini, untuk melengkapi hasil pengamatan kalian terkait Gambar 3.12.

1. Bisakah kalian menemukan perbedaan paruh masing-masing variasi burung? Pikirkan, hal yang menjadi faktor utama penyebab perbedaan bentuk paruh.
2. Bagaimana mekanisme perubahan bentuk paruh karena faktor yang kalian sebutkan? Jelaskan!

Berdasarkan Aktivitas 3.7, kalian sudah sama-sama mengamati bahwa struktur morfologi burung disesuaikan dengan jenis makanan. Coba, kalian bayangkan jika burung pemakan daging memiliki bentuk paruh yang serupa dengan burung pemakan biji-bijian maka fungsi organ paruh tersebut tidak berjalan dengan baik. Perbedaan bentuk dan ukuran paruh merupakan adaptasi terhadap makanan tertentu.

Ada tiga kelompok burung finch yang ditemui Darwin, yaitu sebagai berikut.

1. Burung finch yang hidup di tanah (*Geospiza magnirostris*) mempunyai paruh besar yang teradaptasi untuk memecahkan biji.
2. Burung finch (*Camarhynchus pallidus*) yang menggunakan duri kaktus atau ranting kecil sebagai alat untuk mengorek semut atau serangga lainnya.
3. Burung finch (*Camarhynchus parvulus*) yang menggunakan paruhnya untuk menangkap serangga.

Untuk memperkuat pemahaman terkait teori Darwin, coba kalian membuat kesimpulan sementara berdasarkan pengamatan lingkungan dan gambar dengan melakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 3.8

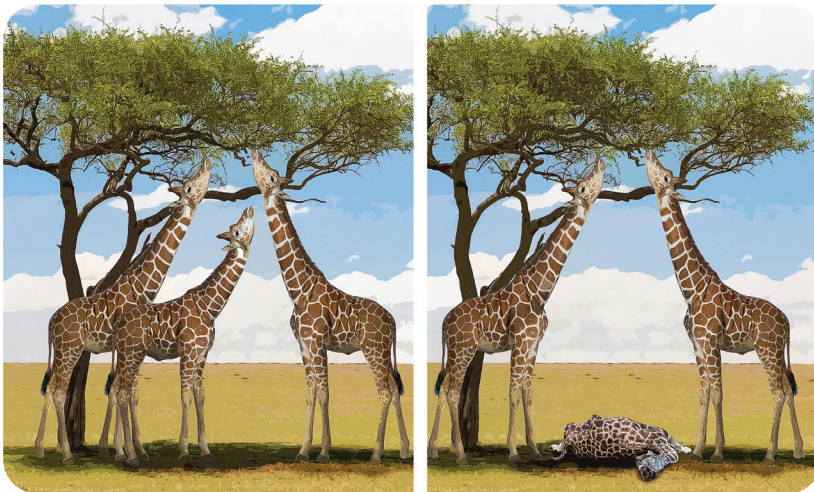
Menarik Kesimpulan Sementara terkait Teori Evolusi Darwin

Pengamatan Lingkungan

1. Coba, amati lingkungan sekitar kalian.
2. Lalu, jawablah pertanyaan berikut berdasarkan pengamatan kalian.
 - a. Apakah kalian pernah melihat jerapah berleher pendek? Ya/Tidak
 - b. Apakah kalian setuju dengan pernyataan bahwa semua jerapah berleher panjang? Ya/Tidak

Pengamatan Gambar

1. Coba, amati gambar berikut.



▲ Gambar 3.13 Asal-usul jerapah berleher panjang.

2. Lalu, jawablah pertanyaan berikut sebagai hasil pengamatan kalian.
 - a. Tuliskan fakta-fakta yang kalian temukan pada pengamatan gambar.
 - b. Tuliskan analisis kalian terkait asal-usul jerapah leher panjang berdasarkan fakta-fakta yang ditemukan.
 - c. Amati kembali Gambar 3.11. Lalu, tuliskan perbedaan teori asal-usul jerapah berleher panjang Lamarck dan Darwin.

Pada evolusi jerapah yang kalian amati pada Aktivitas 3.8, Darwin menjelaskan bahwa pada awalnya terdapat jerapah berleher panjang

dan berleher pendek. Seiring berjalannya waktu, terjadi kompetisi makanan dan pepohonan yang semakin tinggi sehingga jerapah berleher pendek mengalami kepunahan sebab tidak dapat menjangkau makanan. Adapun jerapah berleher panjang akan bertahan dan beradaptasi dengan lingkungan. Sifat leher panjang tersebut akan diwariskan kepada keturunannya. Pokok-pokok pikiran Darwin dituangkan dalam bukunya yang berjudul *The Origin of Species*. Beberapa intisari dari buku tersebut antara lain:

- a. Semua makhluk hidup yang ada di bumi merupakan hasil keturunan dari moyang yang sama dan mengalami modifikasi. Spesies bukanlah sesuatu yang kekal atau tidak mengalami perubahan, melainkan berevolusi melalui proses perubahan bertahap dari berbagai spesies yang telah ada.
- b. Menyajikan sejumlah besar fakta yang menjelaskan asal usul makhluk hidup dengan teori evolusi dan tidak cukup dengan teori penciptaan.
- c. Mekanisme perubahan evolusi terjadi dengan adanya seleksi alam dilanjutkan dengan adaptasi. Hal ini dapat dipahami dengan melihat kembali mekanisme asal-usul jerapah berleher panjang (Lihat Gambar 3.13).

b. Sejarah perjalanan dan pokok pikiran Alfred Russel Wallace

Alfred Russel Wallace adalah seorang naturalis yang juga hidup di masa Darwin. Ia secara terpisah mengembangkan teori seleksi alam dalam perjalanannya mengamati serta mengumpulkan berbagai spesies serangga, burung dan hewan lainnya di Brazil dan kepulauan Melayu yang membentuk Indonesia. Wallace mengamati keberagaman fauna di Borneo dan melanjutkan perjalanannya ke daerah Sulawesi dan Maluku. Disana Wallace melihat bahwa adanya perbedaan yang signifikan antara keanekaragaman fauna di Indonesia Barat dan Indonesia timur. Pernahkah kalian mendengar adanya garis Wallace? Garis tersebut merupakan garis imajiner yang melintang di sepanjang Pulau Kalimantan dan Pulau Sulawesi serta memisahkan Selat Lombok dan Pulau Bali. Garis ini membagi wilayah biogeografis di Nusantara menjadi dua, yang mencerminkan perbedaan flora dan fauna antara Asia dan Australia. Coba kalian perhatikan gambar berikut ini yang memperlihatkan perbedaan biodiversitas Indonesia bagian barat dan bagian timur yang dipisahkan oleh garis Wallace.



▲ Gambar 3.14 Garis Wallace dan Persebaran Fauna di Indonesia

Selama perjalanannya, Wallace memikirkan mekanisme dibalik variasi spesies yang dia temukan. Wallace pun secara aktif mengirimkan hasil temuannya kepada Darwin. Meskipun keduanya melakukan perjalanan dan observasi di belahan dunia yang berbeda, namun memiliki kesamaan dalam kesimpulannya yaitu adanya seleksi alam dan adaptasi. Agar memperdalam pemahaman kalian terkait sejarah dan pokok pikiran Wallace dalam perjalanannya mengembangkan teori evolusi, maka lakukanlah aktivitas berikut ini:

AKTIVITAS 3.9

Menarik kesimpulan sementara terkait teori evolusi Wallace

Tujuan: Siswa mampu memahami konsep seleksi alam berdasarkan teori Wallace

1. Amatilah kertas bergambar hewan-hewan yang diberikan oleh gurumu. Misalnya: bentuk sayap, ukuran tubuh dan lain-lain.
2. Anggaphlah setiap hewan tersebut adalah perwakilan dari suatu populasi yang menempati suatu wilayah tertentu
3. Kategori hewan mencakup burung, serangga, mamalia kecil, atau lainnya

4. Berikanlah label tambahan untuk setiap hewan yang menggambarkan ciri khas (misalnya, burung dengan paruh panjang, sayap lebar, tubuh kecil, dll.)
5. Letakkanlah masing-masing gambar hewan tersebut di atas sebuah kertas. Kertas tersebut dianggap sebagai kondisi yang ideal atau stabil sebagai habitat hewan yang diberikan.
6. Dengarkanlah cerita “tantangan lingkungan” yang disampaikan oleh guru.
 - Tantangan yang pertama adalah suhu menjadi semakin dingin. Hanya hewan dengan ukuran tubuh lebih besar yang mampu bertahan karena mereka dapat mempertahankan panas tubuh. Siswa yang memegang gambar hewan bertubuh kecil dieliminasi.
 - Tantangan kedua perubahan sumber makanan: Makanan di pulau semakin terbatas pada biji yang keras. Hanya hewan dengan paruh yang lebih kuat dan besar yang dapat makan. Hewan dengan paruh kecil dieliminasi.
 - Tantangan ketiga: Burung predator datang, yang memangsa burung dengan warna mencolok. Burung dengan warna netral atau kamuflase yang baik bertahan hidup.
 - Tantangan selanjutnya disesuaikan sehingga jumlah yang bertahan hidup tersisa sedikit dan lanjutkan kegiatan tersebut dengan diskusi.
7. Lakukan diskusi dengan teman kelas lainnya lalu sampaikan jawabanmu kepada guru.

Pertanyaan diskusi

1. Mengapa beberapa hewan (siswa) bertahan, sementara yang lain tidak? *Diskusikan bagaimana tantangan lingkungan mempengaruhi hewan-hewan tersebut dan mengapa sifat-sifat tertentu memberikan keuntungan.*
2. Bagaimanakah populasi berubah dari awal hingga akhir?
Jelaskan bahwa ini adalah contoh dari bagaimana spesies bisa berevolusi seiring waktu. Individu yang bertahan lebih mungkin mewariskan sifat-sifat mereka ke generasi berikutnya, sehingga populasi akan menyesuaikan dengan tantangan yang ada.

3. Bagaimanakah jika tantangan lingkungan berubah kembali?

Diskusikan bagaimana spesies yang sudah beradaptasi dengan satu tantangan mungkin tidak bisa bertahan jika lingkungan kembali berubah.

Setelah melakukan aktivitas tersebut, kalian sudah melakukan simulasi seleksi alam seperti yang ditemukan oleh Wallace dalam perjalanannya terkait perbedaan geografis menyebabkan perbedaan persebaran flora dan fauna. Berikut adalah beberapa poin yang menjadi pokok-pokok pikiran Wallace terkait evolusi:

- a. Seleksi alam merupakan gagasan inti dalam teori Wallace. individu-individu dengan karakteristik yang paling sesuai dengan lingkungan mereka memiliki peluang lebih besar untuk bertahan hidup dan bereproduksi
- b. Lingkungan memiliki peranan yang penting dalam keberlangsungan hidup makhluk hidup serta perubahan lingkungan hidup memberi pengaruh terhadap arah evolusi
- c. Isolasi geografis dapat menyebabkan terbentuknya spesies baru. Ketika populasi hewan atau tumbuhan terpisah secara geografis, mereka berkembang secara terpisah, dan perbedaan lingkungan menghasilkan spesies yang berbeda.

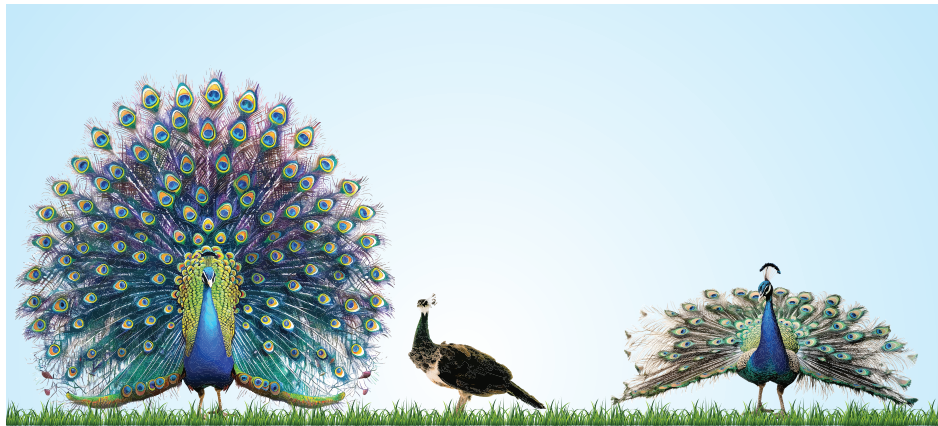
Di kepulauan Aru, Wallace menderita sakit malaria yang pada waktu itu tidak ada obatnya. Ketika pada suatu hari ia kemudian sembuh, sedangkan pekerjanya banyak yang meninggal. Dari penyakitnya itu, timbullah ide mengenai hukum alam: siapa yang kuat, dialah yang menang atau *survival of the fittest*. Frase ini disepakati oleh Wallace dan Darwin sebagai suatu pemikiran yang tepat untuk menjelaskan konsep seleksi alam sebagai usaha untuk menghindari makna ambigu bahwa alamlah yang melakukan seleksi.

c. Perbedaan Teori Evolusi Darwin dan Wallace

Setelah membaca pembahasan teori evolusi Darwin dan Wallace yang disampaikan di atas, tentu saja kalian sudah memahami peran dari seleksi alam dalam evolusi makhluk hidup. Darwin dan Wallace memiliki persamaan pandangan terhadap perkembangan makhluk hidup sebagai

hasil dari seleksi alam. Satu hal yang membedakan pandangan antara Darwin dan Wallace adalah perkembangan evolusi sebagai akibat seleksi seksual. Meskipun keduanya sepakat bahwa seleksi seksual melibatkan kompetisi antar individu untuk mendapatkan pasangan. Darwin meyakini bahwa beberapa fenotip menarik yang berkembang sebagai karakteristik individu tidak memiliki fungsi khusus namun mempengaruhi daya tarik individu lain dalam memilih pasangan. Sebaliknya Wallace berpendapat bahwa munculnya fenotip atau karakteristik menarik yang dimiliki oleh suatu individu menunjukkan kualitas fisik yang berfungsi sebagai kekuatan untuk seleksi alam.

Perbedaan antara Darwin dan Wallace dalam seleksi seksual dapat kalian perhatikan pada ilustrasi berikut ini.



▲ Gambar 3.15 Dua burung merak jantan dan 1 burung merak betina. Burung merak betina akan memilih burung merak jantan yang lebih indah. (Source: www.vogue.com)

Darwin berpendapat bahwa warna cerah pada burung jantan bisa berkembang hanya karena betina menganggapnya menarik tanpa mempertimbangkan fungsi khusus dari fenotip tersebut. Seleksi seksual prinsipnya adalah bentuk perluasan konsep seleksi alam dari Darwin seperti yang ditulis dalam bukunya pada tahun 1871 yang berjudul *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*. Secara singkat, Darwin menyatakan bahwa seleksi alam diakibatkan oleh persaingan untuk bertahan hidup, tetapi seleksi seksual muncul karena persaingan untuk bereproduksi. Persaingan seksual ada dua macam: yang satu antara individu berjenis kelamin sama, biasanya jantan, untuk mengusir atau membunuh saingan mereka, dan betina tetap pasif; sementara yang lain adalah persaingan yang juga antara individu berjenis kelamin sama untuk

menyenangkan atau mempesona lawan jenis, biasanya betina, yang tidak lagi pasif, tetapi menyeleksi pasangan yang cocok.

Alfred Russel Wallace mengkritik teori seleksi seksual Darwin dan menyatakan bahwa aspek dari seleksi seksual hanyalah merupakan salah satu bentuk dari seleksi alam, dan bahwa contoh sayap merak sebenarnya bersifat adaptif. Wallace berpendapat bahwa warna cerah yang dimiliki oleh burung menunjukkan kekuatan dan daya tahan, hal inilah yang menjadi pertimbangan betina dalam pemilihan pasangan.

c. Mekanisme Evolusi

Kalian telah mengetahui bahwa mutasi merupakan salah satu faktor penyebab yang mengubah susunan urutan materi genetik sehingga memungkinkan munculnya fenotip baru. Hal lain yang mempengaruhi munculnya spesies baru, yaitu seleksi alam, seperti perubahan leher jerapah sesuai teori Darwin. Mekanisme ini bekerja dalam sebuah ekosistem yang terdiri atas berbagai populasi yang saling memperebutkan makanan atau ruang untuk berkembang. Pada kondisi tersebut, alam akan menyeleksi spesies-spesies yang lebih kompetitif, resisten terhadap penyakit, dan paling mampu beradaptasi pada perubahan lingkungan agar bisa bertahan hidup dan bereproduksi. Adapun spesies lain yang rentan terhadap penyakit dan perubahan lingkungan akan mati.

Setelah jutaan tahun, sifat gen dan alel yang menguntungkan atau paling mampu bertahan akan terakumulasi dalam satu spesies tertentu dan membentuk satu sifat baru dengan kemampuan adaptasi yang lebih baik. Karakter spesies yang adaptif tersebut kemungkinan akan berbeda jauh dari spesies awal.

AKTIVITAS 3.10

Memahami Mekanisme Seleksi Alam



▲ Gambar 3.14 (a) Kupu-kupu *Biston betularia* sayap gelap (b) Kupu-kupu *Biston betularia* sayap cerah.

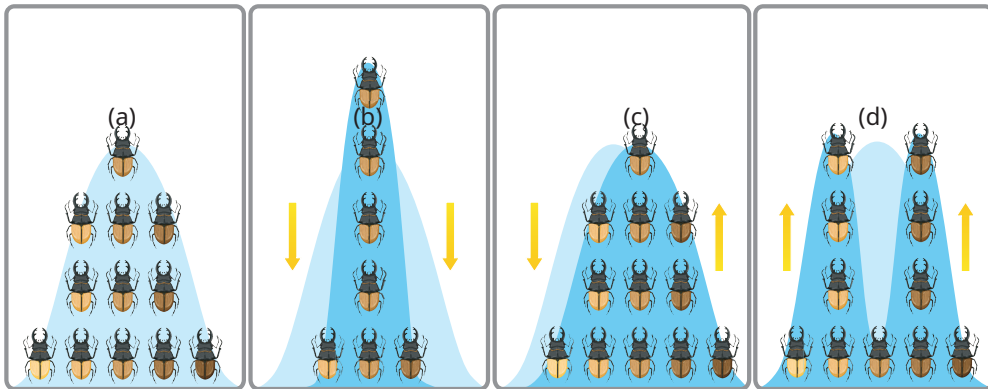
Sumber: <https://pxhere.com/> pada 29 Mei 2022

1. Bacalah teks berikut dengan saksama.
Kupu-kupu *Biston betularia* memiliki variasi sayap cerah dan gelap. Sebelum revolusi industri di Inggris, jumlah kupu-kupu bersayap cerah lebih banyak daripada kupu-kupu bersayap gelap. Sebaliknya, setelah revolusi industri, kupu-kupu bersayap cerah jumlahnya menjadi lebih sedikit dibandingkan dengan kupu-kupu bersayap gelap.
2. Mengapa hal demikian bisa terjadi?
3. Diskusikan dengan teman sekelompok kalian mengenai kasus di atas.
4. Presentasikan hasil diskusi kalian di depan kelas.

Mekanisme seleksi alam dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu seleksi alami dan seleksi buatan (*artificial*).

1) Seleksi alami

Masihkah kalian ingat, variasi paruh burung finch pada pembahasan sebelumnya? Darwin menjelaskan bahwa variasi paruh burung tersebut disesuaikan dengan jenis makanannya. Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa seleksi alam bekerja langsung pada fenotip (sifat yang tampak). Seleksi alami bekerja dengan mengubah distribusi frekuensi sifat yang diwariskan dalam suatu populasi. Distribusi frekuensi sifat dapat terjadi dengan 3 cara, yaitu direksional, disruptif, dan stabilitas. Perhatikan Gambar 3.15 berikut.



▲ Gambar 3.15 Distribusi frekuensi gen seleksi alam.

Berdasarkan gambar di atas, gambar pertama (a) merupakan keadaan awal persebaran frekuensi fenotip sebelum terjadi seleksi alam. Selanjutnya, terjadi distribusi dengan tiga tipe distribusi frekuensi gen, yaitu:

- Seleksi alam penstabilisasi adalah kondisi seleksi alam yang menghilangkan varian ekstrem dan mempertahankan tipe intermediet. Pada Gambar 3.15 (b) di atas, terlihat sisi fenotip kiri warna cerah dan kanan warna gelap berkurang drastis, sedangkan sifat intermediet yang berada di bagian tengah dapat bertahan dan semakin banyak.
- Seleksi alam direksional adalah kondisi seleksi alam yang menguntungkan varian/fenotip pada salah satu distribusi ekstrem. Pada Gambar 3.15 (c) di atas, peristiwa seleksi alam mengakibatkan berkurangnya jumlah kumbang berwarna cerah, namun jumlah kumbang berwarna gelap semakin bertambah.
- Seleksi alam disruptif adalah peristiwa seleksi alam yang bersifat menguntungkan varian pada kedua ujung distribusi. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 3.15 (d) yang memperlihatkan kumbang cerah dan gelap mengalami penambahan jumlah, sedangkan sifat intermediet berkurang drastis.

Seleksi alam dapat terjadi pada kondisi berbeda, yaitu terkait perilaku. Coba, kalian lakukan aktivitas 3.10 untuk mempelajari hal ini.

AKTIVITAS 3.11

Mendiskusikan Seleksi Alam terkait Perilaku Makhluk Hidup

1. Baca artikel pada link berikut.

https://www.bbc.com/indonesia/majalah/2013/07/130725_ipitek_peacock



▲ Gambar 3.16 Ekor kipas merak jantan digunakan untuk menarik perhatian betina.

2. Berdasarkan bacaan pada link di atas, tuliskan hal-hal yang bisa dianggap sebagai kebiasaan perilaku burung merak jantan dalam menarik perhatian burung merak betina.
3. Prediksilah apa hubungan antara kebiasaan perilaku burung merak jantan menarik burung merak betina tersebut dengan mekanisme seleksi alam.
3. Apakah perilaku tersebut memiliki pengaruh terhadap keberadaan variasi burung merak? Diskusikan bersama kelompok kalian.

2) Seleksi buatan/artifisial

Kalian telah mempelajari seleksi alamiah. Kini saatnya, kalian mengenal seleksi buatan. Apa itu seleksi buatan? Coba, kalian lakukan aktivitas 3.11.

AKTIVITAS 3.12

Mengeksplorasi Sifat yang Diminati pada Tanaman Anggrek

Pada perkembangan teknologi saat ini, telah banyak dikembangkan penemuan baru untuk menyelesaikan permasalahan. Salah satunya

dalam bidang pertanian, contohnya anggrek yang memiliki banyak varietas.

Carilah informasi di internet terkait sifat-sifat yang dicari para pembudidaya untuk mengembangkan varietas anggrek. Apakah ada alasan tertentu sehingga varietas tersebut lebih diminati untuk dibudidayakan? Diskusikan bersama teman kalian.

Dalam berbagai aspek kehidupan, manusia seringkali hanya memerlukan suatu sifat unggul yang dibuat secara sengaja. Untuk membuatnya, biasanya dapat dilakukan dengan mengubah sifat genetik melalui persilangan atau rekayasa genetik. Cara seperti inilah yang disebut dengan seleksi buatan. Pada Aktivitas 3.11, kalian sudah menemukan salah satu contoh pembuatan sifat unggul secara sengaja untuk mendapatkan nilai jual yang tinggi. Artinya, aktivitas seleksi buatan ini dilakukan untuk menemukan sifat-sifat yang dianggap menguntungkan manusia. Hal tersebut umumnya dilakukan dalam bidang bioteknologi. Mari kita cari tahu dengan melakukan aktivitas 3.12!

AKTIVITAS 3.13

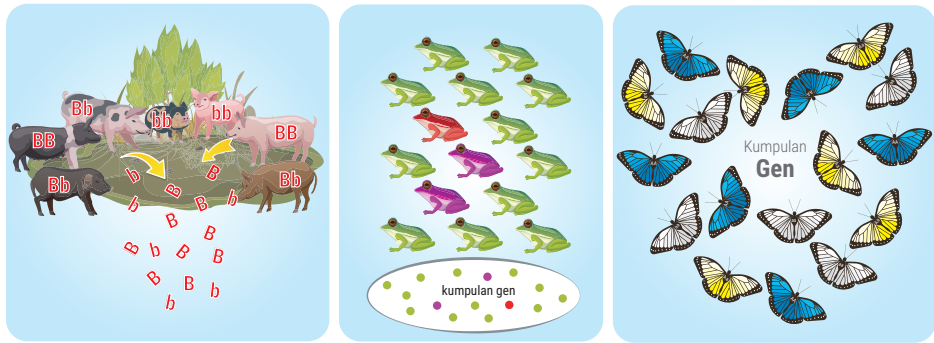
Mencari Tahu Seleksi Buatan pada Makhluk Hidup

1. Bentuklah kelompok yang terdiri atas 2 - 3 orang.
2. Lakukan literasi menggunakan berbagai sumber buku atau internet untuk mencari tahu satu contoh seleksi buatan pada hewan dan tumbuhan.
3. Susun hasil literasi kalian dalam sebuah poster.
4. Presentasikan poster tersebut di depan kelas.
5. Setelah melakukan dan mendengarkan presentasi terkait seleksi buatan, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut secara mandiri.
 - a. Apakah tujuan dilakukannya kegiatan seleksi buatan?
 - b. Bagaimanakah hasil dari suatu kegiatan seleksi buatan?
 - c. Apakah keuntungan dan kerugian dari kegiatan seleksi buatan bagi manusia?
 - d. Bagaimana pengaruh kegiatan seleksi buatan terhadap keseimbangan ekosistem?

c. Hukum Hardy Weinberg dan Mikroevolusi

Setiap mekanisme evolusi yang terjadi menyebabkan perubahan frekuensi gen dalam populasi. Populasi merupakan kelompok individu dari spesies yang sama dan menempati wilayah yang sama, serta dapat melakukan perkawinan satu sama lain dan menghasilkan keturunan yang fertil. Genetika populasi berfokus pada perubahan genetik dalam sebuah kelompok individu sepanjang waktu.

Setiap populasi memiliki *gene pool*, yaitu kumpulan total gen dalam populasi (semua alel pada semua lokus gen yang terdapat pada semua individu yang menyusun populasi). Perhatikan gambar berikut untuk memahami definisi *gene pool*.



▲ Gambar 3.17 *Gene pool*.

Dalam sebuah *gene pool*, terdapat frekuensi genotip, frekuensi fenotip, dan frekuensi alel. Frekuensi genotip adalah perbandingan sebuah genotip tertentu dalam suatu populasi. Frekuensi fenotip adalah perbandingan sebuah fenotip tertentu dalam suatu populasi. Adapun frekuensi alel adalah perbandingan sebuah alel spesifik dalam suatu populasi.

Menurut Godfrey Harold Hardy (British) & Wilhelm Weinberg (Jerman) pada tahun 1908, frekuensi alel dan genotip tidak berubah dari generasi ke generasi atau bersifat tetap/konstan. Kondisi ini dikenal dengan kesetimbangan Hardy Weinberg. Beberapa syarat terjadinya kesetimbangan ini antara lain:

- 1) ukuran populasi sangat besar (tidak ada *genetic drift*).
- 2) terisolasi dari populasi lain (tidak ada *gene flow*).
- 3) tidak ada mutasi. Mutasi mungkin saja terjadi, akan tetapi dengan syarat bahwa frekuensi mutasi maju sama dengan frekuensi mutasi mundur. Artinya, ketika alel A bermutasi menjadi a, memiliki frekuensi yang sama ketika alel a bermutasi menjadi A.

- 4) perkawinan acak.
- 5) tidak ada seleksi alam.

Fakta menunjukkan bahwa kesetimbangan populasi sulit dicapai, karena syarat-syarat di atas sulit terpenuhi. Persamaan kesetimbangan Hardy Weinberg dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut.

$$p+q=1$$

$$p^2+2pq+q^2=1$$

Keterangan:

p^2 : frekuensi alel AA

q^2 : frekuensi alel aa

$2pq$: frekuensi alel Aa

1 : semua alel individu dalam populasi

Dalam persamaan ini, yang dimaksud frekuensi alel adalah perbandingan alel dengan alel lainnya dalam suatu *gene pool*. Untuk memahami persamaan Hardy Weinberg lebih detail, perhatikan contoh berikut.

Contoh:

Jumlah individu dalam suatu populasi sebanyak 60.000 orang. Perbandingan penderita albino (aa) dengan orang normal (AA atau Aa) sebesar 1:10.000. Berapakah jumlah orang normal yang heterozigot?

Diketahui:

Albino merupakan alel homozigot resesif (aa).

Frekuensi orang albino $1:10.000 = 0,0001$. Pada hukum Hardy Weinberg disimbolkan sebagai q^2 .

Maka frekuensi alel albino (q) = $\sqrt{0,0001} = 0,01$

Jawab:

Berdasarkan Hukum Hardy Weinberg bahwa $p + q = 1$

Maka, $p + 0,01 = 1$

Frekuensi alel A = $1 - 0,01$
= 0,99

Frekuensi orang normal heterozigot Aa = $2Aa$
= $2 \times 0,99 \times 0,01$
= 0,0198

Maka jumlah orang normal heterozigot = $0,0198 \times 60.000$
= 1.118 orang

Untuk menambah pemahaman kalian seputar hukum Hardy Weinberg, coba lakukan aktivitas 3.15 berikut!

AKTIVITAS 3.14

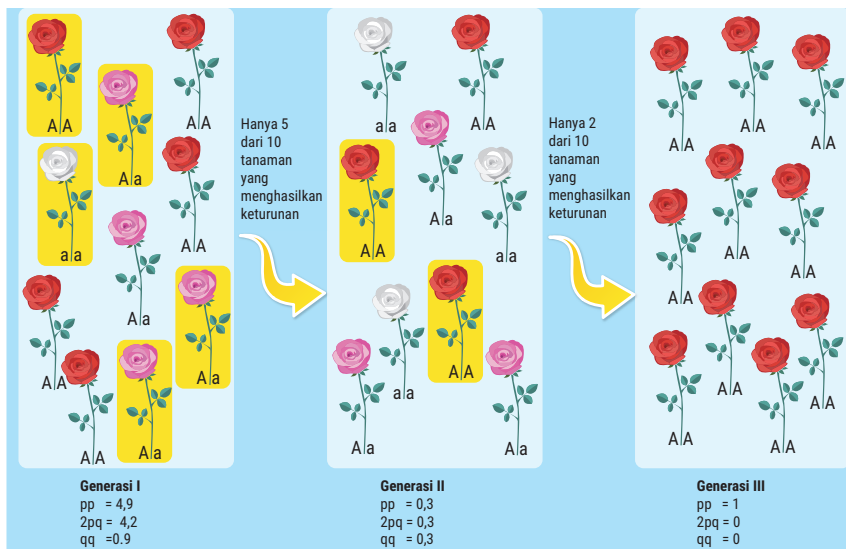
Ayo Berlatih

Kerjakan soal berikut, lalu diskusikan bersama guru kalian.

1. Jumlah penduduk suatu desa sebanyak 1.000 orang. Orang bergolongan darah B sebanyak 150 orang dan orang bergolongan darah O sebanyak 490 orang. Tentukan jumlah orang bergolongan darah A heterozigot!
2. Dalam suatu populasi, terdapat individu perasa pahit kertas PTC (*phenil-thio-carbamide*) sebesar 75%, sedangkan yang lainnya bukan perasa PTC. Sifat bukan perasa PTC dikendalikan alel resesif (t) dan perasa PTC dikendalikan oleh alel dominan (T). Berapakah frekuensi genotip perasa PTC dan bukan perasa PTC dalam populasi tersebut?

d. Hanyutan genetik (*genetic drift*)

Hanyutan genetik merupakan perubahan frekuensi alel secara tak terduga dari generasi ke generasi berikutnya, terutama di dalam populasi kecil. Hanyutan genetik menjadi faktor penyebab terjadinya mikroevolusi dalam suatu populasi. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 3.18 Perubahan alel dalam sebuah genetic drift.

Sumber: Campbell (2003)

Berdasarkan gambar 3.18 di atas, dapat dilihat bahwa populasi awal bunga liar berjumlah 10 tanaman yang bervariasi dengan perbandingan genotip AA : Aa : aa sebesar 4 : 3 : 1. Dari jumlah total 10 tanaman, hanya 5 tanaman yang bertahan dengan perbandingan genotip 1 : 3 : 1. Seiring berjalannya waktu, perubahan frekuensi gen tetap terjadi hingga pada akhirnya hanya satu jenis genotip saja yang diwariskan pada generasi ketiga, yaitu gen AA. Hal ini memberi dampak pada populasi bunga liar yang terdapat di generasi ketiga hanya ada satu jenis warna bunga merah dengan genotip AA. Perubahan frekuensi alel yang terjadi dari generasi ke generasi memberikan dampak berkurangnya variasi bunga liar di generasi terakhir. Faktor utama terjadinya *genetic drift* ada dua, yaitu **efek pendiri (*founder effect*)** dan **efek leher botol (*bottleneck effect*)**.

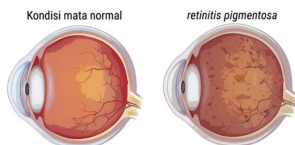
1) Efek pendiri (*founder effect*)

Sebelum mempelajari lebih jauh mengenai efek pendiri, lakukan aktivitas 3.16 berikut!

AKTIVITAS 3.15

Menganalisis Frekuensi Alel Penyakit Retinitis Pigmentosa

1. Baca teks berikut dengan saksama.



▲ Gambar 3.19 Perbedaan mata normal dan mata yang berkelainan

Koloni Orang Inggris di Tristan da Cunha

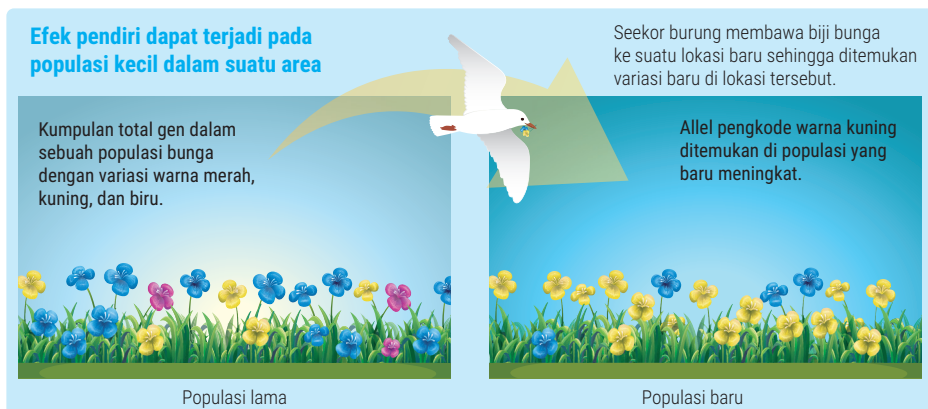
Koloni Orang Inggris di Tristan da Cunha Tahun 1814, sebanyak 15 orang membentuk koloni orang Inggris di Tristan da Cunha (lautan Atlantik antara Afrika dan Amerika Serikat).

Ternyata, salah seorang penduduk awal koloni tersebut membawa alel resesif untuk kelainan mata yang disebut *retinitis pigmentosa*, yaitu suatu bentuk kebutaan progresif yang menyerang individu homozigot.

Dari 240 orang keturunan yang masih hidup di tahun 1960-an, diketahui 4 orang mengidap penyakit *retinitis pigmentosa* dan 9 orang telah diketahui pembawa sifat (*carrier*). Frekuensi alel penyebab penyakit tersebut di Tristan de Cunha **10 kali lebih tinggi** daripada di daerah populasi asal.

2. Berdasarkan teks di atas, coba kalian analisis dan diskusikan pertanyaan berikut.
 - a. Mengapa penyakit *retinitis pigmentosa* lebih banyak terjadi di tempat baru dibanding populasi asal?
 - b. Apakah dampak dari peristiwa tersebut?
3. Tulis hasil analisis dan diskusi kalian dalam bentuk laporan sederhana dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan analisa pada kasus di atas, kita akan melanjutkan pembahasan hubungan antara pembentukan koloni baru dengan evolusi. Efek pendiri terjadi pada saat kelompok kecil individu terisolasi dari populasi yang besar, kemudian kelompok tersebut menghasilkan populasi baru dengan *gene flow* yang berbeda dari populasi awal. Untuk lebih mudah memahami definisi efek pendiri, perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 3.20 Peristiwa pembentukan koloni baru.

Hal yang mungkin terjadi dari peristiwa efek pendiri pada gambar di atas, antara lain:

- a. Susunan genetik penghuni baru tidak mewakili kumpulan gen populasi besar yang mereka tinggalkan atau koloni asal.
- b. Memberikan sumbangan atas frekuensi kelainan dan gangguan keturunan tertentu yang relatif tinggi pada populasi hasil keturunan sejumlah kecil penghuni baru. Jika hal ini terus-menerus berlangsung dalam kurun waktu yang panjang dengan varian yang adaptif maka akan muncul spesies baru yang berbeda dengan spesies aslinya.

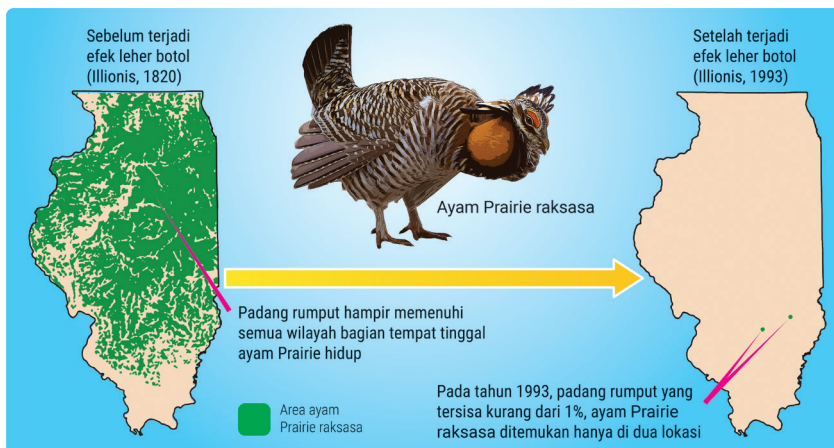
2) Efek leher botol

Sebelum mempelajari lebih jauh mengenai efek pendiri, lakukan aktivitas 3.17 berikut.

AKTIVITAS 3.16

Memahami Keterkaitan Penurunan Populasi dengan Mekanisme Evolusi

1. Perhatikan gambar berikut dengan saksama!



▲ Gambar 3.21 Perubahan jumlah rumput teki

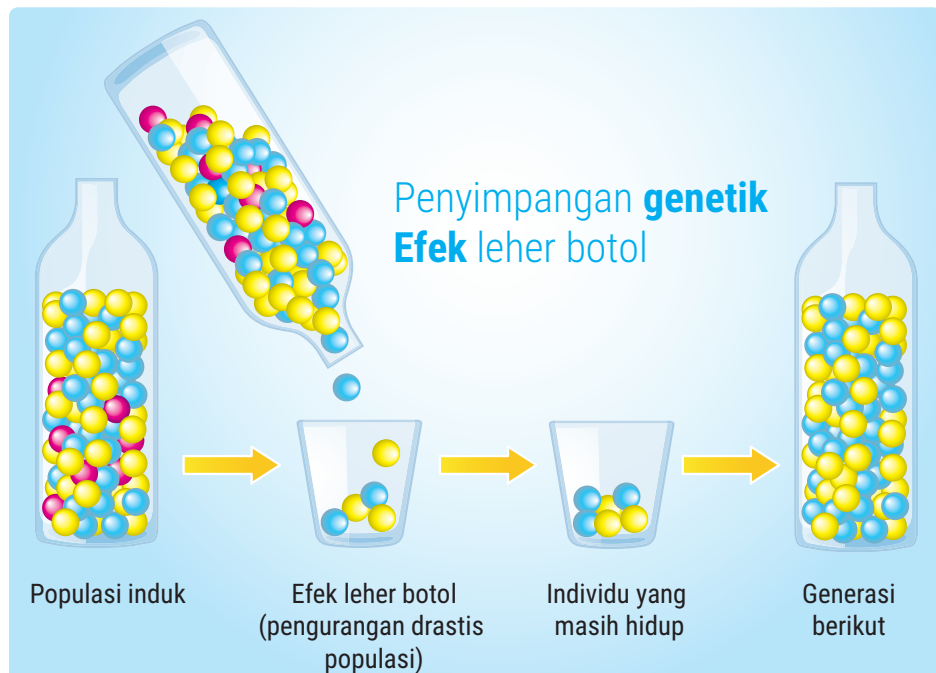
1. Berdasarkan gambar di atas, deskripsikan hal yang kalian amati jika dilihat dari perubahan jumlah rumput teki pada tahun 1820 dan tahun 1993.
2. Perhatikan gambar berikut, lalu deskripsikan hal yang mungkin terjadi.



▲ Gambar 3.22 Kebakaran hutan Sumatera.

3. Berdasarkan Gambar 3.21 dan Gambar 3.22, jawab pertanyaan berikut.
 - a. Apa persamaan kedua gambar tersebut?
 - b. Bagaimana hubungannya dengan mekanisme evolusi? Jelaskan!
4. Tulis jawaban kalian dalam bentuk laporan sederhana dan presentasikan di depan kelas.

Setelah melakukan Aktivitas 3.17, selanjutnya kita akan membahas efek leher botol serta hubungannya dengan mekanisme evolusi. Efek leher botol adalah peristiwa terjadinya penurunan ukuran populasi secara besar-besaran karena perubahan mendadak pada lingkungan. Hal ini dapat diakibatkan oleh kebakaran, gunung meletus, banjir, dan lainnya. Populasi telah melewati “leher botol” pembatas ukuran. Untuk lebih memahami efek leher botol, perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 3.23 Mekanisme efek leher botol.

Gambar 3.23 di atas merupakan ilustrasi dari peristiwa leher botol yang dapat mengakibatkan perubahan frekuensi genotip pada sebuah populasi antargenerasi. Botol pertama merupakan populasi induk atau

populasi awal yang memiliki banyak variasi genotip yang disimbolkan dengan warna-warni di dalam botol. Botol yang dimiringkan merupakan analogi peristiwa efek leher botol dapat berupa bencana alam, kepunahan, dan sebagainya. Oleh karena itu, pada botol berikutnya merupakan analogi untuk populasi generasi kedua, di mana jumlah variasi sudah berkurang. Spesies yang dapat melewati leher botol dianggap sebagai spesies yang selamat dan mampu bertahan hidup. Sifat dari spesies yang bertahan tersebut yang akan diwariskan ke generasi berikutnya sehingga pada generasi terakhir jumlah variasi yang tersisa menjadi sedikit.

Berdasarkan penjabaran di atas, beberapa hal yang mungkin terjadi sebagai dampak dari efek leher botol, antara lain:

- Susunan genetik dari populasi yang selamat tidak sama lagi dengan susunan gen populasi awal.
- Suatu alel-alel tertentu muncul secara dominan dibanding alel-alel yang lain pada individu-individu yang selamat.
- Beberapa alel akan berkurang sehingga jumlahnya sedikit pada individu-individu yang selamat.
- Beberapa alel akan hilang sehingga tidak ditemukan lagi pada individu-individu yang selamat.

Tahukah Kamu

Pada tahun 1870, variasi anjing laut gajah utara (*Mirounga angustirostris*) masih cukup banyak, meskipun jumlah individunya hanya 20 ekor. Tetapi saat diuji pada tahun 1970-an, jumlah anjing laut gajah utara mencapai 30.000 ekor tanpa variasi genetik atau hanya ditemukan satu spesies.



▲ Gambar 3.24 Anjing laut gajah utara

Setelah mempelajari pembahasan di atas, coba kalian mengingat kembali pembahasan yang telah dipelajari dengan melakukan aktivitas 3.18 berikut!

AKTIVITAS 3.17

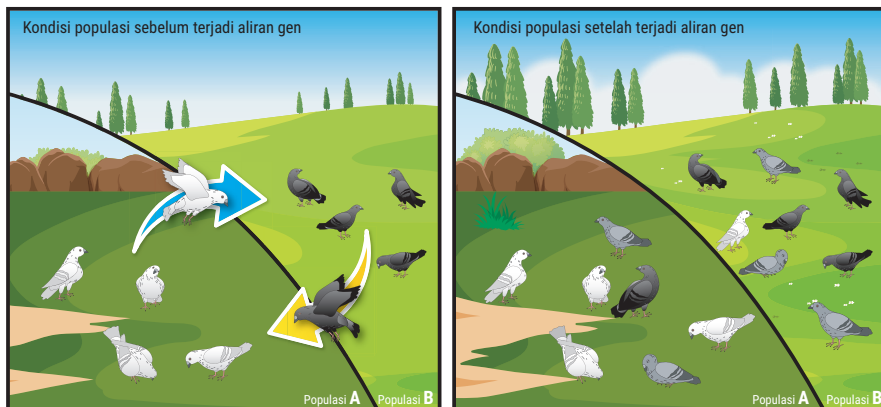
Ayo Berlatih

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Jelaskan bagaimana efek leher botol dan efek pendiri menjadi faktor terjadinya mikroevolusi!
2. Mengapa hanyutan genetik sangat berdampak pada populasi kecil, namun tidak terlalu berpengaruh pada populasi besar?

e. Aliran gen (*gene flow*)

Aliran genetik merupakan peristiwa perpindahan alel (masuk atau keluar) dari populasi akibat pergerakan individu yang fertil. Aliran gen cenderung mengurangi perbedaan/variasi antarpopulasi. Aliran gen tersebut terjadi melalui penyerbukan dan migrasi (emigrasi & imigrasi). Perhatikan gambar berikut untuk memahami mekanisme aliran gen.



Aliran gen adalah perpindahan gen di antara dua fasilitas

▲ Gambar 3 25 Mekanisme aliran gen antarpopulasi.

f. Bukti-bukti mekanisme evolusi Darwin

Pernahkah kalian menonton tentang animasi hewan-hewan purbakala, seperti dinosaurus? Jika hewan tersebut telah punah jutaan tahun lalu, bagaimana kita mampu menggambarkan keberadaan tubuh dinosaurus tersebut? Oleh karena itu, sangat diperlukan sebuah petunjuk yang menjelaskan keberadaan dan asal-usul hewan yang telah punah. Petunjuk tersebut dikenal dengan istilah bukti-bukti evolusi. Berikut beberapa bukti evolusi.

1) Variasi individu dalam satu keturunan

Sebelum membahas variasi genetik sebagai bukti evolusi, lakukan aktivitas 3.19 terlebih dahulu.

AKTIVITAS 3.18

Menganalisis Faktor Penyebab Kemiripan dalam Anggota Keluarga

1. Amati lingkungan keluarga kalian di rumah dan isi tabel berikut.

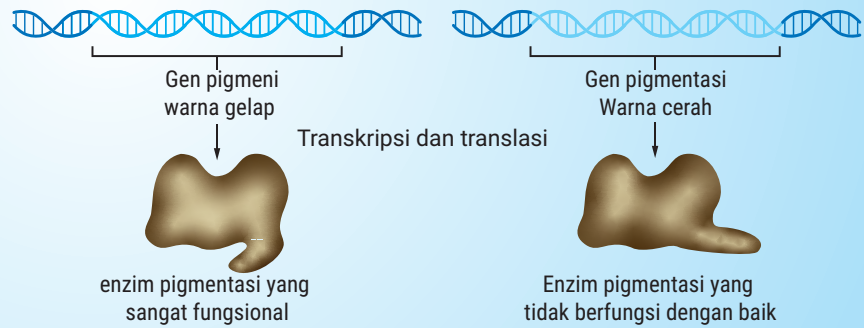
No.	Anggota Keluarga	Warna Kulit	Rambut	Warna Mata	Daun Telinga	Tinggi	Berat

2. Buatlah kesimpulan dari hasil pengamatan kalian terkait seberapa besar persentase kemiripan di antara anggota keluarga kalian.
3. Coba kalian analisis faktor penyebab adanya kemiripan tersebut dengan menghubungkan pembelajaran genetika pada bab ini.

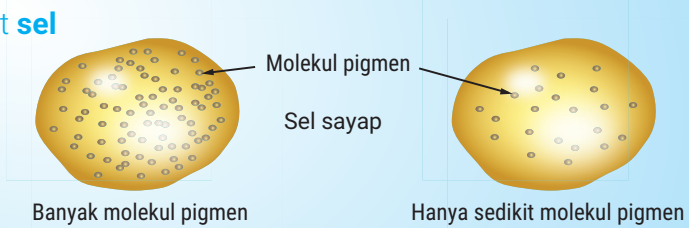
Setelah melakukan kegiatan pengamatan sederhana di atas, kalian akan menemukan bahwa terdapat perbedaan dan kemiripan di antara anggota keluarga. Fakta biologi memperlihatkan bahwa tidak pernah ditemui dua individu yang identik, bahkan pada anak kembar sekalipun. Hal inilah yang disebut keanekaragaman tingkat gen. Faktor utama yang menyebabkan munculnya variasi di antara spesies, yaitu faktor gen dan faktor luar, seperti makanan, suhu, keadaan tanah, dan sebagainya.

Perhatikan Gambar 3.26 di bawah ini dan coba tuliskan kesimpulan yang bisa kalian ambil berdasarkan gambar tersebut.

Tingkat molekuler



Tingkat sel



Tingkat organisme



Tingkat populasi



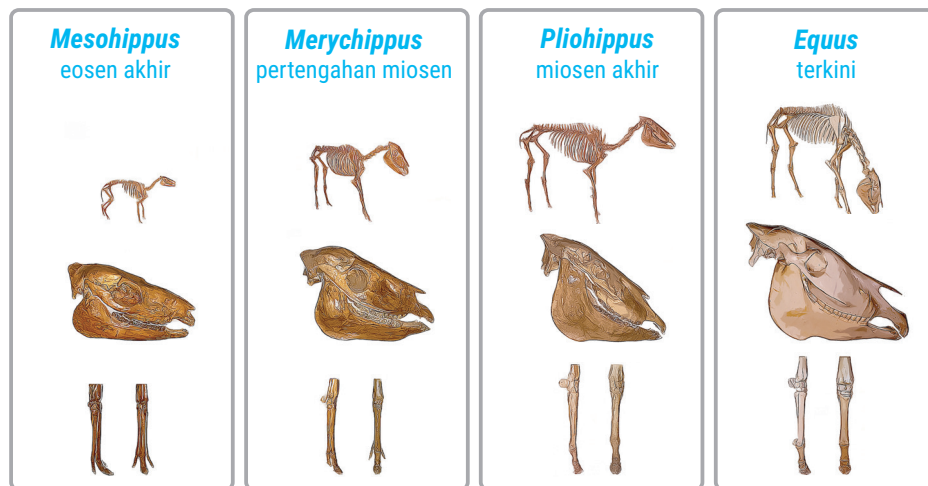
▲ Gambar 3.26 Ekspresi gen pada kupu-kupu bersayap gelap dan cerah

Gambar 3.26 memperlihatkan bahwa keberadaan gen yang mengode pigmen warna akan memengaruhi warna sayap kupu-kupu yang akan dihasilkan. Variasi di dalam suatu spesies dalam perkembangannya akan diwariskan pada keturunan berikutnya. Jika keturunan dengan variasi yang berbeda menempati suatu daerah yang berbeda maka dapat terjadi perubahan fenotip yang menunjukkan terjadinya peristiwa spesiasi (proses pembentukan spesies yang baru).

2) Fosil

Coba kalian pikirkan, bagaimana para ilmuwan mengetahui adanya kehidupan di masa lampau dan memprediksi perkembangan kehidupan makhluk hidup? Hal ini tentu saja memerlukan sebuah petunjuk yang memperlihatkan hubungan dekat antara kehidupan saat ini dengan kehidupan masa lampau.

Fosil merupakan sisa-sisa binatang dan tumbuhan pada masa lampau. Ilmu yang mempelajari tentang fosil, yaitu paleontologi. Pengamatan terhadap fosil menunjukkan adanya evolusi, misalnya dengan membandingkan struktur tubuh hewan yang sudah menjadi fosil dengan hewan yang masih ada saat ini. Kesimpulan dari pengamatan tersebut bahwa keadaan lingkungan pada masa lampau dan masa sekarang berbeda. Ditemukannya fosil kuda menjadi sebuah bukti terjadinya perubahan struktur morfologi kuda dari masa ke masa. Perhatikan Gambar 3.27 di bawah ini.

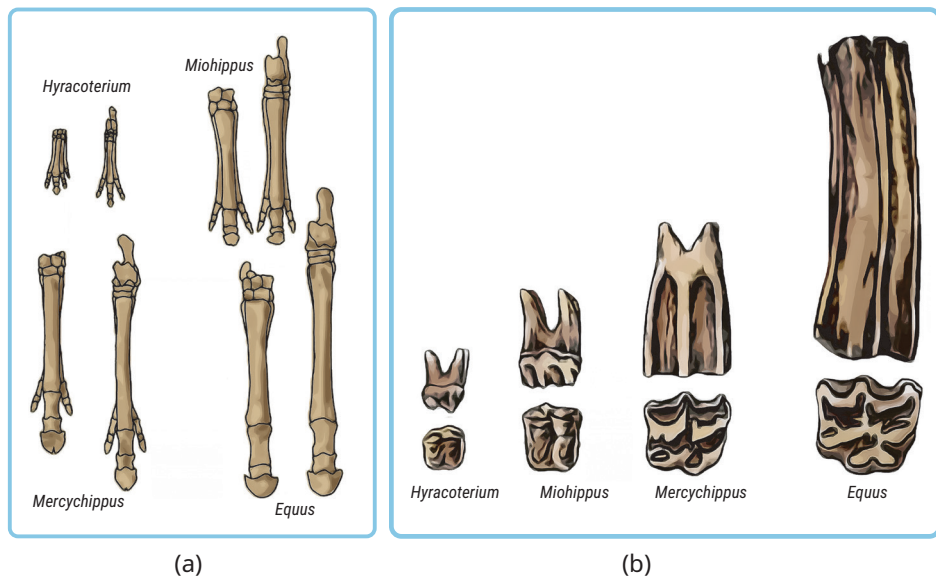


▲ Gambar 3.27 Evolusi kuda.

Fosil kuda merupakan satu-satunya fosil terlengkap yang pernah ditemukan. Berikut perubahan-perubahan yang terjadi dari *Eohippus* sampai *Equus*.

- Ukuran tubuh semakin besar. Awalnya, *Eohippus* sebesar kucing, sedangkan *Equus* ukuran tubuhnya sebesar kuda yang ada sekarang.
- Kepala semakin besar dan jarak antara mulut dengan mata semakin jauh.
- Leher semakin panjang.
- Geraham depan dan belakang semakin besar dan bentuknya lebih sesuai untuk memakan rumput-rumputan.
- Kaki depan dan belakang semakin panjang, gerakannya

Coba, kalian perhatikan Gambar 3.28 terkait gambaran perbandingan beberapa organ pada fosil kuda berikut.



▲ Gambar 3.28 (a) Fosil kaki kuda (b) Fosil gigi kuda

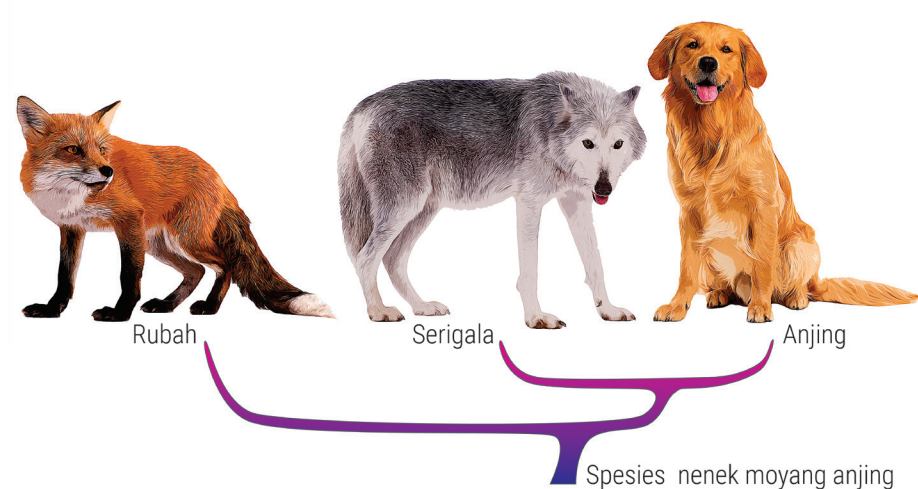
Kalian telah memahami perkembangan kuda dilihat dari fosil yang ditemukan. Coba lakukan aktivitas 3.20 sehingga menambah pemahaman kalian terkait fosil sebagai bukti terjadinya evolusi.

AKTIVITAS 3.19

Fosil sebagai Bukti Evolusi

1. Bentuklah kelompok yang terdiri atas 3 - 4 orang.
2. Lakukan kegiatan literasi untuk mencari tahu penemuan fosil yang menjelaskan evolusi dan perkembangan manusia.
3. Gunakan referensi dari sumber lain, baik internet maupun buku lainnya yang relevan.
4. Tuliskan hasil literasi dan diskusi yang kalian lakukan dan presentasikan di depan kelas.

3) Homologi dan analogi organ tubuh



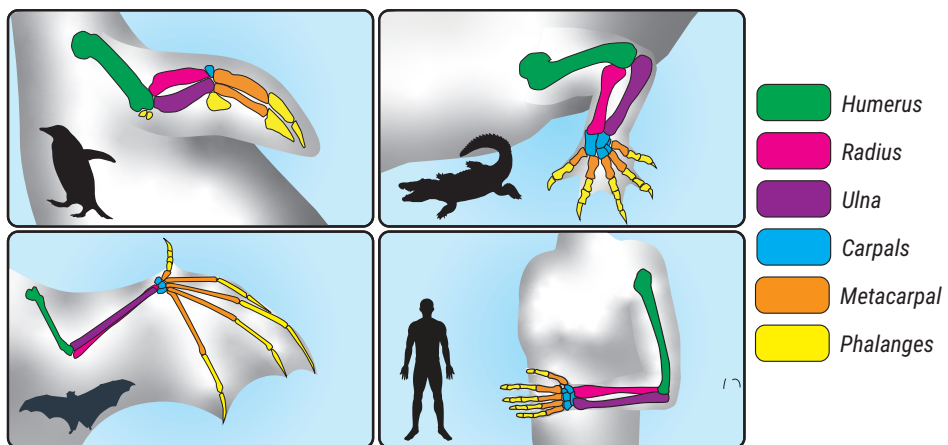
▲ Gambar 3.29 Filogeni antara rubah, serigala, dan anjing.

Coba perhatikan berbagai jenis makhluk hidup vertebrata di sekitar kalian. Bisakah kalian menemukan kesamaan dari berbagai makhluk hidup tersebut? Sebagian besar anggota kingdom Animalia memiliki dua mata, dua telinga, dua pasang anggota gerak, hati, otak, jari dan lain sebagainya. Pada Gambar 3.29 di atas, kalian bisa melihat hubungan filogeni antara rubah, serigala, dan anjing. Jika diamati lebih detail, kalian akan menemukan bahwa anjing dan serigala memiliki akar filogeni yang sama sementara rubah berbeda. Semakin detail pengamatan kalian mengenai struktur makhluk hidup, semakin banyak juga pola-pola yang

bisa ditemukan di antara makhluk hidup. Contoh yang diperlihatkan pada Gambar 3.29 di atas menunjukkan bahwa anjing lebih mirip dengan serigala dibandingkan dengan rubah. Kemiripan-kemiripan struktur tersebut disebut homolog dan sifat yang mirip tersebut menjadi bukti sifat yang diwariskan dari nenek moyang yang sama.

Homologi adalah organ-organ makhluk hidup yang memiliki bentuk asal yang sama, kemudian berubah strukturnya sehingga memiliki fungsi yang berbeda. Misalnya, sayap burung homolog dengan tangan manusia dan kaki depan kuda homolog dengan sirip dada ikan paus. Lawan dari homologi, yaitu analogi organ tubuh.

Analog adalah organ-organ tubuh yang mempunyai fungsi sama tetapi bentuk asalnya berbeda. Contohnya sayap serangga dengan sayap burung. Untuk memahami homolog dan analog pada makhluk hidup, perhatikan Gambar 3.30. Pada gambar tersebut terlihat gambar organ alat gerak pada penguin, buaya, kelelawar, dan manusia. Bisakah kalian menemukan kemiripan organ tersebut?

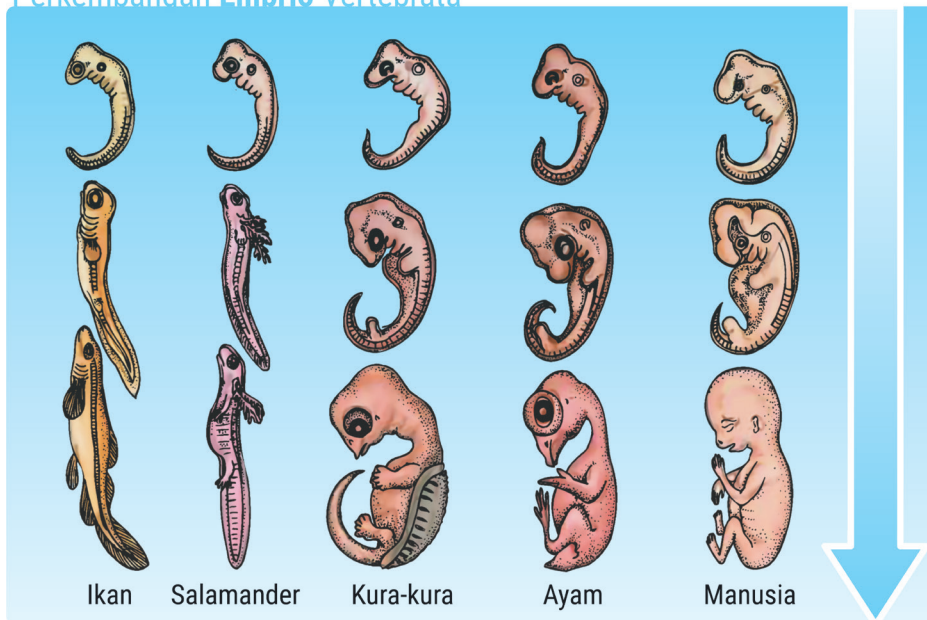


▲ Gambar 3.30 Homolog dan analog organ tubuh makhluk hidup.

4) Embriologi perbandingan

Masihkah kalian ingat pembelajaran di jenjang sebelumnya tentang sistem reproduksi? Pada pembahasan tersebut disampaikan bahwa reproduksi hewan vertebrata dimulai dari perkembangan embrio hingga menuju perkembangan janin. Skema perkembangan embrio terjadi mulai dari pembentukan zigot, morula, blastula, dan gastrula hingga membentuk embrio. Setelah fase embrio, fase perkembangan mengalami perbedaan. Coba perhatikan Gambar 3.31 berikut untuk mengamati perbedaan perkembangan embrio pada beberapa spesies.

Perkembangan Embrio Vertebrata



▲ Gambar 3.31 Tahapan perkembangan embriologi vertebrata.

Berdasarkan Gambar 3.31, dapatkah kalian menemukan perbedaan antara hasil perkembangan embrio pada berbagai spesies menurut Haeckel dan Richardson? Coba kalian amati dan tuliskan kesimpulan perbedaannya.

Tahukah kalian bahwa di dalam tubuh manusia terdapat berbagai jenis organ yang tidak memiliki fungsi, artinya keberadaan organ tersebut tidak mengganggu mekanisme tubuh manusia. Pada hewan lain organ tersebut masih ditemukan dan memiliki fungsi tertentu. Coba, kalian lakukan aktivitas 3.21 untuk mengetahui organ yang tidak memiliki fungsi pada tubuh manusia.

AKTIVITAS 3.20

Organ Sisa pada Tubuh Manusia

1. Bacalah artikel yang terdapat pada link berikut.
<https://biologimediacentre.com/10-sisa-organ-yang-tak-berguna-pada-manusia/>
2. Buatlah ringkasan dari hasil bacaan pada artikel tersebut dalam bentuk *mind map*.
3. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.
 - a. Mengapa terdapat organ sisa tersebut dalam tubuh manusia?
 - b. Apakah organ sisa tersebut dapat dijadikan sebagai bukti evolusi dan dianggap sebagai organ sisa evolusi? Berikan argumen.

5) Bukti molekuler dan kemiripan DNA

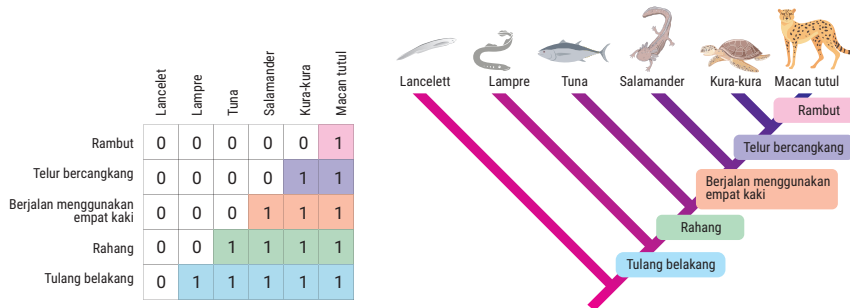
Masihkah kalian ingat pembahasan peranan materi genetik dalam menentukan sifat suatu spesies? Pada topik sebelumnya telah dibahas bahwa semakin mirip penampakan spesies maka semakin besar persentase kemiripan materi genetiknya. Misalnya, antara manusia dan monyet memiliki kemiripan materi genetik sekitar 90%, sementara antara manusia dan kucing juga memiliki kesamaan genetik lebih kecil dari 90%. Hal ini menunjukkan bahwa semua spesies memiliki nenek moyang yang sama dan semakin besar persentase kemiripan DNA memperlihatkan semakin dekat hubungan kekerabatan antarspesies tersebut.

Kedekatan hubungan kekerabatan antara makhluk hidup yang satu dengan lainnya dapat digambarkan dalam *cladogram* atau pohon filogeni. Saat di kelas X, kalian telah membahas terkait klasifikasi makhluk hidup. Masihkah kalian mengingat bahwa klasifikasi makhluk hidup disusun berdasarkan persamaan dan perbedaannya? Coba ingat kembali proses pembuatan *cladogram* dalam klasifikasi makhluk hidup dengan melakukan aktivitas 3.22 berikut.






AKTIVITAS 3.21

Membuat Kladogram

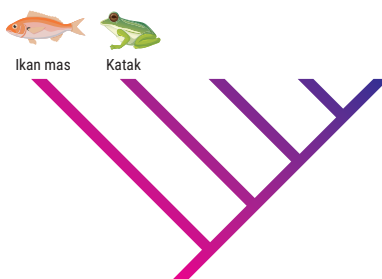
- Amati hubungan antara tabel hasil pengamatan persamaan dan gambar kladogram berikut.



- Temukan hubungan antara kedua gambar tersebut dengan mendiskusikannya bersama teman kalian.
- Untuk menguji kembali pemahaman kalian terkait kladogram, lakukan pengamatan dan menentukan persamaan ciri pada tabel berikut.

No	Ciri/karakteristik	Nama hewan				
						
1.	Habitat di darat					
2.	Pembuahan eksternal					
3.	Suhu tubuh cenderung konstan					
4.	Kulit ditutupi oleh rambut					

- Setelah kalian mengisi tabel persamaan karakter di atas, lengkapi diagram kladogram berikut.



- Komunikasikan kepada guru, apakah kladogram yang digambar sudah tepat.

Pada kegiatan di atas, kalian telah membuat kladogram berdasarkan persamaan ciri pada makhluk hidup. Kladogram juga dapat dibuat berdasarkan kemiripan materi genetik antarspesies. Coba, kalian lakukan aktivitas berikut!

AKTIVITAS 3.22

Membuat Kladogram

Misalkan ada empat spesies, yaitu A, B, C, dan D yang mempunyai urutan DNA sebagai berikut.

A– GCTTGTCCGTTACGAT

B – ACTTGTCTGTTACGAT

C – ACTTGTCCGAAACGAT

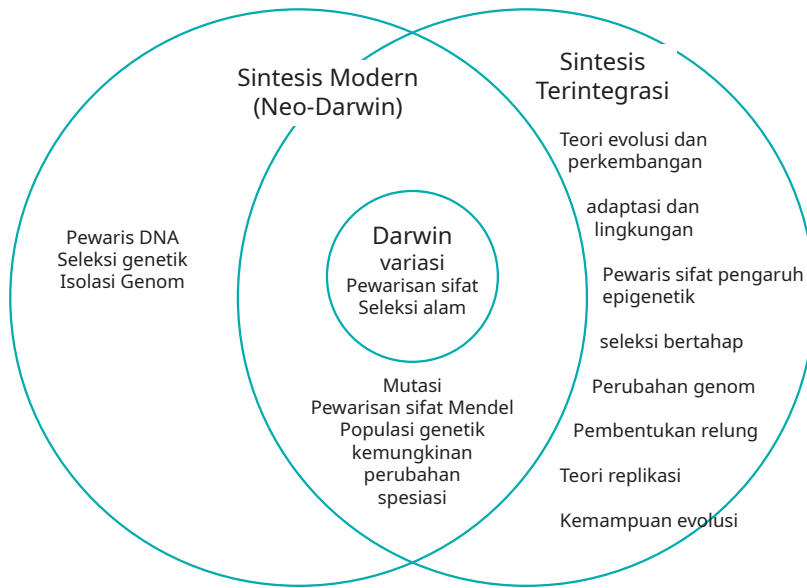
D – ACTTGACCGTTTCCTT

Gambarkan pohon filogeni atau kladogram ke empat spesies tersebut sehingga memperlihatkan hubungan kekerabatan terdekat sesuai dengan kemiripan materi genetik penyusunnya.

3. Teori Evolusi Modern

Apakah kalian masih mengingat frasa *survival of the fittest* yang digunakan oleh Darwin dan Wallace untuk menjelaskan konsep seleksi alam. Mekanisme seleksi alam memberikan penjelasan bahwa populasi dengan kemampuan menyesuaikan diri dengan lingkungan memiliki peluang lebih besar untuk bertahan hidup dan meneruskan keturunannya. Namun, teori seleksi alam yang disampaikan oleh Darwin dan Wallace tidak menjelaskan bagaimana sifat-sifat tersebut diwariskan. Hal ini berkaitan dengan objek pengamatan yang dilakukan pada masa tersebut hanya mengamati penampakan fisik makhluk hidup.

Teori evolusi memiliki jasa terhadap perkembangan ilmu biologi. Penemuan Struktur DNA Double helix oleh Watson & Crick pada tahun 1953 semakin memperjelas mekanisme evolusi. Pada teori evolusi modern ini, para ilmuwan menghubungkan mekanisme evolusi dengan genetika. Sekarang coba kalian perhatikan diagram berikut ini yang menjelaskan teori evolusi modern yang muncul setelah masa Darwin dan Wallace:



▲ Gambar 3.32 ilustrasi definisi Darwinisme, Sintesis Modern (neo-Darwinisme) dan Sintesis Terpadu

Sumber: Denis Noble, Hans H. Hoppeler, Evolution beyond neo-Darwinism: a new conceptual framework, J Exp Biol, 2015

Secara umum diagram tersebut menjabarkan teori evolusi modern dapat dibagi menjadi dua yaitu sintesis modern (Neo-Darwinisme) dan *Integrated synthesis* (sintesis terpadu). Diagram tersebut memperlihatkan bahwa teori Darwin dan Wallace terkait variasi, pewarisan sifat dan seleksi alam merupakan bagian dari perkembangan teori selanjutnya.

a. Sintesis modern (Neo-Darwinisme)

Mari mengingat kembali topik pembahasan yang sudah disampaikan pada BAB sebelumnya. Pada BAB Genetika, tentu saja kalian sudah memahami dogma sentral genetik bahwa fenotip selalu dikode oleh genotip. Pada teori sintesis modern atau yang lebih sering dikenal sebagai teori neo darwinisme adalah teori yang menjelaskan perkembangan variasi makhluk hidup dengan menghubungkan mekanisme evolusi Darwin yaitu seleksi alam dengan karya Mendel terkait mekanisme pewarisan sifat dan mutasi.

Teori evolusi Neo-Darwinisme ini muncul pada awal abad ke-20 yang didukung oleh beberapa ahli diantaranya yaitu Gregor Mendel sebagai Bapak genetika yang menemukan hukum Mendel, Ronald A. Fisher yang mengembangkan genetika populasi, dan Sewall Wright yang

memperkenalkan adanya faktor acak yang mempengaruhi alel sebuah populasi. Beberapa poin utama dari teori Neo Darwinisme yaitu:

1. Variasi yang muncul pada setiap spesies ditentukan oleh gen yang mengkode pada DNA spesies tersebut.
2. Terjadinya mutasi atau perubahan acak dalam urutan basa nitrogen DNA bisa menghasilkan variasi baru dalam suatu spesies. Variasi baru tersebut dapat bersifat merugikan atau menguntungkan sehingga memungkinkan spesies tersebut mampu beradaptasi dengan lingkungannya.
3. Rekombinasi gen-gen dari dua spesies yang berperan sebagai parental dapat menghasilkan spesies dengan variasi baru dalam populasi.
4. Terjadinya aliran gen dan *Hanyutan genetik* di dalam populasi bisa mempengaruhi frekuensi alel dalam populasi.

Kesimpulannya, evolusi Neo-Darwinisme ini menjelaskan bahwa variasi genetik mempengaruhi evolusi dan seleksi alam adalah mekanisme yang mendorong untuk terjadinya evolusi.

b. *Integrated synthesis* (sintesis terpadu)

Teori evolusi *Integrated synthesis* (sintesis terpadu) merupakan perkembangan dari teori evolusi Neo Darwinisme dengan cara menghubungkan teori evolusi dengan temuan baru dari bidang ilmu biologi seperti biologi molekuler, epigenetika, evolusi perkembangan dan ekologi. Teori ini memberikan satu pemahaman baru yang lebih kompleks dengan menjelaskan bahwa evolusi bukan hanya dipengaruhi oleh seleksi alam dan mutasi, namun juga dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara gen, lingkungan dan perilaku organisme. Untuk mengetahui topik ini lebih jauh, coba kalian baca kembali pembahasan BAB Genetika pada topik Epigenetika. Bisakah kamu menemukan hubungan antara mekanisme epigenetika dengan perkembangan makhluk hidup?

Pada BAB sebelumnya, kita telah melihat bahwa epigenetika telah menunjukkan pewarisan sifat tidak hanya dipengaruhi oleh perubahan urutan basa nitrogen pada DNA melalui mutasi namun melalui modifikasi pada gen yang mempengaruhi ekspresinya tanpa mengubah urutan basa nitrogen DNA. Ekspresi yang muncul sebagai akibat dari epigenetik tersebut dianggap sebagai hasil perkembangan makhluk hidup dengan variasi baru.

Pada tahun 2003 seorang peneliti Randy Jirtle dan Robert Waterland melakukan pengamatan terkait pengaruh nutrisi terhadap tikus Agouti. Tikus Agouti memiliki gen Agouti yang mengendalikan warna bulu. Tikus dengan gen Agouti yang aktif memiliki warna bulu kuning dan rentan terhadap obesitas, diabetes dan kanker. Penelitian ini mengungkapkan bahwa lingkungan dalam hal nutrisi dapat memodifikasi ekspresi gen. Penelitian ini dilakukan dengan memberikan perlakuan terhadap tikus betina yang sedang hamil. Para peneliti memberi makan dengan diet yang kaya akan donor metil seperti asam folat, vit B12, kolin dan betain. Nutrisi-nutrisi tersebut diketahui dapat meningkatkan proses metilasi DNA. Setelah perlakuan tersebut, pada generasi berikutnya diperoleh keturunan dengan bulu gelap (coklat). Hal ini terjadi karena donor metil menyebabkan hipermetilasi pada gen Agouti dan menekan produksi bulu berwarna kuning.

Bagaimana menurut kalian? apakah variasi baru dari tikus agouti lebih menguntungkan? Berdasarkan hasil penelitian tersebut, selain terjadinya perubahan warna bulu tikus Agouti yang lahir dari tikus yang diberi perlakuan diet yang kaya donor metil memiliki risiko yang lebih rendah terhadap obesitas, diabetes dan kanker. Perubahan ekspresi gen yang terjadi pada tikus Agouti ini bisa diwariskan ke keturunan berikutnya dengan peluang yang kecil sebab modifikasi epigenetik seperti metilasi DNA bisa diubah oleh lingkungan yang dipengaruhi oleh perubahan pola makan, gaya hidup atau paparan lainnya di generasi selanjutnya.

Mari kita perhatikan ekspresi gen yang muncul pada keturunan tikus Agouti yang diberikan beberapa perlakuan hipermetilasi pada induk betina yang sedang hamil untuk memperlihatkan bahwa epigenetik dapat mengubah ekspresi gen.



▲ Gambar 3.33 Ekspresi gen Agouti pada tikus Agouti dengan beberapa perlakuan (a) ekspresi gen Agouti pada tikus tanpa perlakuan berwarna kuning (coklat <math>< 5\%</math>); (b) Perlakuan donor metil dengan ekspresi sedikit berbintik coklat kira-kira 5-50% coklat; (c) Perlakuan genistein dengan ekspresi berbintik 50% coklat; (d) perlakuan etanol dengan ekspresi gen sangat berbintik 50% - 95% coklat; (e) ekspresi gen agouti dengan perlakuan radiasi pengion menghasilkan pseudoagouti > 95% coklat

Berdasarkan penjabaran di atas, maka dapat disimpulkan bahwa epigenetik merupakan salah satu faktor yang dapat menyebabkan perkembangan variasi spesies.

Selamat, karena pada tahap ini kalian sudah menyelesaikan proses pembelajaran topik evolusi. Perlu kita sadari bersama bahwa ilmu biologi bersifat dinamis dan akan mengalami perkembangan terus menerus, demikian halnya dengan perkembangan teori evolusi tidak pernah berhenti seiring berjalan waktu.

AKTIVITAS 3.23

Debat Pro dan Kontra Evolusi

Tujuan:

1. Siswa dapat memahami konsep dasar evolusi.
2. Siswa dapat mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan argumentatif.
3. Siswa dapat menghargai perbedaan pendapat dan mendiskusikannya secara rasional dan sopan

Tahapan kegiatan:

1. Bagilah kelas menjadi 2 kelompok besar yang terdiri dari pro evolusi dan kontra evolusi sesuai dengan arahan guru
2. Lakukanlah kegiatan literasi untuk memperkuat pemahaman sesuai dengan pembagian kelompok yang sudah dibagikan.
 - a. Kelompok pro evolusi melakukan kegiatan literasi dengan menyoroti bukti ilmiah seperti fosil, seleksi alam dan genetik
 - b. Kelompok kontra evolusi melakukan kegiatan literasi dengan menyoroti keterbatasan bukti terjadinya evolusi dan teori alternatif lain yang menentang evolusi
3. Diskusikan setiap sumber informasi yang telah diperoleh bersama dengan teman kelompok yang telah ditentukan untuk membangun argumen dan pemahaman saat debat berlangsung.
4. Silahkan untuk akses beberapa sumber informasi berikut ini untuk membangun pemahaman dan argumen kalian:

No	Nama tokoh	Tahun	Temuan	Keterangan
1	Charles Darwin	1859	Teori seleksi alam pada bukunya <i>The origin of species</i>	www.gutenberg.org/ebooks/1228
2	Alfred Russel Wallace	1858	Teori Seleksi Alam, Independently conceived natural selection	www.nhm.ac.uk/discover/who-was-alfred-russel-wallace.html
3	Thomas Huxley	1860an	Pembela utama Darwin, dijuluki "Darwin's Bulldog"	www.britannica.com/biography/Thomas-Henry-Huxley
4	Stephen Jay Gould	1972	Teori Punctuated Equilibrium	www.britannica.com/biography/Stephen-Jay-Gould#ref246406

5	Jean-Baptiste Lamarck	1809	Teori Lamarckisme, pewarisan karakteristik yang diperoleh	www.britannica.com/biography/Jean-Baptiste-Lamarck
6	Francis Collins	2000an	Genetika Manusia, percaya pada harmoni sains dan agama	www.genome.gov/10001018/former-nhgri-director-francis-collins-biography
7	Michael Behe	1996	Desain Cerdas, konsep "Irreducible Complexity"	www.discovery.org/p/behe
8	Jonathan Wells	2000	Mengkritik bukti evolusi dari embrio, fosil, dan seleksi alam yang dianggap direkayasa.	https://iconsofevolution.com/the-problem-of-evidence/
9	Lynn Margulis	2011	Mengkritik peran seleksi alam, mengusulkan simbiosis sebagai faktor utama evolusi.	https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(11)01375-3
10	Günter Bechly	2016	Menyoroti ketidaksempurnaan catatan fosil dan keraguan akan makro-evolusi.	https://academic.oup.com/icb/article/43/1/157/604502

5. Lakukan kegiatan debat dengan alur debat berikut ini:
- Pada kegiatan ini guru akan berperan sebagai moderator yang memimpin jalannya debat
 - Kelompok pro mempresentasikan argumen yang telah disusun selama 5 menit
 - Kelompok kontra mempresentasikan argumen yang telah disusun selama 5 menit
 - Kedua kelompok diberi kesempatan secara bergantian untuk saling bertanya dan menanggapi argumen selama 10 menit
 - Masing-masing kelompok diberi waktu 3 menit untuk menyampaikan pernyataan penutup
 - Moderator menutup kegiatan debat dengan meringkas poin-poin utama dari kedua sisi

6. Guru memandu siswa untuk melakukan kegiatan refleksi bersama dengan panduan berikut:
 - a. Apa yang dipelajari dari pengalaman debat tersebut? karakter apa yang bertumbuh di dalam diri kamu? ceritakanlah
 - b. Bagaimanakah kalian dapat menggunakan keterampilan debat dalam kehidupan sehari-hari?

AYO BEREFLAKSI

Setelah kalian mempelajari Bab Evolusi ini, lakukan refleksi secara pribadi untuk mengukur tingkat pemahaman kalian. **Berikan tanda v untuk pernyataan-pernyataan berikut ini secara jujur.**

Pernyataan	Ya	Tidak
Saya mampu menjelaskan berbagai teori terkait asal-usul makhluk hidup.		
Saya mampu menganalisis mekanisme terjadinya evolusi disertai dengan bukti-bukti yang sesuai.		
Saya mampu menghubungkan prinsip adaptasi dan seleksi alam dengan mekanisme evolusi.		
Saya mampu menjelaskan prinsip <i>genetic drift</i> dan <i>gene flow</i> dengan mekanisme evolusi.		
Saya mampu membuktikan perubahan frekuensi gen dalam populasi menggunakan Hukum Hardy Weinberg.		

A. Pilihan Ganda

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat dari soal-soal berikut ini.

1. Evolusi merupakan perubahan pada suatu individu yang disebabkan oleh lingkungan dan bersifat diturunkan. Pendapat tersebut merupakan gagasan dari

A. De Lamarck	C. Lelly	E. August. W
B. C. Darwin	D. Antoni	

2. Populasi jerapah bersifat heterogen, ada yang berleher pendek dan ada yang berleher panjang. Dalam kompetisi mendapatkan makanan, jerapah yang berleher panjanglah yang lestari, sedangkan jerapah berleher pendek lenyap secara perlahan-lahan. Peristiwa tersebut mengingatkan teori evolusi yang dikemukakan oleh

A. Weismann	D. Lamarck
B. Gerabah	E. Gregor Johan Mendel
C. Charles Darwin	

3. Seorang sejarawan melakukan penelitian mengenai evolusi dan menemukan beberapa fakta yang terjadi di alam antara lain:
 - 1) terdapat homologi organ
 - 2) adanya variasi individu dalam satu keturunan
 - 3) ditemukannya hewan yang sama pada tempat yang berbeda
 - 4) semua spesies mempunyai potensi reproduksi yang tinggi
 Fakta yang diperoleh dan dapat dijadikan sebagai dasar teori evolusi adalah...

A. 1 dan 2	C. 2 dan 3	E. 3 dan 4
B. 1 dan 3	D. 2 dan 4	

4. Alat-alat yang tersisa pada organisme dapat dianggap sebagai petunjuk adanya evolusi. Pada manusia yang bukan merupakan alat sisa, yaitu ...

A. rambut pada dada	D. gigi taring yang runcing
B. tulang telapak tangan	E. otot-otot (penggerak) telinga
C. umbai cacing (usus buntu)	

5. Pada suatu daerah dengan 10.000 penduduk terdapat 4% warga albino maka perbandingan jumlah orang yang berkulit homozigot dan normal heterozigot berturut-turut sebesar ...

A. 6.400 dan 1.600	D. 3.200 dan 4.00
B. 6.400 dan 3.200	E. 1.600 dan 4.00
C. 3.200 dan 1.600	

6. Suatu populasi burung terpisah menjadi dua populasi. Setelah ribuan tahun kedua populasi burung tersebut bersatu kembali, tetapi gagal melakukan perkawinan. Berikut ini yang bukan penjelasan untuk hal tersebut adalah ...
 - A. masa kawin kedua populasi tersebut berubah
 - B. populasi asal berevolusi menjadi dua spesies berbeda
 - C. tidak terjadi isolasi gamet
 - D. dua populasi tersebut menjadi terisolasi secara geografis
 - E. telah terjadi isolasi gamet
7. Agust Weisman memotong ekor tikus jantan dan tikus betina, kemudian keduanya dikawinkan. Anak tikus keturunannya pun mengalami perlakuan yang sama sampai 50 generasi. Pada generasi yang ke-50, ternyata tetap dihasilkan keturunan tikus yang berekor. Eksperimen ini bertentangan dengan mekanisme evolusi yang dicetuskan oleh
 - A. Lamarck, seleksi alam
 - B. Darwin, seleksi alam
 - C. Lamarck, adaptasi
 - D. Darwin, adaptasi
 - E. Aristoteles, *generatio spontanea*
8. Pengujian insektisida terhadap populasi nyamuk dewasa sangat efektif dalam pemutusan siklus hidupnya. Jumlah populasi nyamuk akan menurun secara drastis. Namun setelah dua tahun kemudian, jumlah nyamuk kembali meningkat. Penyemprotan insektisida menjadi tidak efektif lagi. Berdasarkan teori seleksi alam Darwin hasil observasi tersebut dapat terjadi karena sebagian populasi nyamuk
 - A. terisolasi dari pengaruh insektisida
 - B. berproduksi sebelum insektisida digunakan
 - C. mampu beradaptasi terhadap insektisida dan mampu menghasilkan keturunan
 - D. menjadi resisten terhadap insektisida, tetapi tidak mampu menghasilkan keturunan
 - E. merupakan hasil migrasi dari populasi daerah lain
9. Pada suatu daerah terdapat penduduk bertangan kidal resesif (kk) sebesar 9%. Penduduk bertangan normal memiliki genotip KK dan Kk. Apabila populasi penduduk di desa tersebut sebesar 20.000 jiwa maka jumlah penduduk bertangan normal homozigot sebanyak

A. 1.600 orang	D. 6.800 orang
B. 2.400 orang	E. 9.800 orang
C. 3.600 orang	

10. Variasi yang terjadi dalam suatu keturunan terutama disebabkan oleh
- A. mutasi gen dan rekombinasi gen
 - B. mutasi gen dan diferensiasi sel
 - C. seleksi alam
 - D. rekombinasi gen
 - E. diferensiasi sel

B. Esay

Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. Di dalam suatu populasi tidak terjadi mutasi, tidak ada seleksi alam, dan tidak terjadi perkawinan secara acak. Berdasarkan hal tersebut, apakah berlaku hukum Hardy-Weinberg untuk populasi tersebut? Jelaskan!
2. Berikan penjelasan, apakah bencana alam dapat dijadikan sebagai salah satu penyebab mekanisme evolusi?
3. Tunjukkan perbedaan evolusi yang dicetuskan Lamarck dan evolusi yang disampaikan Darwin!
4. Jelaskan argumenmu terhadap argumen yang menyatakan bahwa simpanse dan manusia memiliki perbedaan molekuler sekitar 1% memperlihatkan hubungan kekerabatan yang sangat dekat!
5. Persentase laki-laki buta warna di Indonesia sebesar 7%. Anggota populasi laki-laki dengan wanita berjumlah sama dengan perbandingan 1 : 1. Berapakah perbandingan wanita buta warna dan wanita *carrier*?

PENGAYAAN

Untuk memperdalam pemahaman kalian terkait materi evolusi, silahkan ikuti tahapan berikut.

1. Baca jurnal yang terdapat pada *link* berikut.
<https://core.ac.uk/download/pdf/270148743.pdf>
2. Jawablah pertanyaan berikut.
 - a. Kesimpulan apa yang bisa diambil dari tulisan di atas?
 - b. Berikan pendapat pribadi kalian, apakah evolusi secara keseluruhan bertolak belakang dengan agama?
 - c. Bagaimana pandangan kalian secara pribadi terhadap teori evolusi yang dicetuskan oleh Charles Darwin?

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2022

Biologi
untuk SMA Kelas XII

Penulis Shilviani Dewi, dkk.

ISBN 978-602-427-958-5 (jil.2)

BAB 4



Inovasi Bioteknologi

Bagaimana perkembangan teknologi
mendasari kerja inovasi bioteknologi?



Tujuan Pembelajaran

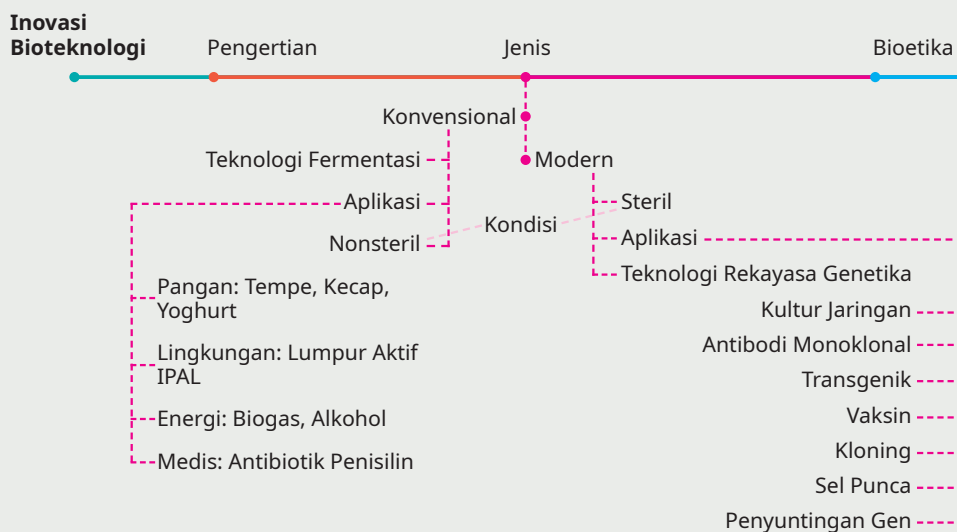
Pada bab ini, kalian akan diajak untuk dapat:

1. menafsirkan definisi bioteknologi.
2. mengidentifikasi peran bioteknologi dalam kehidupan manusia.
3. memberikan contoh peranan bioteknologi dalam pemecahan masalah.
4. menganalisis perbedaan bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern.
5. menganalisis cabang-cabang ilmu yang terlibat dalam bioteknologi.
6. memberikan saran inovasi pembuatan tempe dengan bahan nonkedelai dan pemanfaatan bioteknologi pada bidang lain.
7. memberi saran inovasi pembuatan tempe berprotein sempurna dan pemanfaatan bioteknologi pada bidang lain
8. mengevaluasi pemanfaatan bioteknologi konvensional dan modern.
9. mengevaluasi pemanfaatan bioteknologi modern melalui rekayasa genetika dan kultur jaringan
10. memberikan argumentasi pemanfaatan bioteknologi modern.
11. mengevaluasi pemanfaatan bioteknologi berdasarkan bioetika.

Kata Kunci

bioproses, bioetika, kultur jaringan, kloning, penyuntingan gen, rekayasa genetika, transgenik, *stem cell*.

Peta Materi



Makanan dan kesehatan merupakan komponen pendukung yang sangat esensial di masa pandemi Covid-19. Kandungan asam amino yang tinggi pada makanan dapat meningkatkan imunitas sehingga mampu bertahan dari serangan virus Covid-19.

Tempe merupakan salah satu makanan yang mengandung asam amino tinggi. Pada proses pembuatan tempe diterapkan rekayasa pengolahan kedelai oleh agen biologi berupa jamur *Rhizopus* sp.. Jamur tersebut mensekresikan enzim proteolitik sebagai aktivator fermentasi sehingga dihasilkan tempe. Pembuatan tempe merupakan salah satu praktek bioteknologi.

Proses pembuatan tempe semakin berkembang, salah satunya dari bahan yang digunakan. Awalnya, bahan untuk membuat tempe berupa kedelai lokal. Oleh karena kebutuhan kedelai lokal meningkat dan tidak bisa dipenuhi ketersediaannya, muncullah teknologi rekayasa genetika yang menghasilkan kedelai transgenik sebagai bahan pembuatan tempe. Kedelai transgenik merupakan salah satu contoh produk dari teknologi rekayasa genetika.

Jika kalian cermati, proses pembuatan tempe dengan bahan kedelai lokal termasuk contoh bioteknologi konvensional. Adapun proses rekayasa genetika yang menghasilkan kedelai transgenik termasuk contoh bioteknologi modern.

Selain mengonsumsi makanan yang mengandung asam amino tinggi, kegiatan vaksinasi juga digalakkan pada masa pandemi Covid-19. Vaksin yang digunakan antara lain Sinofax, Astrazeneca, dan Moderna. Proses pembuatan vaksin tersebut merupakan salah satu sumbangan nyata bioteknologi untuk menyelamatkan kehidupan.

Ayo Mengingat Kembali

Di kelas sebelumnya, kalian telah mempelajari pengelompokan makhluk hidup dan peranannya. Fungi merupakan salah satu makhluk hidup yang dipelajari pada bab tersebut. Apakah kalian masih ingat peran Fungi? Salah satu peran Fungi atau jamur, yaitu mampu mengubah kedelai menjadi bahan olahan berupa tempe yang mempunyai rasa dan kualitas gizi tinggi.

A. Definisi Bioteknologi

Dengan mengenal dan memanfaatkan produk bioteknologi, kalian akan lebih mudah memahami apakah itu bioteknologi. Ada banyak sekali produk bioteknologi dan sudah biasa kita manfaatkan dalam hidup sehari-hari. Apakah kalian dapat mengenali dan memanfaatkan produk-produk bioteknologi? Coba kalian lakukan aktivitas berikut ini!

AKTIVITAS 4.1

Ayo Mengidentifikasi Produk Bioteknologi

1. Buatlah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Lakukan observasi bahan makanan yang tersimpan di kulkas dan rak di dapur di masing-masing rumah kalian.
3. Identifikasi bahan makanan yang kalian temukan. Apakah kalian menemukan tempe, tape, kecap, yoghurt, dan mentega?
4. Perhatikan gambar berikut ini dengan cermat.



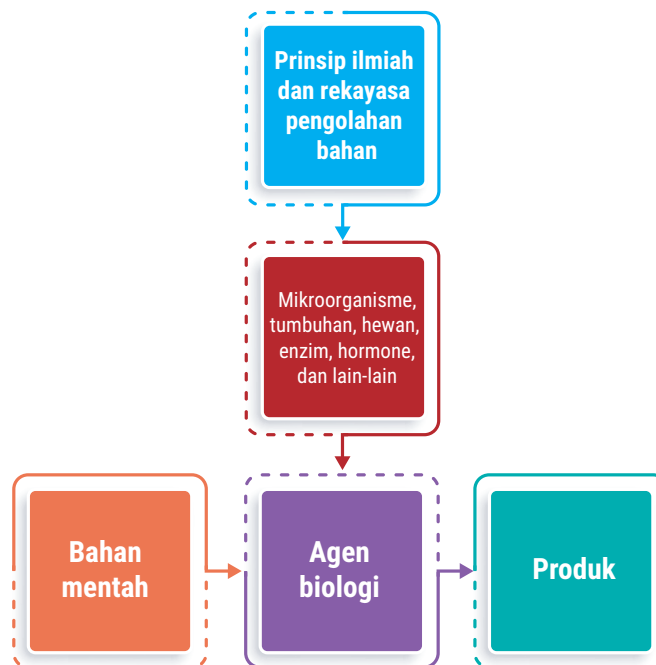
▲ Gambar 4.1 Macam-macam produk bioteknologi.

5. Dari pengamatan gambar, adakah permasalahan yang ditemukan? Apakah kalian dapat mengidentifikasi bahan dasar, agen biologi, pada setiap produk makanan? Diskusikan bersama anggota kelompok.
6. Tuliskan hasil diskusi kalian pada tabel berikut.

No.	Jenis Produk	Bahan Dasar	Agen Biologis
1.			
2.			
3.			
4.			

7. Lakukan analisis dari hasil diskusi yang telah dilakukan.
8. Buat laporan berdasarkan hasil observasi dan analisis kalian.
9. Presentasikan laporan kalian di depan kelas.

Pada Aktivitas 4.1, kalian menemukan ciri-ciri jenis produk bioteknologi, bahan, dan agen biologi. Temuan ini menunjukkan bahwa bioteknologi tersusun atas bahan dasar, agen biologi, dan produk. Berdasarkan hal tersebut dapat dirumuskan bahwa bioteknologi merupakan penerapan prinsip-prinsip ilmiah dan rekayasa pengolahan bahan oleh agen-agen biologi seperti mikroorganisme, tumbuhan, hewan, manusia, dan enzim untuk menghasilkan barang dan jasa untuk memenuhi kebutuhan manusia. Secara skematis bioteknologi dapat digambarkan sebagai berikut ini.



▲ Gambar 4.2 Skema Bioteknologi

Setelah memahami bioteknologi dan komponennya, kalian akan belajar sejarah perkembangan bioteknologi. Penemuan apa saja yang tercatat dalam sejarah bioteknologi? Untuk itu lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.2

Penemuan Bioteknologi

1. Buatlah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Lakukan pencarian studi literasi melalui media internet macam-macam penemuan bioteknologi dalam kurun waktu 2018 – 2022.
3. Isikan hasilnya pada tabel berikut ini!

No	Tahun	Penemuan
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

4. Presentasikan temuan kalian di depan kelas agar dapat dilengkapi oleh kelompok lainnya.

Pada aktivitas 4.2 di atas kalian telah mengenal penemuan bioteknologi dalam kurun 5 tahun terakhir. Tabel berikut ini menggambarkan penemuan-penemuan penting secara lengkap pada Bioteknologi.

Tabel 4.1 Sejarah Penemuan dalam Bioteknologi.

No	Tahun	Penemuan
1	6000 SM	Pemanfaatan mikroorganisme untuk membuat roti, alkohol, keju.
2	1857	Louis Pasteur menemukan teknik fermentasi mikroorganisme.
3	1917	Ereky memperkenalkan istilah bioteknologi.
4	1943	Penisilin diproduksi dalam skala industri.
5	1944	Avery, Macleod, McCarty mendemonstrasikan DNA/bahan gen.
6	1953	Watson dan Crick menemukan struktur DNA.
7	1970	Enzim restriksi endonuklease diisolasi.

8	1972	Khorana berhasil mensintesis secara kimiawi seluruh gen tRNA.
9	1973	Boyer dan Cohen memaparkan teknologi DNA rekombinan.
10	1975	Kohler dan Milstein menjabarkan produksi antibodi monoklonal.
11	1976	Perkembangan teknik-teknik untuk menentukan sekuen DNA.
12	1978	Genetech menghasilkan insulin manusia dalam <i>E. coli</i> .
13	1980	Mikroorganisme hasil rekayasa genetika dapat dipatenkan.
14	1982	Vaksin hewan DNA rekombinan disetujui di Eropa.
15	1983	Plasmid Ti dipakai untuk transformasi DNA rekombinan.
16	1988	Metode PCR dipublikasikan oleh Karry Mullis.
17	1997	Kloning sel inti pada mamalia dengan menggunakan sel domba.
18	1999	Kode genetik lengkap dari kromosom manusia telah diuraikan.
19	2000	Penyelesaian <i>Human Genome Project</i> .
20	2002	Padi transgenik beta karoten mulai diproduksi.
21	2003	Pemetaan genom manusia telah selesai dilakukan.
22	2004	Penggunaan antibodi monoklonal untuk terapi kanker.
23	2006	Penggunaan vaksin untuk papillomavirus di 82 negara.
24	2007	Penemuan teknik <i>stem cell</i> dari sel kulit manusia.
25	2009	Sekunesing genom virus H1N1.
26	2010	Penemuan genom artifisial dapat bereplikasi secara otonom.
27	2012	Draft genom tanaman gandum telah selesai dianalisis.
28	2013	Vaksin atau antibodi untuk HIV dan sel iPS untuk terapi kanker.
29	2014	Ditemukan darah sintetis.
30	2015	Ditemukan vaksin Ebola dan pengeditan genom dengan CRIPR.
31	2016	Ditemukan pankreas buatan (Minimet 670G).
32	2017	Pengeditan embrio manusia dengan CRIPR, kloning kuda.
33	2018	<i>Stem cell</i> menyembuhkan mata yang buta.
34	2019	Penemuan obat cystic fibrosis.
35	2020	Vaksin mRNA Pfizer dan Modena untuk Covid-19.
36	2021	Rekayasa DNA bayi untuk cegah HIV, <i>Internet of Behavior</i> (IoB).
37	2022	Ditemukan komputasi kuantum dan <i>Human Augmentation</i> .

Sumber: disarikan dari berbagai buku Bioteknologi.

B. Manfaat Bioteknologi

Produk bioteknologi yang mudah ditemukan dalam kehidupan sehari-hari di antaranya tempe, tape, dan kecap, serta *nata de coco*. Dengan memanfaatkan bioteknologi, air kelapa dapat diubah menjadi bahan pangan baru, yaitu *nata de coco*. Perhatikan gambar berikut.



▲ Gambar 4.3 Bahan, jenis bakteri dan produk *nata de coco*.

Berdasarkan contoh di atas, bioteknologi dapat dimanfaatkan untuk menciptakan bahan pangan baru. Tak hanya itu, bioteknologi juga bermanfaat di berbagai bidang kehidupan. Ayo berpetualang untuk menemukan manfaat bioteknologi pada berbagai bidang kehidupan.

AKTIVITAS 4.3

Pemanfaatan Bioteknologi di Berbagai Bidang Kehidupan

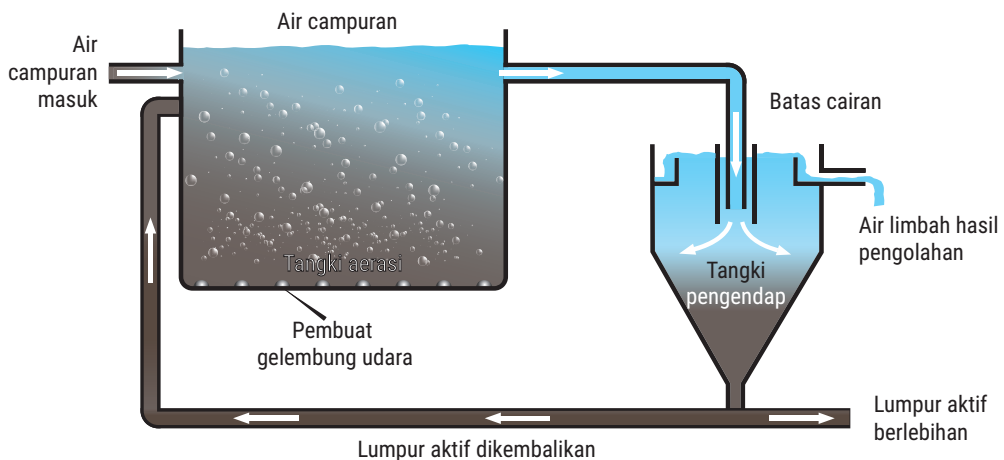
1. Bentuklah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Lakukan pengamatan secara virtual produk bioteknologi pada link berikut:
 - a. <https://www.youtube.com/watch?v=squxzYLMvMM>
 - b. <https://www.youtube.com/watch?v=qI8xHpcxfnA&t=276s>
 - c. <https://www.youtube.com/watch?v=yDvG2rZav5E&t=68s>
 - d. <https://www.youtube.com/watch?v=XidGCK9Vhus>
3. Tuliskan hasil pengamatan virtual kalian pada tabel berikut.

No.	Bidang Kehidupan	Permasalahan yang Dipecahkan	Bahan Dasar	Agen Bioteknologi	Hasil/ Produk
1.					
2.					
3.					
4.					

4. Berdasarkan hasil pengamatan, kelompokkan macam permasalahan kehidupan dan alternatif solusinya dengan bioteknologi. Diskusikan bersama anggota kelompok.
5. Buat laporan hasil diskusi kalian dan presentasikan di depan kelas.

Pada Aktivitas 4.3, kalian telah menemukan manfaat bioteknologi pada berbagai bidang kehidupan. Berikut manfaat bioteknologi sebagai pemecahan masalah di berbagai bidang kehidupan.

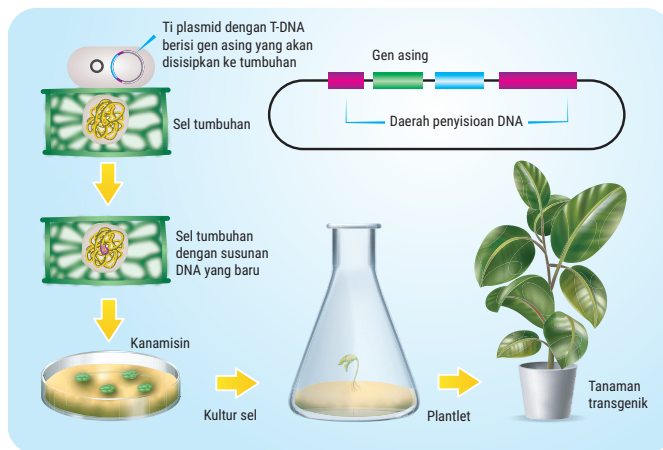
1. Masalah pencemaran lingkungan dapat diatasi melalui:
 - a. Teknologi bioremediasi, yaitu teknologi pengolahan air limbah dengan memanfaatkan bakteri aerob, yaitu *Bacillus* sp., dan bakteri anaerob *Acinetobacter* sp., *Staphylococcus* sp., *Cardiobacterium* sp., dan *Mycoplasma* sp.. Bioremediasi juga digunakan untuk mengolah polutan minyak di laut dengan memanfaatkan *Marinobacter*, *Oceanobacter*, *Alcanivorax*, *Thalassospira*, *Stappia*, *Bacillus*, *Novosphingobium*, *Pseudomonas*, *Sphingobium*, dan *Rhodobacter*.



▲ Gambar 4.4 Teknik Bioremediasi pada IPAL

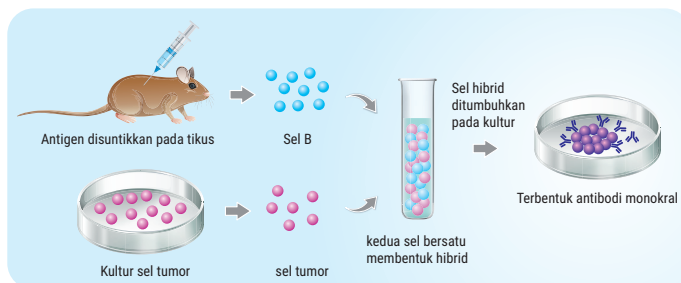
- b. Teknologi biodegradasi, yaitu teknologi untuk menghancurkan plastik dengan memanfaatkan bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas chlororaphis*, dan *Pseudomonas fluorescens* untuk plastik PE, PVC, dan PP serta bakteri *Ideonella sakaiensis* untuk plastik PET.

2. Masalah produktivitas pertanian dan perkebunan dapat diatasi melalui:
 - a. Teknologi kultur jaringan, yaitu teknologi untuk penyediaan bibit unggul dalam jumlah banyak dan seragam, serta memproduksi alkaloid dan metabolit sekunder lain yang di antaranya dapat digunakan sebagai bahan kosmetik dan obat.
 - b. Teknologi bioinsektisida, yaitu teknologi untuk pemberantasan hama tanaman yang ramah lingkungan, efektif, dan efisien.
 - c. Teknologi rekayasa genetika (trans genik), yaitu teknologi untuk menghasilkan tanaman transgenik di antaranya tanaman tahan hama, tahan pada tanah berkadar garam tinggi, maupun mampu hidup di tanah kering.



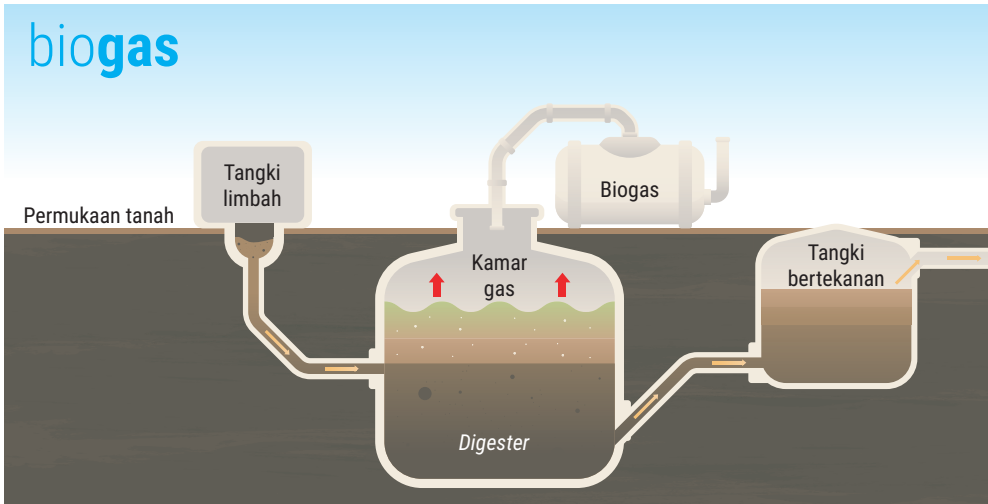
▲ Gambar 4.5 Teknologi tanaman transgenik

3. Masalah kesehatan dapat diatasi dengan:
 - a. Teknologi hibridoma, yaitu teknologi untuk memproduksi antibodi monoklonal yang berfungsi mendeteksi antigen yang sulit terdeteksi seperti pada sel kanker. Berikut ini gambar teknologi hibridoma.



▲ Gambar 4.6 Teknologi hibridoma pada antibodi monoklonal.

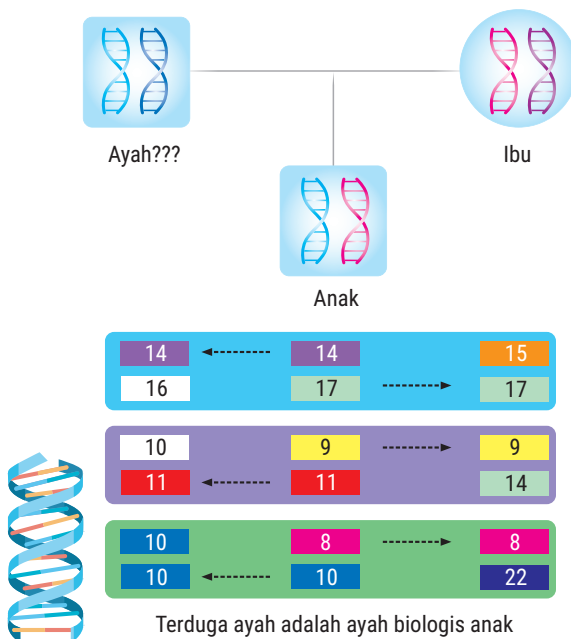
- b. Teknologi rekayasa genetika, yaitu teknologi untuk memproduksi:
 - 1) Interferon, jenis protein yang membantu mengatur kerja sistem kekebalan tubuh. Interferon berperan melawan infeksi virus, pengaktifan sel-sel imun, dan menghambat pertumbuhan sel tumor.
 - 2) Hormon insulin dari *E. coli* yang disisipi gen insulin untuk menyembuhkan penderita diabetes melitus.
 - 3) Antibiotik untuk membunuh patogen berupa bakteri dan jamur.
 - c. Teknologi *stem cell*, yaitu teknologi untuk penyembuhan penderita stroke atau penyakit lain yang disebabkan kerusakan pada jaringan tubuh.
4. Masalah reproduksi dan pertumbuhan ternak dapat diatasi dengan:
- a. Teknologi inseminasi buatan (IB), yaitu teknologi yang memanfaatkan sifat unggul hewan secara maksimal dengan cara mengambil dan memasukkan sperma ke saluran kelamin betina sehingga dihasilkan anakan yang bersifat unggul.
 - b. Teknologi transfer embrio (TE), yaitu teknologi pemindahan embrio yang bersifat unggul pada induk yang tidak harus unggul sehingga dihasilkan anakan yang bersifat unggul.
 - c. Teknologi kriopreservasi embrio (KE), yaitu teknologi penyimpanan embrio dalam bentuk beku yang bertujuan untuk menyimpan, pemeliharaan, menjamin, dan mempertahankan kelangsungan hidup sel.
 - d. Teknologi transplantasi nukleus (kloning), yaitu teknologi untuk menghasilkan individu duplikasi (identik dengan induknya).
 - e. Teknologi rekayasa genetika, yaitu teknologi untuk menghasilkan hormon pertumbuhan seperti *recombinant Bovine Somatotropic* (rBST).
5. Masalah energi yang ramah lingkungan dapat diatasi dengan teknologi bioproses fermentasi untuk memproduksi bioetanol, biodiesel, dan biogas.



▲ Gambar 4.7 Produksi biogas.

6. Masalah inovasi jenis tanaman baru dan penganekaragaman bahan minuman dan makanan olahan dapat diatasi melalui:
 - a. Teknologi bioproses fermentasi, yang menghasilkan tempe, kecap, mentega, keju, tape, yoghurt, dan anggur.
 - b. Teknologi rekayasa genetika yang di antaranya menghasilkan *golden rice* dan jagung serta kapas transgenik.

7. Masalah identifikasi (*post mortem*) korban kecelakaan dan bencana alam, maupun penentuan ayah biologi seorang anak diatasi dengan teknologi pencocokan DNA. Teknologi ini digunakan untuk mengidentifikasi dan mencocokkan DNA mitokondria dari korban dengan anggota keluarganya. Perhatikan gambar berikut



Gambar 4.8 ▲ Identifikasi kecocokan DNA

C. Jenis Bioteknologi

Kalian telah mengetahui definisi dan manfaat bioteknologi dalam kehidupan manusia. Kini saatnya, kalian belajar tentang jenis-jenis bioteknologi. Ayo kembangkan cara berpikir kritis kalian dengan melakukan aktivitas berikut.

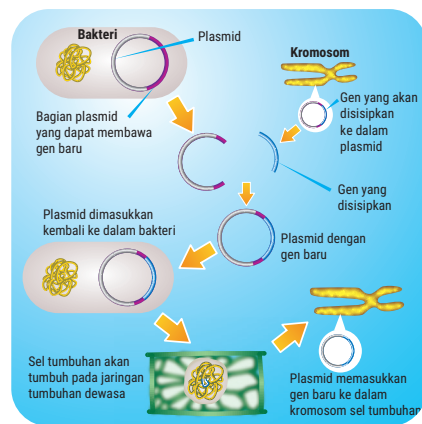
AKTIVITAS 4.4

Ayo Membandingkan Proses Pembuatan Tempe dan Rekayasa Genetika pada Tanaman Transgenik

1. Bentuklah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Amati dan bandingkan bagan tahapan proses pembuatan tempe dan rekayasa genetika pada tanaman transgenik berikut!



▲ Gambar 4.9 Proses pembuatan tempe.



▲ Gambar 4.10 Teknologi transgenik.

3. Perbedaan apa saja yang kalian temukan? Tuliskan perbedaan yang ditemukan pada tabel berikut.

No	Variabel Pembeda	Tahapan Pembuatan Tempe	Tahapan Pembuatan Tanaman Transgenik
1			
2			
3			

4. Diskusikan macam perbedaan yang kalian temukan antara proses pembuatan tempe dan rekayasa genetika pada tanaman transgenik.
5. Buatlah laporan hasil perbandingan dan diskusi kalian. Kemudian, presentasikan di depan kelas.

Pada Aktivitas 4.4, kalian telah menemukan perbedaan teknologi pembuatan tempe (contoh produk bioteknologi konvensional) dan teknologi tanaman kedelai transgenik (contoh produk bioteknologi modern). Perbedaan bioteknologi konvensional dan modern tidak hanya pada jenis teknologi yang diterapkan saja. Namun, masih ada beberapa variabel pembeda lainnya. Perhatikan tabel berikut ini.

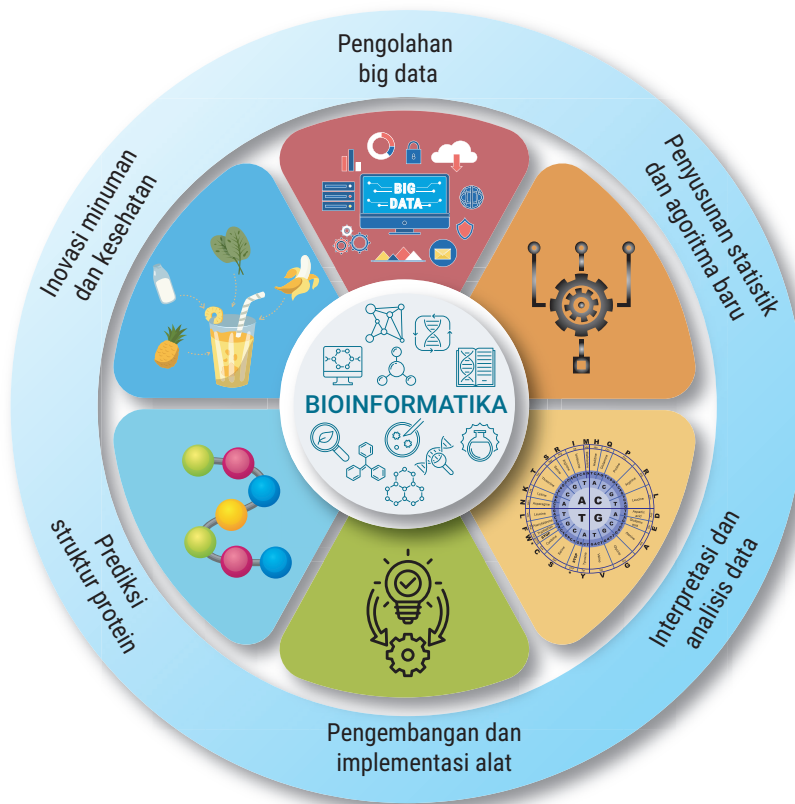
Tabel 4.2 Perbedaan Bioteknologi Konvensional dan Modern.

No.	Variabel Pembeda	Bioteknologi	
		Konvensional	Modern
1.	Waktu	Mulai 6000 SM	1953
2.	Produk/temuan penanda	Minuman fermentasi: anggur, bir, dan sake	Penemuan struktur DNA oleh Watson & Crick
3.	Kondisi proses	Nonsteril	Steril
4.	Teknologi	Bioproses (fermentasi)	Rekayasa genetika (transgenik dan kloning)
5.	Sifat organisme / agen biologi	Asli atau alami	Berubah atau termodifikasi
6.	Produk	Tempe, tape, yoghurt, <i>nata de coco</i>	Tanaman dan hewan transgenik, interferon, antibodi monoklonal, serta hormon insulin sintesis

Sumber: Deden Indra Dinata, 2013

Dalam dimensi lain, bioteknologi dibagi dalam kelompok bidang yang diasosiasikan dengan warna. Bioteknologi merah untuk bidang kesehatan. Bioteknologi hijau untuk bidang pertanian dan peternakan. Bioteknologi putih untuk bidang industri. Bioteknologi biru untuk bidang akuatik mencakup perairan dan kelautan.

Perkembangan *artificial intelligence* (AI) di tahun 1970 mampu menjangkau aplikasi komputasi pada teknik rekayasa genetika sehingga muncul jenis bioteknologi baru, yaitu bioinformatika. Bioinformatika merupakan bidang multidisiplin yang mengkaji masalah biologi menggunakan komputasi (komputer). Bioinformatika memiliki peran dalam genomik struktural (studi tentang penyusunan dan urutan gen), genomik fungsional (studi tentang peranan gen dan protein dalam biokimia), dan proteomik (studi molekuler pada keseluruhan protein yang dihasilkan dari ekspresi gen di dalam sel, terutama struktur dan fungsinya) sehingga mampu memproduksi kebutuhan penting yang bermanfaat bagi manusia. Secara skematis bioinformatika dapat digambarkan sebagai berikut.



▲ Gambar 4.11 Teknologi bioinformatika.

Untuk lebih mengenal bioinformatika dalam membantu memecahkan permasalahan di kehidupan manusia, lakukan aktivitas literasi berikut!

AKTIVITAS 4.5

Bioinformatika dalam Bioteknologi

Apakah kalian tahu Indonesia kaya akan keanekaragaman hayati? Jika dibandingkan dengan negara lain di dunia, keanekaragaman hayati Indonesia berada pada peringkat berapa? Apakah Indonesia sudah memiliki bank data yang lengkap dari keanekaragaman hayati? Apakah manfaat bank data tersebut?

Indonesia termasuk tiga negara terkaya dalam keanekaragaman hayati di dunia. Namun sampai tahun 2022, belum semua spesies makhluk

hidup di Indonesia teridentifikasi ciri-cirinya menjadi suatu peta bank data yang lengkap. Bank data keanekaragaman hayati dapat digunakan sebagai pedoman dalam mengelola dan melestarikannya. Untuk mengetahui bagaimana bank data keanekaragaman hayati di Indonesia, kalian dapat membuka *link* berikut.

<http://lipi.go.id/berita/indonesia-butuh-basis-data-keanekaragaman-hayati-5241>

Selain permasalahan keanekaragaman hayati, apakah kalian mengetahui penyakit mematikan yang belum ditemukan obatnya? Apakah ada penemuan baru untuk menyembuhkannya? Apakah langkah penyembuhan penyakit mematikan dapat dilakukan dengan terapi gen?

Contoh penyakit mematikan yang disebabkan infeksi virus menular di antaranya flu burung (H_5N_1), HIV(AIDS), dan Covid-19, serta kanker. Selama ini, penyakit tersebut belum ditemukan obat yang tepat. Obat-obatan yang diberikan hanya untuk menghilangkan atau mengurangi dampak infeksi dan menghambat kecepatan infeksi virusnya. Penyakit-penyakit ini merusak struktur dan fungsi gen sehingga tidak bisa disembuhkan dengan obat-obatan. Penemuan teknologi terapi gen dan teknologi sel punca memberi harapan untuk penyembuhan. Untuk mengetahui lebih jauh mengenai terapi gen dan sel punca, kalian dapat membuka *link* berikut!

<https://www.sehatq.com/tindakan-medis/terapi-gen>

Metode penyembuhan dengan terapi gen dan pemetaan keanekaragaman hayati membutuhkan bank data gen. Untuk itu, dibutuhkan teknologi yang dapat merekam urutan gen dan analisis ekspresi gen sehingga dapat dijadikan instrumen dalam bioteknologi. Salah satu instrumen yang dimaksud adalah bioinformatika.

Bioinformatika mampu mengelola informasi biologis, penyejajaran sekuens (*sequence alignment*), prediksi struktur untuk meramalkan bentuk struktur protein maupun struktur sekunder RNA, analisis filogenetik, dan analisis ekspresi gen.

Aplikasi bioinformatika mampu memunculkan teknologi rekayasa genetika, kultur jaringan, DNA rekombinan, pengembangbiakan *stem cell*, dan kloning. Teknologi-teknologi ini mampu menyembuhkan penyakit-penyakit

genetik maupun kronis (kanker dan HIV-AIDS). Penerapan teknologi *stem cell* terbukti menyembuhkan penderita stroke dan penyakit yang mengakibatkan kehilangan atau kerusakan pada jaringan tubuh.

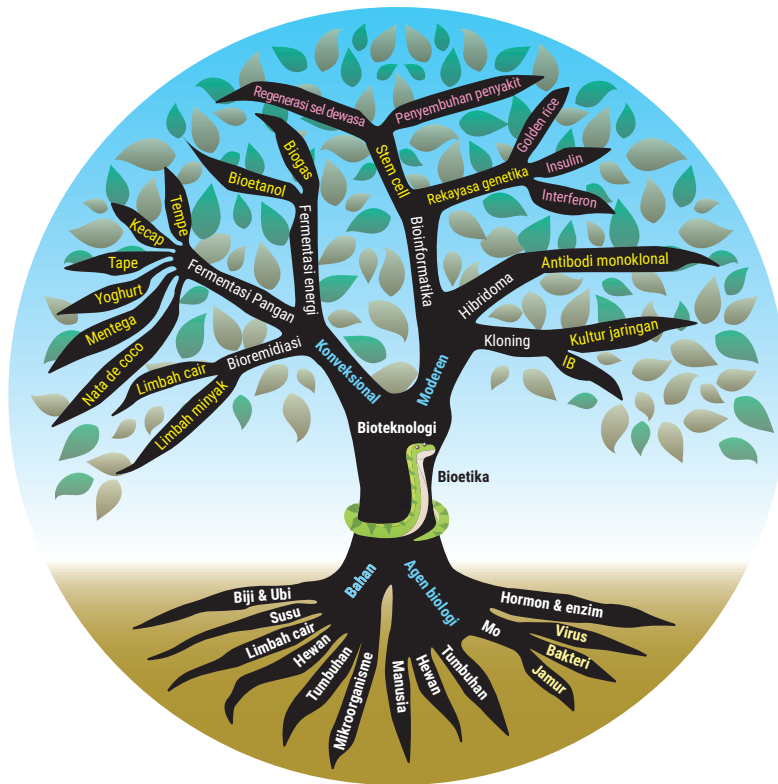
Kalian telah mengetahui definisi dan jenis-jenis bioteknologi baik berdasarkan macam teknologi yang diterapkan dan bidang yang diilustrasikan dengan warna. Coba tunjukkan kreativitas kalian melalui aktivitas berikut!

AKTIVITAS 4.6

Pohon Bioteknologi

1. Bentuklah kelompok yang beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Buatlah gambar pohon bioteknologi dengan bagian sebagai berikut.
 - a. Akar utama terdiri atas 2 struktur dasar pembangun bioteknologi, yaitu bahan dan agen biologi.
 - b. Cabang akar utama 1 atau akar lateral (ke samping) untuk bahan berupa macam jenis bahan.
 - c. Cabang akar utama 2 untuk agen biologi berupa jenis-jenis agen biologi.
 - d. Bagian batang utama berupa bioteknologi.
 - e. Bagian cabang batang utama berupa jenis bioteknologi, yaitu bioteknologi konvensional dan modern.
 - f. Bagian ranting terdiri atas macam teknologi yang digunakan.
 - g. Bagian daun berupa contoh produk.
3. Diskusikan permasalahan yang muncul dalam pembuatan rancangan model pohon bioteknologi dan temukan solusinya.
4. Cermati bersama gambar hasil kerja kalian, terutama kelengkapan dan ketepatan alur gambarnya.
5. Buatlah video presentasi gambar pohon bioteknologi dalam bentuk PowerPoint dengan ponsel atau laptop kalian dengan durasi waktu 2 – 3 menit.
6. Unggah video presentasi kalian di media sosial, seperti Facebook, Instagram, atau Youtube.
7. Kirimkan *link* dan *capture* video presentasi yang kalian unggah pada guru pengampu.

Setelah melakukan Aktivitas 4.6, kalian semakin memahami bangunan bioteknologi sebagai ilmu. Salah satu model pohon bioteknologi dapat digambarkan sebagai berikut!

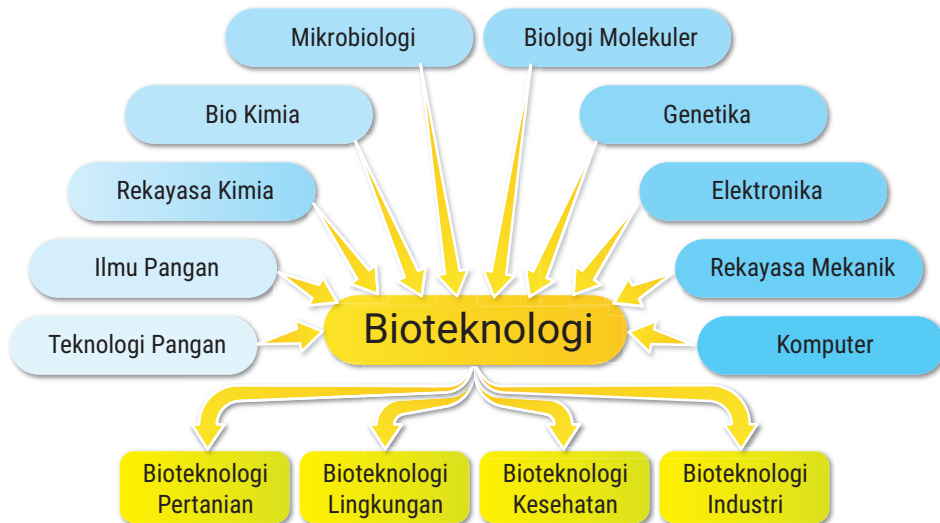


▲ Gambar 4.12 Pohon bioteknologi

Gambar model pohon bioteknologi di atas, menggambarkan secara lengkap dari macam bahan dasar, macam agen biologi yang berperan, jenis bioteknologi, macam teknologi yang diterapkan, dan macam produk-produknya. Gambar tersebut dapat dijadikan ringkasan pemahaman bioteknologi.

● D. Cabang Ilmu yang Berperan dalam Bioteknologi

Bioteknologi tidak mungkin berdiri sendiri, hal ini diindikasikan dengan macam-macam agen biologi dan teknologi yang terlibat. Cabang ilmu yang membangun bioteknologi antara lain biokimia, genetika, biologi molekuler, mikrobiologi, enzimologi, ilmu pangan, rekayasa teknologi pangan, dan rekayasa biokimia. Adapun ilmu nonbiologi yang berperan dalam bioteknologi, yaitu kimia, fisika, dan ilmu komputer.



▲ Gambar 4.13 Cabang ilmu yang membangun bioteknologi.

Untuk mendalami pemahaman aplikasi macam cabang ilmu yang membangun bioteknologi secara lebih khusus, lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.7

Menganalisis Produk Bioteknologi dengan Cabang Ilmu pendukungnya

1. Bentuklah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Pilih satu produk penemuan bioteknologi yang kalian kenal.
3. Lakukan analisis terkait dengan bahan, macam agen biologi, dan aktivitas agen biologi dalam proses pembentukan produk tersebut.
4. Kaitkan setiap poin hasil analisis kalian dengan cabang ilmu pendukungnya.
5. Diskusikan hasil analisis kalian dan tuliskan hasilnya pada tabel berikut.

Temuan Bioteknologi	Hasil Analisis			Macam Ilmu/Cabang
	Bahan Baku	Agen Biologi	Aktivitas Agen Biologi	

6. Tampilkan hasil analisis kalian dalam bentuk pohon kontribusi cabang ilmu pada bioteknologi. Di mana akar berupa bioteknologi,

batang utamanya berupa produk bioteknologi, cabang batangnya berupa temuan analisis dari bahan baku, temuan analisis dari agen biologi, temuan analisis dari aktivitas agen biologi. Adapun ranting dan daunnya berupa masing-masing cabang ilmu dari bahan baku, agen biologi, dan aktivitas agen biologi.

7. Buatlah video presentasi pohon kontribusi cabang ilmu biologi pada bioteknologi dalam bentuk PowerPoint.
8. Unggah video presentasi kalian di media sosial, seperti Facebook, Instagram, atau Youtube.
9. Kirimkan *link* dan *capture* video presentasi ke guru pengajar.

Pada Aktivitas 4.7, kalian telah memahami bangunan ilmu-ilmu yang berkontribusi dalam bioteknologi. Salah satu model pohon kontribusi cabang ilmu pada bioteknologi dapat digambarkan sebagai berikut.



▲ Gambar 4.14 Pohon kontribusi cabang ilmu bioteknologi pada kasus bioteknologi tempe.

Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa bahan utama tempe berupa kedelai dipelajari dalam botani. Agen biologi jamur *Rhizopus* sp. dipelajari pada

mikologi. Enzim untuk fermentasi dipelajari pada enzimologi. Bakteri asam laktat dan asetat pada perendaman kedelai dipelajari pada bakteriologi. Gambar model pohon kontribusi cabang ilmu pada bioteknologi di atas dapat dijadikan ringkasan pemahaman kontribusi cabang ilmu pada bioteknologi.

● E. Aplikasi Bioteknologi Konvensional

Aplikasi bioteknologi konvensional banyak diminati masyarakat, salah satunya tempe. Tempe dihasilkan melalui proses fermentasi oleh jamur *Rhizopus* sp. pada bahan kedelai. Apakah bahan nonkedelai dapat dijadikan bahan dalam pembuatan tempe?

Selama ini, kedelai menjadi bahan utama pembuatan tempe. Jika terjadi kelangkaan kedelai atau melonjaknya harga kedelai, apakah bahan utama tempe tersebut dapat diganti dengan biji-bijian lainnya? Coba kalian lakukan aktivitas 4.8 berikut.

AKTIVITAS 4.8.

Menemukan Bahan Lain untuk Pembuatan Tempe

1. Bentuklah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Baca dengan cermat jurnal di *link* berikut!
<https://uisi.ac.id/assets/upload/media/7fe6c2beb8317acc05b9a305e90769dc.pdf>
3. Permasalahan apakah yang kalian temukan?
 - a. Apakah kalian menemukan bahan lain untuk pembuatan tempe?
 - b. Apakah ada perbedaan protein kedelai dan nonkedelai untuk bahan untuk membuat tempe?
4. Pilih 4 bahan yang terdiri 1 bahan kedelai dan 3 bahan nonkedelai yang mudah ditemukan.
5. Rancang langkah pembuatan tempe dengan pengulangan 3 kali pada setiap jenis bahan. Untuk membuat tempe, kalian dapat membaca dari *link* berikut.
<https://www.masakapahariini.com/resep/cara-membuat-tempe-sendiri/>
6. Rancang langkah pengamatan kualitas tempe, terkait dengan variabel lama waktu fermentasi, tekstur, lama simpan, dan rasa tempe dengan membaca di *link* berikut.
<https://ejournal.unib.ac.id/index.php/agroindustri/article/download/7280/3905>
7. Tulis hasil pengamatan kalian pada tabel berikut!

- a. Tabel 1. Lama waktu fermentasi tempe.

Perlakuan	A (kedelai)	B(.....)	C(.....)	D (.....)
1				
2				
3				
Rerata				

- b. Tabel 2. Tekstur tempe.

Perlakuan	A (kedelai)	B(.....)	C(.....)	D (.....)
1				
2				
3				
Rerata				

- c. Tabel 3. Rasa tempe.

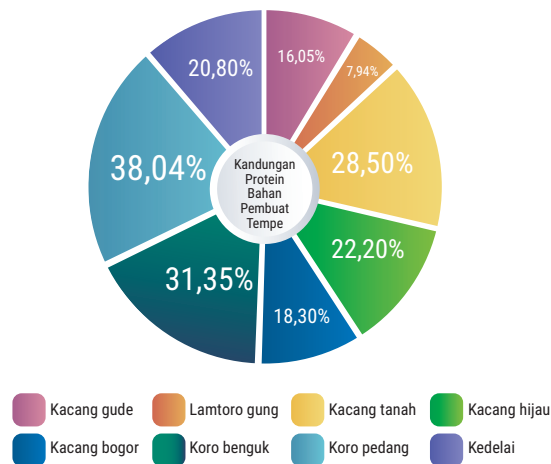
Perlakuan	A (kedelai)	B(.....)	C(.....)	D (.....)
1				
2				
3				
Rerata				

- d. Tabel 4. Lama simpan tempe.

Perlakuan	A (kedelai)	B(.....)	C(.....)	D (.....)
1				
2				
3				
Rerata				

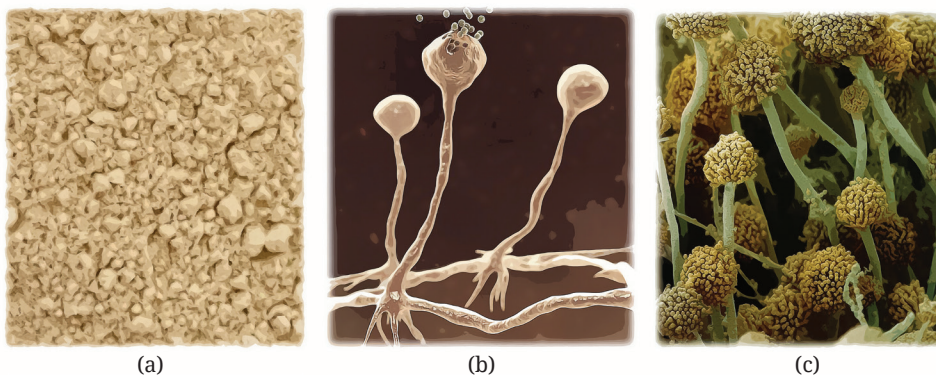
8. Jawab pertanyaan-pertanyaan berikut ini.
- Bagaimana hubungan antara jenis bahan dengan lama waktu fermentasi tempe?
 - Bagaimana hubungan antara jenis bahan dengan tekstur tempe?
 - Bagaimana hubungan antara jenis bahan dengan rasa tempe?
 - Bagaimana hubungan antara jenis bahan dengan lama simpan tempe?
 - Apakah semua jenis biji yang digunakan untuk membuat tempe dapat menghasilkan tempe yang baik?
9. Presentasikan hasil penelitian kalian di depan kelas.

Berdasarkan Aktivitas 4.8, kalian telah membuktikan bahwa bahan nonkedelai dapat digunakan untuk membuat tempe. Bahan nonkedelai untuk pembuatan tempe, antara lain kacang gude, lamtoro gung, biji saga, kedelai hitam, kacang arab, kacang merah, kacang hijau, kacang bogor, koro benguk, koro pedang, biji nangka, dan jagung. Adapun kandungan proteinnya terlihat pada grafik berikut.



▲ Gambar 4.15 Grafik kandungan protein pada berbagai jenis biji.
 Sumber: Tabel Komposisi Zat Gizi Pangan Indonesia Persatuan Ahli Gizi Indonesia (2009).

Bioteknologi tempe membutuhkan agen biologi untuk fermentasi, yaitu *Rhizopus oryzae* dan *Rhizopus oligosporus*. Agen biologi ini berbentuk inokulum berupa *R. oryzae* atau *R. oligosporus* yang dicampur kedelai dan ditebarkan pada daun jati atau daun waru yang telah dilayukan dan disebut usar atau laru tempe.



▲ Gambar 4.16 (a) Usar/laru tempe (b) *Rhizopus oryzae* (c) *Rhizopus oligosporus*.

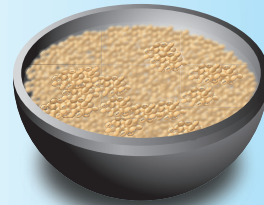
Selain usar, agen biologi lain berupa bakteri laktat dan asetat bekerja secara fermentatif saat perendaman kedelai untuk menciptakan kondisi asam sampai pH 2.5 - 3.5.

Pemberian usar mengawali fermentasi pada kedelai ditandai dengan pertumbuhan hifa yang mengikat biji kedelai. Waktu untuk fermentasi berkisar 48 – 72 jam dengan kisaran suhu 35°C - 40°C. Fermentasi dilakukan oleh enzim protease, lipase, amilase, dan fitase yang ada pada biji kedelai. Untuk mengetahui bahan yang dipecah oleh enzim tersebut dapat dilihat pada infografis berikut.

Fermentasi I

Bakteri asetat dan bakteri laktat
pH: 2,5 – 3,5

24 – 36 jam

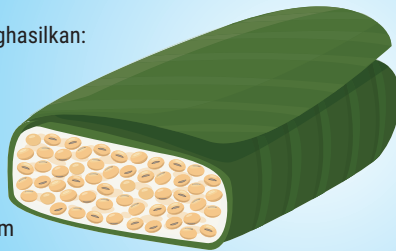


▲ Gambar 4.17 Ringkasan fermentasi pada saat perendaman.

Ringkasan Aktivitas Agen Biologi pada Tempe

Hifa jamur menghasilkan:
Enzim protease
Enzim amilase
Enzim Lipase
Enzim Fitase

Suhu 35–40°C
Waktu 48–72 jam



Protease:
Protein menjadi asam amino
Lipase:
Lemak menjadi asam lemak dan gliserol
Amilase:
Amilum menjadi maltose
Fitase:
Asam fitat menjadi inositol, K, P

▲ Gambar 4.18 Ringkasan proses fermentasi oleh enzim

Setelah memahami bioproses pembuatan tempe, kalian dapat membuat inovasi melalui aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.9.

Tempe Berprotein Sempurna

1. Baca hasil observasi berikut!
Studi Status Gizi Indonesia (SSGI) 2021 menyebutkan bahwa kasus *stunting* di Indonesia mencapai 24,4%. *Stunting* merupakan permasalahan gizi kronis yang disebabkan kurangnya asupan gizi terutama protein dalam jangka waktu yang lama pada anak balita. Anjuran kecukupan protein sebesar 1 gram/kg berat badan (BB) perhari. Standar asupan protein terdiri 0,5 gram/kg BB protein hewani dan 0,5 gram/kg BB protein nabati. Kekurangan asupan

protein menghambat pertumbuhan sehingga menyebabkan *stunting*.

Para ibu di masyarakat dalam menyiapkan menu asupan protein balita biasanya hanya dengan tempe saja. Pola makan seperti ini menjadi penyebab kurang terpenuhinya kebutuhan protein hewani.

2. Diskusikan bersama kelompok mengenai hal-hal berikut untuk menemukan solusi inovatif.
 - a. Bagaimana memperkaya kandungan protein pada tempe sehingga mengandung protein hewani?
 - b. Bahan apa saja yang dapat digunakan untuk memperkaya kandungan protein hewani tempe?
 - c. Alasan penggunaan bahan pengaya protein hewani pada tempe dengan kemungkinan optimalisasi fermentasi oleh *Rhizopus* sp. pada proses pembuatan tempe.
3. Pilih satu alternatif yang dapat ditambahkan pada pembuatan tempe (misalnya, tepung putih telur dari telur pecah). Kemudian, rancang dan lakukan langkah-langkah dalam:
 - a. penyiapan bahan dan kadar perlakuan
 - b. penyiapan subjek penelitian
 - c. cara memperoleh data:
 - 1) uji fisik tepung tempe (warna, tekstur, dan rasa)
 - 2) cara uji kadar protein tempe (metode Kjeldahl)
 - 3) pengujian daya tahan tempe
4. Buat video presentasi proses dan hasil penelitian dengan durasi 5 – 6 menit. Kemudian, unggah di media sosial dan kirimkan *link* presentasi kalian ke guru pengajar.

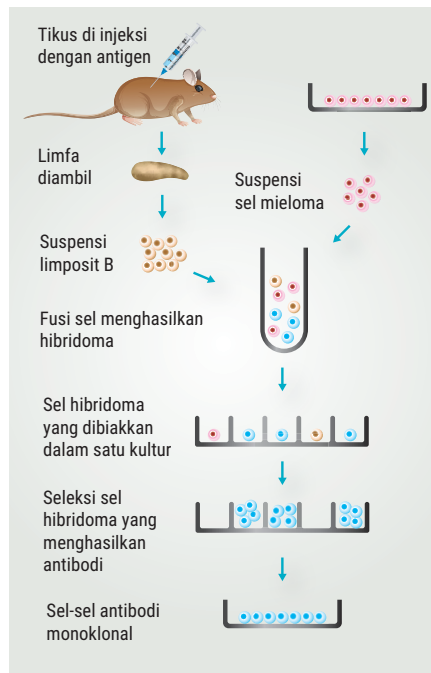
F. Aplikasi Bioteknologi Modern

Hidup di abad 21 yang bertumpu pada budaya teknologi informasi dan kecerdasan buatan, semakin mendorong lahirnya produk-produk baru pada bioteknologi modern. Produk bioteknologi modern apakah yang kalian kenali? Untuk mengenal lebih jauh produk-produk bioteknologi modern, lakukan aktivitas berikut!

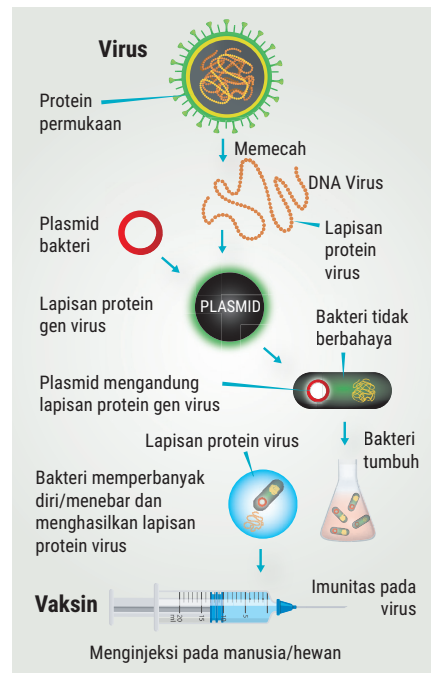
AKTIVITAS 4.10

Mengenal Produk Bioteknologi Modern

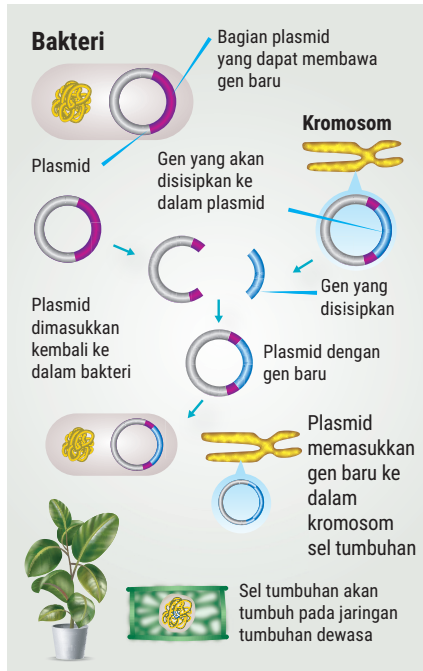
1. Bentuklah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Amati infografis di bawah ini. Kemudian, temukan macam bidang dan jenis produk bioteknologi modern berikut.



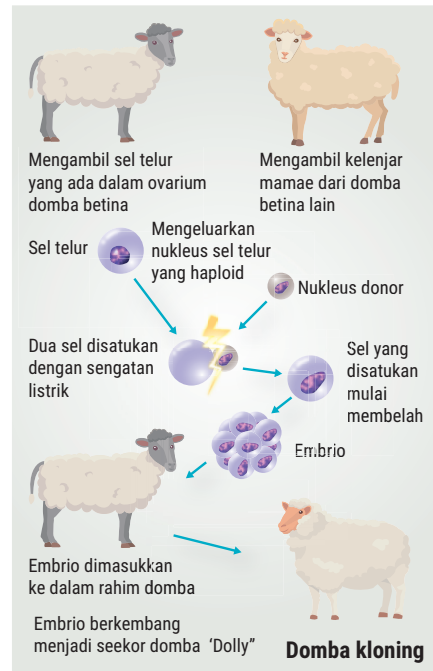
▲ Gambar 4.19 Tahapan pembuatan antibodi monoklonal.



▲ Gambar 4.20 Tahapan pembuatan vaksin.



▲ Gambar 4.21. Tahapan pembuatan tanaman transgenik.



▲ Gambar 4.22 Kloning domba Dolly.

3. Tulis hasil pengamatan kalian pada tabel berikut.

No	Jenis Produk	Teknologi	Bidang Kehidupan
1			
2			
3			
4			

4. Diskusikan pertanyaan berikut bersama kelompok kalian.

- Ada berapa jenis produk bioteknologi modern dan berapa bidang kehidupan yang memanfaatkan produknya?
- Macam teknologi apa sajakah yang digunakan untuk menghasilkan produk bioteknologi modern?
- Berikan saran kalian untuk pengembangan produk dan bidang manfaat dari produk bioteknologi modern!

5. Tulis jawaban hasil diskusi kalian dalam bentuk *PowerPoint* dan presentasikan di depan kelas!

Pada Aktivitas 4.10, kalian telah belajar menemukan dan menuliskan saran untuk pengembangan produk dan bidang manfaat dari produk bioteknologi. Selanjutnya, kalian akan mempelajari berbagai contoh penerapan bioteknologi modern dalam kehidupan manusia.

1. Kultur Jaringan

Pernahkah kalian mendatangi kebun bibit tanaman dan menjumpai ribuan bibit tanaman dengan bentuk dan ukuran seragam? Perhatikan gambar di bawah ini.



▲ Gambar 4.23 Bibit Kelapa dan Jati Hasil Kultur Jaringan.

Apakah kalian berpikir, bagaimana cara menghasilkannya? Ternyata, bibit tersebut dihasilkan melalui teknologi kultur jaringan. Teknologi kultur jaringan merupakan teknik yang salah satunya dapat digunakan untuk penyediaan bibit unggul dalam jumlah banyak dan dalam waktu yang singkat. Kultur jaringan juga dapat dimanfaatkan untuk perbaikan sifat dan menghasilkan metabolit sekunder sebagai bahan obat dan kosmetik. Apakah prinsip pada kultur jaringan? Untuk menemukan jawabnya mari lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.11

Mengenal Teknologi Kultur Jaringan

1. Bentuklah kelompok beranggotakan 3 – 4 orang.
2. Baca dengan cermat jurnal di *link* berikut.
<https://www.youtube.com/watch?v=qBB51meS4Cs>
3. Diskusikan pertanyaan-pertanyaan berikut.

- a. Apakah dasar teori untuk kultur jaringan?
 - b. Apakah syarat mutlak keberhasilan kultur jaringan?
 - c. Teknik perbanyakan pada kultur jaringan merupakan perbanyakan secara apa?
 - d. Jenis tanaman apa sajakah yang dapat diperbanyak dengan kultur jaringan?
 - e. Apakah keuntungan penerapan teknik kultur jaringan?
 - f. Berikan saran perbaikan terkait proses dan pemanfaatan kultur jaringan bagi kehidupan?
4. Tuliskan jawaban hasil diskusi kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas.

Pada Aktivitas 4.11, kalian telah memahami bahwa kultur jaringan merupakan metode untuk mengisolasi sekelompok sel dari organ tumbuhan yang ditumbuhkan secara aseptik agar memperbanyak diri dan tumbuh menjadi individu baru dengan sifat yang sama dengan induknya. Adapun prinsip teknologi kultur jaringan, yaitu perbanyakan tumbuhan secara vegetatif dalam kondisi aseptik dengan medium dan kondisi tertentu sehingga teknik ini disebut kultur *in vitro*.

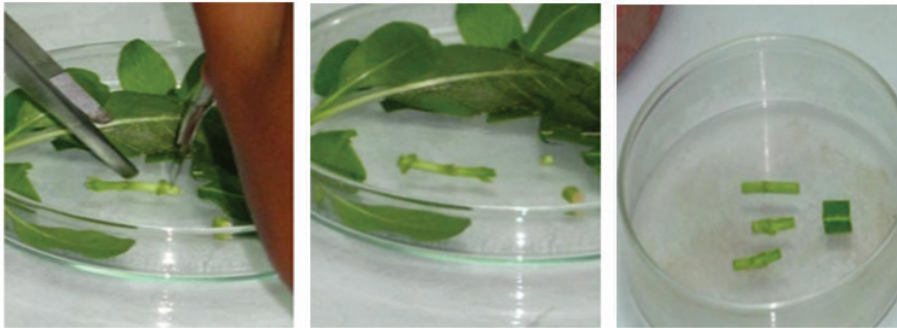
Teori yang mendasari teknik kultur jaringan, yaitu teori sel dan totipotensi. Sel merupakan unit reproduksi yang menyatakan bahwa setiap sel berasal dari sel. Sel merupakan hasil reproduksi dari sel sebelumnya. Jadi, satuan terkecil dalam reproduksi adalah sel. Adapun teori totipotensi menyatakan bahwa setiap sel memiliki kapasitas untuk beregenerasi membentuk tanaman secara utuh dengan sifat yang sama persis dengan induknya. Kultur jaringan terdiri atas beberapa tahapan, yaitu:

a. Penyiapan media

Jenis media yang umum disiapkan berupa media dasar *Murashige* dan *Skoog* (MS). Media MS dapat digunakan untuk hampir seluruh jenis tanaman.

b. Inisiasi

Inisiasi adalah pengambilan eksplan dari bagian tanaman. Eksplan berasal dari jaringan meristematis pada daun, tunas, cabang, batang, akar, embrio, kotiledon, hipokotil, dan epikotil.



Sumber: Slidesharecdn.com

▲ Gambar 4.24 Proses Inisiasi

c. Sterilisasi

Sterilisasi dilakukan dengan penyemprotan etanol pada media, eksplan, dan peralatan untuk mencegah terjadinya kontaminasi. Dengan demikian, eksplan dapat tumbuh dengan baik.

d. Multiplikasi

Multiplikasi merupakan penanaman eksplan pada media. Pada tahap ini akan terjadi proliferasi sel eksplan membentuk kalus.

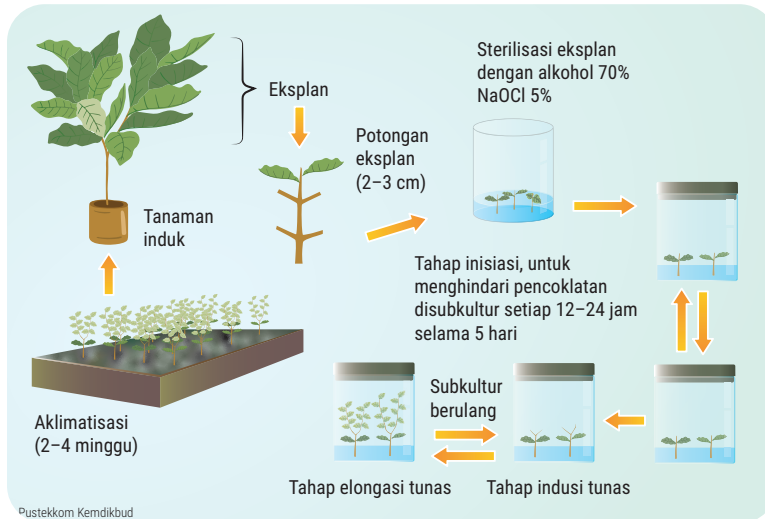
e. Pemanjangan akar dan tunas

Pengakaran adalah proses pertumbuhan akar pada kalus yang diikuti pemanjangan tunas sehingga kalus berubah menjadi tanaman kecil yang disebut *planlet*.

f. Aklimatisasi

Aklimatisasi merupakan proses memindahkan planlet ke *polybag* yang diberi sungkup. Setelah bibit mampu beradaptasi dengan lingkungan barunya maka secara bertahap sungkup dilepas dan pemeliharaan bibit dilakukan seperti pemeliharaan bibit generatif.

Secara urut dan sederhana, proses kultur jaringan dapat digambarkan sebagai berikut.



▲ Gambar 4.25 Proses Kultur Jaringan

Teknologi kultur jaringan mempunyai beberapa keuntungan yaitu:

- menghasilkan bibit tanaman dalam jumlah banyak dan waktu yang singkat dengan sifat sama persis dengan induknya.
- menghasilkan sifat bibit tanaman yang unggul.
- bibit tanaman terhindar dari hama penyakit.
- pengadaan bibit tanaman tidak tergantung musim

Berikut contoh bibit tanaman hasil kultur jaringan.

- Benih padi Biosalin 1 dan 2 yang toleran pada tanah dan air berkadar garam tinggi.



▲ Gambar 4.26. Padi Biosalin dan Kedelai Dering I

- b. Benih kedelai Dering 1 yang toleran pada kekeringan dan tanah masam, produktivitas tinggi, dan cepat masak.
- c. Benih varietas tebu *Giant sugarcane* yang adaptif pada iklim basah, unggul secara rendemen, dan daya hablur tinggi.



▲ Gambar 4.27 Tebu *Giant Sugarcane* dan pisang Abaca.

- d. Benih pisang Abaca (*Musa textilis*) unggul yang tahan layu dan batang berserat tinggi.

Di bidang kesehatan, tanaman hasil kultur jaringan digunakan untuk menghasilkan metabolit sekunder dan alkaloid yang berguna sebagai obat. Perhatikan tabel berikut.

Tabel 4.3 Jenis Tanaman, Jenis Metabolit dan Fungsi Metabolit Sekunder.

No	Tanaman	Metabolit Sekunder	Fungsi
1	<i>Papaver somniferum</i>	Kodein (alkaloid)	Analgesik
2	<i>Dioscorea deltoidea</i>	Diosgenin (steroid)	Antiinflamasi
3	<i>Cinchona ledgeriana</i>	Kuinin (alkaloid)	Antimalaria
4	<i>Digitalis lantana</i>	Digoksin	Kardiotonik
5	<i>Datura stramonium</i>	Skopolamin	Antihipertensi
6	<i>Catharanthus roseus</i>	Vinkristin	Antileukemia
7	<i>Curcuma</i> sp.	Curcumin	Antihipertensi
8	<i>Chrysanthemum</i> sp.	Piretrin	Insektisida
9	<i>Chinchona ledgeriana</i>	Kuinin (alkaloid)	Pemanis
10	<i>Thaumatococcus</i> sp.	Taumatoin (kalkon)	Pemanis
11	<i>Lithospermum erythrorhizon</i>	Shikonin	Pewarna kosmetik

Selain memberikan keuntungan, kultur jaringan juga mempunyai kelemahan antara lain:

- a. membutuhkan biaya yang relatif besar, terkait dengan pengadaan laboratorium.
- b. memerlukan keahlian khusus dalam pengerjaannya.
- c. bibit tanaman yang dihasilkan cenderung lemah pada akar.

Setelah mempelajari kultur jaringan secara lengkap, kini saatnya kalian mengetahui analisis ekonominya. Coba, kalian lakukan aktivitas 4.12 literasi finansial berikut.

AKTIVITAS 4.12

Menganalisis Usaha Kultur Jaringan

Setiap aktivitas kehidupan manusia mempunyai implikasi ekonomi dan sosial, termasuk mempraktikkan usaha pembibitan dengan teknik kultur jaringan. Berikut dipaparkan analisis usaha pembibitan tanaman jati dan pisang dengan menggunakan kultur jaringan.

Tabel 4.4 Analisis Keuangan Usaha Kultur Jaringan.

No	Tanaman	Jenis	Penerimaan (Rp)	Biaya (Rp)	Pendapatan (Rp)
1	Jati	Botol	102.500.000	64.216.970	38.283.030
		Polibag	15.100.000	21.910.101	(6.810.101)
Pendapatan total tanaman jati					31.472.929
2	Pisang	Botol	106.570.950	69.450.000	37.120.950
		Polibag	39.138.876	71.274.000	(32.135.124)
Pendapatan total tanaman pisang					4.985.826
Pendapatan total pembibitan tanaman					36.458.755

Sumber: Zakia Arifka Janah/UIN Syarif Hidayatulah (2014)

1. Lakukan analisis data berdasarkan tabel di atas.
 - a. Berapa persen keuntungan yang diperoleh jika yang diusahakan hanya bibit tanaman jati saja?
 - b. Berapa persen keuntungan yang diperoleh jika yang diusahakan hanya bibit tanaman pisang saja?

- c. Berapa persen keuntungan yang diperoleh jika yang diusahakan bibit tanaman jati dan pisang?
 - d. Pada bibit tanaman jati dan pisang, langkah apa yang dapat dilakukan agar keuntungan ekonominya menjadi lebih tinggi?
 - e. Usaha-usaha apakah yang dapat dilakukan terkait dengan teknik pemasaran agar dapat meningkatkan penerimaan, terutama untuk bibit jati jenis *polybag* dan pisang jenis botol?
2. Presentasikan hasil analisis kalian di depan kelas.

2. Rekayasa Genetika

Pernahkah kalian menjumpai beras berwarna emas, brokoli dan tomat berwarna ungu seperti pada Gambar 4.28? Tahukah kalian apa penyebab dan bagaimana proses terjadinya? Beras, brokoli, dan tomat yang memiliki warna tidak semestinya disebabkan oleh rekayasa genetika.



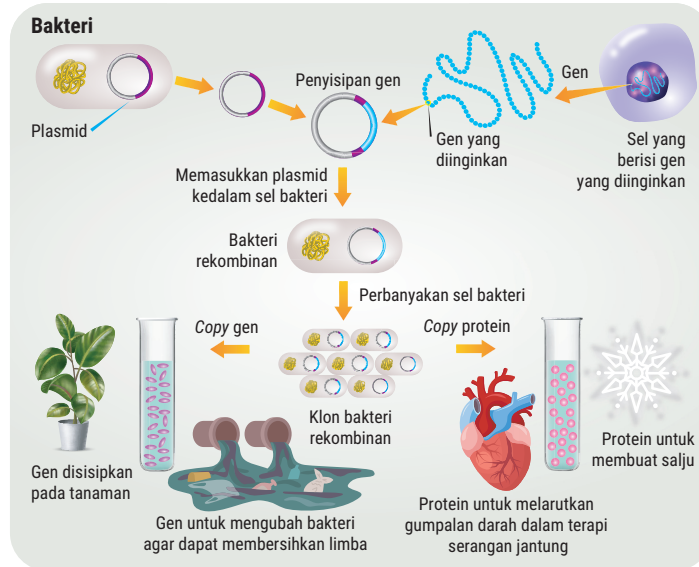
▲ Gambar 4.28 Organisme Hasil Rekayasa Genetika.

Rekayasa genetika merupakan teknologi yang mengubah susunan genetik melalui transfer gen-gen antarspesies untuk menghasilkan organisme dengan susunan DNA baru atau spesies baru yang berasal dari spesies yang bahkan hubungan kekerabatannya jauh. Bagaimanakah tahapan rekayasa genetika? Untuk menjawabnya, lakukan aktivitas 4.13 berikut.

AKTIVITAS 4.13

Mengenal Tahapan Rekayasa Genetika

1. Perhatikan bagan proses rekayasa genetika berikut!

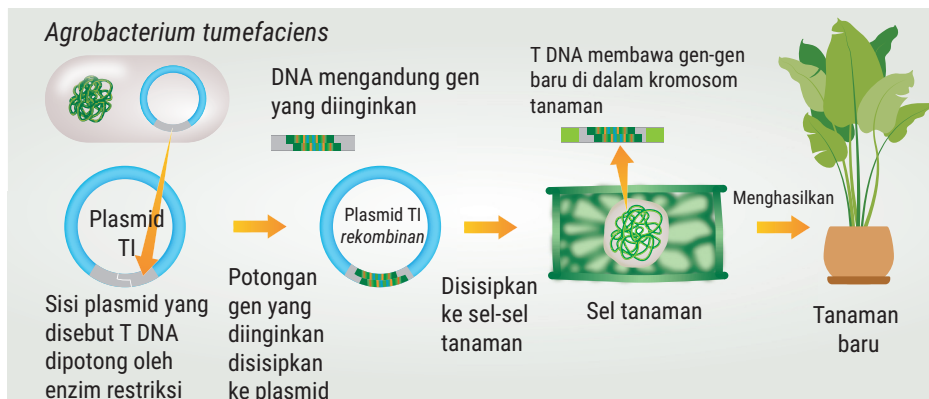


▲ Gambar 4.29 Tahapan rekayasa genetika.

2. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.
 - a. Proses apakah yang terjadi pada tahap pertama rekayasa genetika dan teknologi apa yang digunakan pada tahap ini?
 - b. Apakah yang dimaksud dengan plasmid dan apa fungsinya?
 - c. Apa peran plasmid dalam pemasangan dan penyisipan gen ke sel inang?
 - d. Apakah langkah setelah terbentuk DNA rekombinan hingga akhirnya melakukan pemanenan produk?
3. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas!

Pada Aktivitas 4.13, kalian telah mengenal tahapan rekayasa genetika secara sederhana. Untuk memahami lebih lengkap, berikut deskripsi tahapan rekayasa genetika yang dilakukan dengan metode DNA rekombinan secara berurutan.

- Isolasi atau pemurnian DNA dilakukan dengan menghancurkan sel dan memisahkan DNA dari bahan sel lainnya.
- Pemotongan DNA menggunakan enzim restriksi endonuklease sampai mendapatkan fragmen yang diinginkan (cDNA).
- Transfer DNA diawali dengan pemasangan cDNA pada cincin plasmid. Plasmid adalah molekul DNA kecil berbentuk melingkar pada bakteri yang terpisah dari kromosom dan berfungsi sebagai vektor atau pembawa gen. Plasmid melakukan penyisipan gen ke genom sel inang dengan bantuan enzim ligase.
- Identifikasi dan seleksi DNA hasil rekombinasi seperti yang diinginkan.
- Melakukan klon sel yang mengandung DNA rekombinan dan menghasilkan produk yang sesuai ekspresi gen yang ditransfer sehingga akhirnya dilakukan pemanenan produk.



▲ Gambar 4.30 Tahapan transgenik pada tanaman.

3. Individu Transgenik (GMO)

GMO (*Genetically Modified Organism*) adalah organisme yang DNA-nya telah diubah menggunakan teknologi DNA rekombinan. Munculnya GMO membawa dampak positif dan negatif. Dampak positif GMO, antara lain:

- GMO tanaman pangan pada kentang lebih tahan terhadap serangan virus. Pada jagung, padi, kapas, kedelai, dan kanola lebih tahan terhadap serangan insekta dan herbisida. Pada *golden rice* lebih kaya protein, provitamin A, dan β karoten.
- GMO untuk kesehatan seperti *E. coli* penghasil hormon insulin untuk mengobati dan menyembuhkan penyakit diabetes mellitus.

Adapun dampak negatif yang ditimbulkan GMO, antara lain:

- a. mengganggu keseimbangan ekologi. Contohnya, kapas Bt mengandung protein *cry* (paratoxin) yang dapat membunuh serangga sehingga rantai makanan terputus.
- b. lebih berkualitas sehingga dapat mengakibatkan tanaman asli punah atau plasma nutfah tererosi.
- c. menyebabkan alergi. Reaksi alergi disebabkan modifikasi gen tertentu dari donor. Contohnya, pada kacang Brazil.
- d. penyebab resistensi antibiotik. Tanaman transgenik yang mempunyai gen penanda resisten antibiotik dari mikroba dapat menyebabkan manusia yang mengonsumsinya menjadi resisten terhadap antibiotik. Contohnya, tomat *Flavr Savr*.

4. Kloning

Apakah kalian pernah melihat orang mencangkok tanaman? Kegiatan ini merupakan contoh sederhana praktik kloning. Kloning merupakan praktik perbanyakan makhluk hidup secara vegetatif untuk menghasilkan keturunan yang identik dengan induknya tanpa proses pembuahan.

Berdasarkan kelompok makhluk hidup yang mengalami kloning, ada tiga macam, yaitu:

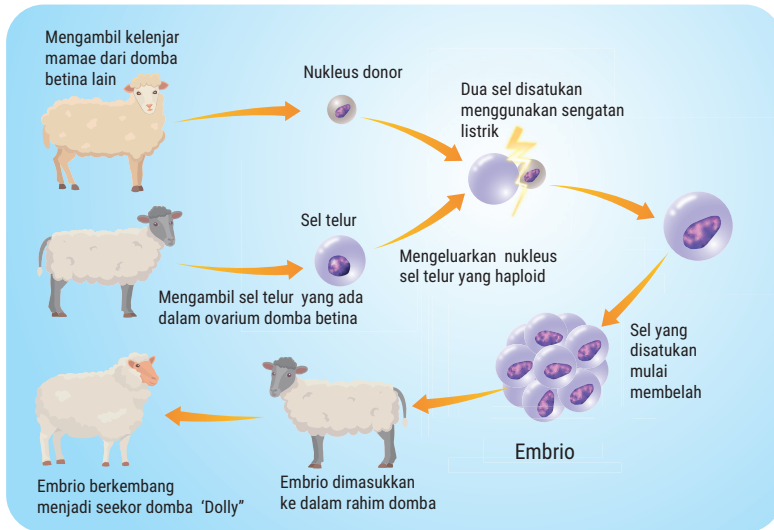
- a. Kloning pada hewan

Pernahkah kalian melihat video domba Dolly? Bagaimana domba Dolly dihasilkan dengan teknologi kloning? Mari lakukan aktivitas 4.14 berikut.

AKTIVITAS 4.14

Mengenal Tahapan Kloning pada Domba Dolly

1. Cermati gambar di bawah ini.



▲ Gambar 4.31 Teknologi transfer inti pada domba Dolly.

2. Jawablah pertanyaan berikut.
 - a. Apakah kalian menemukan bahwa domba donor dan resipien berjenis kelamin sama? Jika ya, mengapa?
 - b. Apa yang dilakukan pada sel kelenjar susu domba donor, dan pada sel telur domba resipien?
 - c. Energi apakah yang digunakan untuk menyatukan nukleus dari sel donor dengan sel telur resipien yang sudah dihilangkan intinya?
 - d. Mengapa sel yang sudah disatukan mampu membelah dan membentuk embrio?
 - e. Mengapa domba hasil kloning yang tumbuh dalam rahim domba resipien sifatnya sama dengan domba donor?
3. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk *PowerPoint* dan presentasikan di depan kelas.

- b. Kloning pada tumbuhan

Penerapan kloning pada tumbuhan secara sederhana dilakukan dengan mencangkok dan menyetek. Cara tersebut dapat digunakan

untuk memperoleh tanaman yang memiliki sifat persis dengan induknya. Adapun penerapan kloning secara modern dilakukan dengan kultur jaringan.

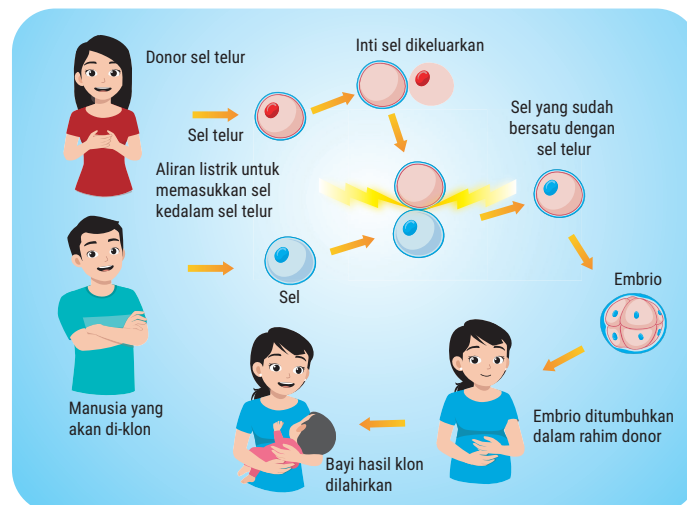
c. Kloning pada manusia

Kloning pada hewan dan tumbuhan merupakan hal yang lumrah. Namun, kloning manusia pasti mengundang pertanyaan. Bagaimanakah proses kloning pada manusia? Apakah kloning manusia diterima masyarakat? Apakah kloning manusia melanggar bioetika? Mari lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.15

Mengenal Tahapan Kloning pada Manusia

1. Perhatikan dan cermati gambar atau bagan di bawah ini!



▲ Gambar4.32 Kloning pada manusia.

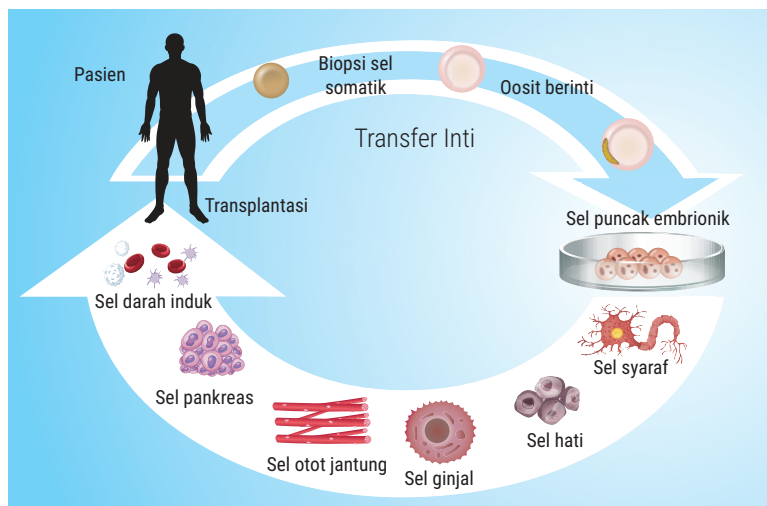
2. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut ini!

- Bagian sel mana yang diambil pada sel donor dan sel telur resipien untuk disatukan pada kloning manusia?
- Bagaimana susunan kromosom pada inti sel donor? Haploid atau diploid dan mengapa?
- Mengapa inti sel donor yang dimasukkan pada sel telur resipien setelah distimulasi aliran listrik mampu membelah menjadi embrio?

- d. Mengapa embrio yang berkembang di dalam rahim donor mempunyai sifat sama dengan si pendonor?
 - e. Mengapa jenis kelamin antara donor dan resipien harus sama? Jika ternyata antara 2 perempuan dapat menghasilkan keturunan baru, kemungkinan masalah apakah yang akan muncul?
 - f. Menurut pendapat kalian, apakah kloning manusia melanggar bioetika?
3. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk PowerPoint dan presentasikan di depan kelas!

Berdasarkan tujuannya, kloning dapat dibedakan sebagai berikut.

- a. Kloning DNA rekombinan, yaitu perpindahan sebagian rantai DNA yang diinginkan dari suatu organisme pada satu elemen replikasi genetik. Contohnya penyisipan DNA dalam plasmid bakteri untuk mengklon satu gen.
- b. Kloning reproduktif, yaitu teknologi yang digunakan untuk menghasilkan hewan yang sama.
- c. Kloning terapeutik, yaitu kloning untuk memproduksi embrio manusia sebagai bahan dalam penelitian yang bertujuan untuk mendapatkan sel batang (sel punca) yang difungsikan dalam mempelajari perkembangan manusia dan dalam penyembuhan penyakit.



▲ Gambar 4.33 Kloning Terapeutik.

Perbanyak makhluk hidup secara kloning memiliki dampak positif dan negatif. Berikut dampak positif dari kloning.

- Kloning menjadi pilihan untuk menyelamatkan gen yang hilang dari hewan yang mati secara teratur.
- Resipien transfer embrio tidak dibatasi waktu dan tempat.
- Embrio dapat disimpan dalam waktu yang lama.

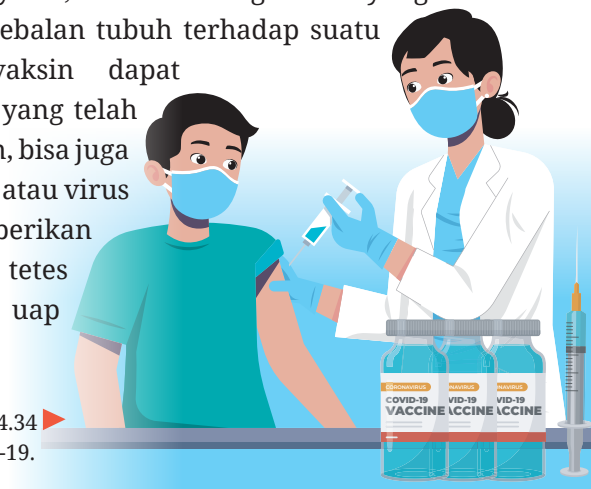
Adapun dampak negatif kloning, antara lain:

- Keterbatasan resipien menerima embrio.
- Belum ada rekam medis penggunaan embrio yang menginformasikan dampak positif dan negatifnya.
- Muncul pewarisan sifat mitokondria dan modifikasi epigenetik yang tidak diharapkan dan disebabkan oleh prosedur kloning.

5. Vaksin

Tiga tahun telah berlalu, yaitu 2019 – 2022, Indonesia mengalami wabah Covid-19 yang mengganggu aktivitas kehidupan. Solusi manjur yang mampu menghentikan pandemi Covid-19 dilakukan dengan vaksinasi. Vaksinasi merupakan proses pemberian vaksin ke dalam tubuh. Vaksinasi akan diikuti dengan imunisasi. Imunisasi adalah proses pembentukan zat kekebalan tubuh (antibodi) terhadap penyakit tertentu melalui vaksinasi. Adapun imunitas atau daya tahan tubuh merupakan sistem perlindungan tubuh terhadap serangan penyakit.

Vaksin adalah zat, senyawa, atau mikroorganisme yang berfungsi membentuk kekebalan tubuh terhadap suatu penyakit. Kandungan vaksin dapat berupa bakteri atau virus yang telah dilemahkan atau dimatikan, bisa juga berupa bagian dari bakteri atau virus tersebut. Vaksin dapat diberikan dalam bentuk suntikan, tetes minum, atau melalui uap (aerosol).



Gambar 4.34
Vaksin Covid-19.

Jenis vaksin yang digunakan untuk meredakan pandemi Covid-19 antara lain *Sinovac*, *Sinopham*, *Astrazeneca*, *Moderna*, *Novavax*, dan *Pfizer*. Tahukah kalian, Indonesia telah mengembangkan pembuatan vaksin untuk Covid-19? Vaksin apakah yang dihasilkan? Mari lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.16

Mengenal Pembuatan Vaksin Covid-19 di Indonesia

1. Perhatikan dan cermati video pada *link* berikut.
<https://www.youtube.com/watch?v=628XpPiTdN4>
2. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.
 - a. Apakah nama 2 vaksin Covid-19 yang dibuat di Indonesia?
 - b. Apakah dasar untuk membuat vaksin nusantara?
 - c. Apakah dasar untuk membuat vaksin merah putih?
 - d. Ada berapa tahap pembuatan vaksin dan sampai tahap mana proses pembuatan 2 vaksin di Indonesia?
3. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk *PowerPoint* dan presentasikan di depan kelas.

Pada Aktivitas 4.16, kalian telah memahami 3 metode pembuatan vaksin, yaitu:

- a. vaksin yang dilemahkan dan hidup, yaitu memasukkan virus yang tidak aktif atau lemah sehingga tidak menyebabkan penyakit.
- b. vaksin mati, yaitu memasukkan virus atau bakteri dalam kondisi mati, namun struktur tubuhnya utuh sehingga tidak dapat menyebabkan penyakit.
- c. vaksin mRNA yang merupakan komponen materi genetik yang direkayasa agar menyerupai kuman atau virus tertentu.

Pada umumnya, proses pembuatan vaksin melalui tahapan yang cukup panjang. Berikut 6 tahapan pembuatan vaksin.

- a. Eksplorasi

Tahap pertama dilakukan pada sel hidup yang harus dikontrol secara konsisten untuk mendapatkan karakterisasi dari sifat kimia, fisika, dan biologi termasuk mencari cara virus menyerang sel tubuh. Setelah

ditemukan prinsip pengendalian virus maka kandidat vaksin dibuat untuk diujicobakan.

b. Uji praklinis

Selanjutnya, dilakukan uji praklinis secara *in vitro* di tingkat sel pada kandidat virus. Apabila pengujian berhasil, dilanjutkan ke uji pada tikus dan monyet. Tujuannya adalah untuk mengetahui efektivitas dan keamanan serta mengkaji efek samping tertentu dari vaksin.

c. Uji coba klinis tahap I

Setelah lolos uji praklinis dan dinyatakan aman bagi manusia, dilakukan uji klinis pada orang dewasa yang sehat. Tujuannya untuk memastikan keamanan dan efektivitas vaksin pada manusia.

d. Uji coba klinis tahap II

Pada tahap ini, kandidat vaksin diujikan pada manusia sehat dengan sampel antara 100 - 500 orang dengan usia dan kondisi kesehatan yang lebih beragam. Uji ini untuk mengkaji dan mengevaluasi efektivitas, keamanan, dan dosis vaksin yang tepat, serta menilai respons sistem kekebalan tubuh terhadap vaksin yang diberikan.

e. Uji coba klinis tahap III efikasi

Uji fase tiga, yaitu uji dengan sampel 1.000 - 5.000 orang dengan kondisi yang bervariasi. Tujuannya adalah untuk memastikan keamanan, efektivitas, serta keuntungan yang melebihi risiko penggunaan dengan memantau respon kekebalan tubuh dan efek samping vaksin dalam jangka waktu tertentu. Salah satu indikasi keberhasilan pada fase ini, yaitu klaim efektivitas yang diukur dengan tingkat efikasi. Nilai efikasi *Pfizer* 94 – 95%, *Sinovac* 65,3%, *Moderna* 94,5%, dan *Astrazeneca* 62 – 75%.

f. Tahap VI

Setelah dinyatakan lulus semua uji klinis, vaksin bisa mendapatkan izin edar dari BPOM.

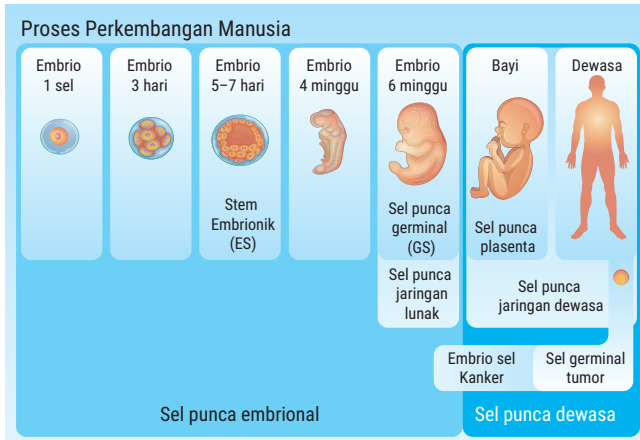
6. Stem cell

Dewasa ini berkembang teknologi sel punca (*stem cell*) untuk terapi penyembuhan penyakit. Apakah kalian tahu, apa itu sel punca? Coba lakukan aktivitas berikut.

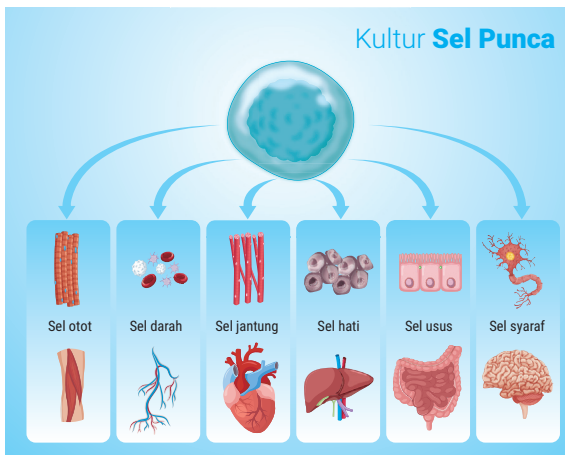
AKTIVITAS 4.17

Mengenal Sel Punca pada Manusia

1. Perhatikan gambar di bawah ini!



▲ Gambar 4.35 Sel Punca Pada Manusia



▲ Gambar 4.36 Teknologi sel punca pada manusia

2. Jawablah pertanyaan pertanyaan berikut!
 - a. Ada berapa macam sel punca pada gambar di atas, sebutkan?
 - b. Sel punca yang dikulturkan terdiferensiasi dan terspesialisasi membentuk jaringan apa saja?
3. Sajikan jawaban kalian dalam bentuk *PowerPoint* dan presentasikan di depan kelas.

Sel punca adalah sel dasar yang belum mengalami diferensiasi dan spesialisasi sehingga memiliki potensi untuk berkembang menjadi berbagai jenis sel baru yang menggantikan sel yang rusak, jika dikulturkan pada media yang sesuai dan distimulasi oleh jenis sel yang diinginkan. Sel-sel yang menjadi sumber sel punca, yaitu:

a. Sel embrionik

Sel embrio yang berusia 3 - 5 hari dapat menjadi sumber sel punca karena bersifat *pluripotent*, yaitu sel masih mampu membelah dan berkembang menjadi bermacam-macam sel tubuh. Sumber lainnya berupa cairan ketuban dan tali pusat.

b. Sel dewasa

Sel dewasa dapat dijadikan sumber sel punca setelah mengalami *genetic reprogramming* agar bersifat *pluripotent*. Sumber sel dewasa yang dapat digunakan, yaitu sel sumsum tulang. Sel sumsum tulang dapat membentuk sel tulang dan sel otot jantung.

Teknologi sel punca mempunyai manfaat, antara lain:

- a. memperbaiki sel mati sehingga dapat menyembuhkan luka.
- b. memproduksi protein sitokin untuk memperbaiki sel rambut dan kulit.
- c. berdiferensiasi dan membelah diri menghasilkan sel baru yang akan menggantikan tugas sel mati sehingga dapat digunakan untuk menyembuhkan penyakit kardiovaskular, seperti stroke dan jantung koroner.
- d. menyeimbangkan imunitas pada penyakit autoimun.

Di samping memberikan manfaat yang cukup besar, teknologi sel punca dapat memberikan dampak negatif, antara lain sebagai berikut.

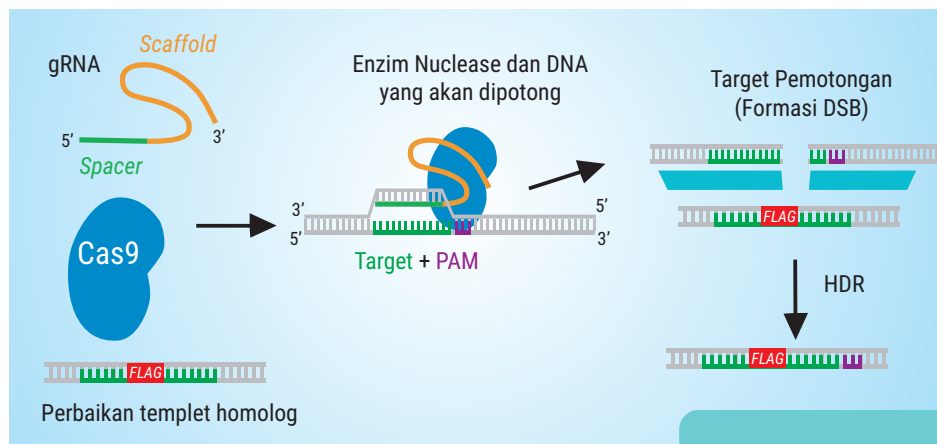
- a. *Embryonic stem cell*: (1) bersifat tumorigenik, artinya sel yang tak terdiferensiasi menjadi kontaminan yang memicu kanker. (2) bersifat *allogenic*, yaitu berpotensi menimbulkan reaksi penolakan.
- b. *Umbilical cord blood stem cell*: (1) menyebabkan penyakit genetik dari donor dan muncul ketika dewasa. (2) Jumlah sel punca terbatas sehingga jumlah sel punca yang diperlukan resipien lebih banyak dari yang tersedia dari donor. Jumlah sel yang dibutuhkan berbanding lurus dengan usia, berat badan, dan status penyakit.

- c. *Adult stem cell*: (1) jumlahnya sedikit, jarang ditemukan pada jaringan dewasa sehingga sulit mendapatkan *adult stem cell* dalam jumlah banyak. (2) masa hidupnya tidak selama *embryonic stem cell*. (3) Bersifat multipoten, sehingga diferensiasi tidak seluas *embryonic stem cell*.

7. Penyuntingan Genom

Pemetaan genom manusia yang berisi deretan basa nitrogen sejak 1977 - 2003 berhasil memetakan 3,3 milyar basa nitrogen. Deretan basa nitrogen genom manusia sekarang menjadi bank DNA untuk penyuntingan genom. Penyuntingan genom (*Genome Editing with Engineered Nucleases*, GEEN) merupakan rekayasa genetik melalui penyisipan, penggantian, atau pembuangan (sebagian) DNA pada genom organisme dengan memanfaatkan enzim nuklease.

Enzim nuklease yang digunakan adalah nuklease direkayasa sehingga dapat memotong bagian *double helix* DNA pada tempat tertentu, seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut.



▲ Gambar 4.37. Enzim nuklease memotong DNA.

Sumber: Deden Indra Dinata (2013)

Ada beberapa macam enzim nuklease, yaitu:

- a. Meganuklease
- b. Nuklease jemari zink (*Zinc Finger Nucleases/ZFN*)
- c. Nuklease efektor serupa aktivator transkripsi (*transcription activator-like effector nucleases/TALEN*)
- d. CRISPR-Cas (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*)

CRISPR/Cas9 terdiri atas 2 varian, yaitu RuvC dan HNH. RuvC berperan memotong untai DNA nonkomplementer, sedangkan HNH berperan memotong untai komplementer. RuvC dan HNH bekerja bersama menghasilkan *double-strand break* (DSB) pada DNA target.

Selain protein Cas9 ada *single guide* RNA (sgRNA) yang berperan dalam penyuntingan DNA target. sgRNA membawa sekuens *scaffold* yang memungkinkannya berjangkar pada Cas9 dan sekuens *spacer* 20 pasangan basa komplementer dari gen target. sgRNA memandu kompleks CRISPR/Cas9 ke lokasi genom yang diinginkan. Pengeditan genom tergantung pada 2 jalur khusus, yaitu *non-homologous end-joining* (NHEJ) atau *Homology-Directed Repair* (HDR).

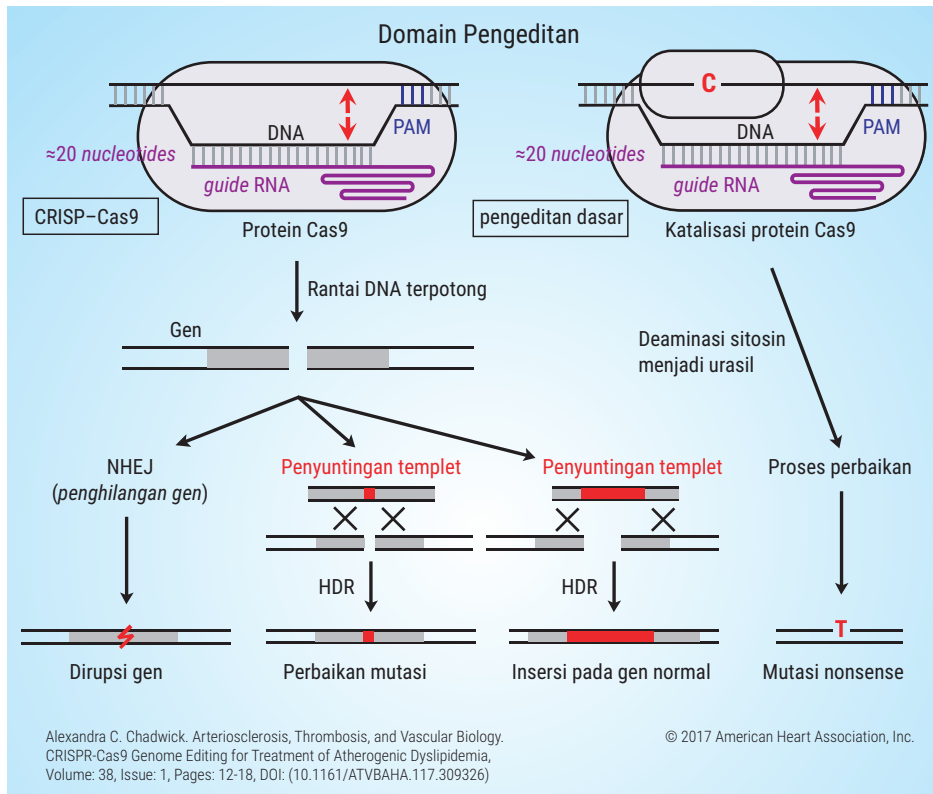
Jalur NHEJ merupakan penyisipan dan penghilangan secara acak dari pasangan basa pada lokasi pengeditan sehingga menghasilkan *frameshift mutation* dan membentuk stop kodon prematur atau polipeptida nonfungsional.

Jalur HDR menggunakan daerah homolog dari untai DNA yang belum diedit sebagai template untuk mengoreksi DNA yang rusak. Langkah ini dapat menghasilkan pengeditan genom sesuai keinginan.

Secara sederhana mekanisme kerja CRISPR/Cas9 sebagai berikut.

- a. Ketika bakteri mendeteksi adanya infeksi DNA virus, bakteri merespon dengan mensintesis dua tipe RNA pendek.
- b. RNA I mempunyai urutan yang sesuai dengan DNA virus.
- c. RNA II berikatan dengan protein Cas9 dengan urutan yang sesuai *sgRNA* untuk menemukan target, yaitu DNA virus.
- d. Selanjutnya, Cas9 memotong DNA virus penginfeksi.

Perhatikan gambar berikut, untuk melihat mekanisme kerja CRISPR/Cas9 dalam penyuntingan.



▲ **Gambar 4.38** Mekanisme kerja CRISPR/Cas9.

Sistem CRISPR/Cas9 memiliki potensi untuk pemulihan fungsi gen sehingga dapat mengobati berbagai penyakit genetik. Melalui pengeditan polimorfisme nukleotida tunggal (SNP) dapat digunakan untuk melumpuhkan gen yang menyebabkan penyakit, memperkenalkan mutasi pelindung, atau menambahkan transgen terapi.

Sistem CRISPR/Cas9 mempunyai manfaat terutama untuk bidang kesehatan sebagai berikut.

- Mengedit genom sel T *autolog* untuk terapi kanker pada kasus myeloma multiple melanoma, sarkoma sinovial, dan liposarkoma.
- Mengkatalisis perbaikan genom, salah satunya β -hemoglobinopati pada penyakit Thalasia.
- Mengobati penyakit darah seperti purpura pasca transfusi, anemia Fanconi, dan penyakit von Willebrand.
- Mengedit gen sel CD4⁺ menjadi makrofag yang resisten virus HIV.

- e. Menurunkan protein inti dan protein kapsid virus hepatitis B (HBV) untuk penghambatan karsinogenesis.
- f. Mengidentifikasi komponen toksik infeksi virus hepatitis C.
- g. Menurunkan proliferasi pada infeksi virus dan memulihkan jalur apoptosis sel.
- h. Memperbaiki fungsi gen dan penggerak gen untuk menyembuhkan penyakit demam dengue, Chikungunya, demam kuning, dan malaria.
- i. Mempelajari dan mencari perawatan untuk berbagai gangguan neurologis, seperti penyakit Parkinson, *amyotrophic lateral sclerosis*, penyakit Huntington, schizophrenia, distrofi otot Duchenne, penyakit metabolik, dan retinitis pigmentosa.

-----● G. Harapan dan Kenyataan Bioteknologi Modern

Berikut harapan-harapan yang muncul pada produk bioteknologi modern untuk memenuhi kebutuhan manusia.

1. Bidang kesehatan
 - a. Ditemukan pengobatan cara baru untuk penyakit jantung dan pembuluh darah, kanker, serta diabetes.
 - b. Dihasilkan antibiotik yang lebih baik dan murah.
 - c. Ditemukan vaksin untuk penyakit hepatitis, influenza, rabies, dan penyakit parasitik: malaria dan penyakit tidur.
 - d. Adanya pengujian laboratorium yang cepat untuk membantu mendiagnosis secara akurat untuk berbagai penyakit.
 - e. Adanya perbaikan metode identifikasi kecocokan DNA dalam transplantasi jaringan dan organ.
 - f. Ditemukan teknik pengoreksi jenis dan urutan asam amino untuk mengobati penyakit turunan, seperti hemofilia.
2. Bidang pertanian dan produksi pangan. Diharapkan dapat menghasilkan:
 - a. tanaman baru varietas unggul.
 - b. tanaman yang tahan kekeringan, kebekuan, salinitas tinggi, dan tekanan-tekanan lingkungan lainnya.
 - c. substansi yang mempercepat pertumbuhan ternak.

- d. vaksin untuk ternak.
 - e. makanan ternak dengan harga lebih murah.
3. Produksi energi, ditemukannya:
 - a. *renewable fuels* termasuk gas CH_4 , H_2 , serta alkohol untuk penggunaan domestik dan industri.
 - b. substansi dan jenis mikroba yang membantu ekstraksi minyak dari perut bumi.
 4. Industri, ditemukannya:
 - a. sumber/bahan dasar untuk produksi plastik, cat, serat sintetis, dan perekat.
 - b. mikroba yang mengekstraksi metal dari batuan.
 - c. sistem-sistem baru untuk mengontrol polusi.

Kenyataan-kenyataan yang dirasakan pada penerapan bioteknologi modern di antaranya:

1. Penerapan dan pemanfaatan bioteknologi di Indonesia secara rata-rata masih tertinggal dari negara-negara maju.
2. Realita secara umum:
 - a. Produk-produk bioteknologi telah mencapai pasaran terutama di negara-negara maju.
 - b. Beberapa produk nonpangan telah mencapai pasaran, seperti biopestisida dan enzim, tanaman herbisida resisten.
 - c. Produk yang belum terlihat, yaitu tanaman tahan kekeringan, kebekuan, dan salinitas.
 - d. Dalam bidang kesehatan terjadi kemajuan pesat, seperti pemanfaatan bioteknologi untuk mendiagnosis dan pengobatan, walaupun penaklukan penyakit masih jauh dari komplit.

Adapun kendala-kendala yang dialami dalam penerapan bioteknologi modern di antaranya:

1. Industrialisasi yang memasuki taraf “tertarik” atau yang mencoba jumlahnya masih sangat terbatas.
2. Kurangnya sumber daya manusia baik kuantitas maupun kualitas, sarana dan prasarana serta program yang tumpang tindih.

3. Komersialisasi dari produk-produk bioteknologi terkait dengan regulasi, penerimaan konsumen, dan hak kepemilikan intelektual.

Kalian telah mempelajari penerapan bioteknologi modern dalam kehidupan manusia. Tentunya, penerapan bioteknologi modern tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan. Oleh karena itu, kalian dapat melakukan analisis menggunakan model SWOT. SWOT merupakan singkatan dari *strengths* (kekuatan), *weaknesses* (kelemahan), *opportunities* (peluang), dan *threats* (ancaman). Coba, kalian lakukan aktivitas berikut.

AKTIVITAS 4.18.

Menganalisis Penerapan Bioteknologi Modern

1. Lakukan analisis penerapan bioteknologi modern dengan model SWOT dalam tabel berikut.

Penerapan Bioteknologi Modern		<i>Opportunity</i>	<i>Threat</i>
<i>Strenght</i>			
Weakness			

2. Sajikan hasil analisis SWOT kalian dalam bentuk *PowerPoint* dan presentasikan di depan kelas.

● H. Bioetika

Pernahkah kalian melakukan penelitian menggunakan hewan uji coba, seperti tikus Wistar? Jika pernah, apakah penggunaan hewan uji coba dapat menyakitinya? Bagaimana langkah aman dalam menggunakan hewan uji coba? Apakah ada kode etik menggunakan hewan uji coba untuk penelitian? Kode etik untuk memperlakukan hewan dalam penelitian disebut **etik klirens**. Penerapan etik klirens merupakan salah satu praktik dari bioetika.

Bioetika merupakan penerapan etika dalam ilmu biologi, obat, pemeliharaan kesehatan, dan bidang terkait berdasarkan data ilmiah, biologis,

dan medis. Ruang lingkup bioetika termasuk kloning, terapi gen, rekayasa genetika manusia, dan manipulasi biologi dasar melalui perubahan DNA, RNA, dan protein.

Prinsip dasar bioetika, yaitu menghormati orang, kebaikan dan keadilan serta tidak merugikan martabat manusia dan kesucian hidup. Di bidang medis, bioetika memberikan prioritas tertinggi pada otonomi, di mana pasien memiliki kebebasan memilih pengobatannya sendiri.

1. Bioetika pada Tumbuhan dan Sumber Daya Alam

Pengembangan dan penggunaan GMO masih kontroversial. Peraturan mengenai peluncuran, pengembangan, dan produksi komersial GMO terkait dengan risiko lingkungan dan kesehatan ada dalam *Regulation and Risk Assessment* dan “*The Natural*” and *Crossing Species Borders*. Peraturan ini dimaksudkan untuk memastikan keamanan lingkungan dan menangani serta memberikan sarana bagi GMO agar tidak merugikan keanekaragaman hayati dengan mempertimbangkan risiko pada kesehatan manusia.

2. Bioetika pada Hewan Uji Coba dan Penelitian Subjek Manusia

Syarat mutlak penelitian yang melibatkan hewan uji coba dan manusia diperlukan *ethical clearance*. Etik klirens merupakan pedoman bagi peneliti untuk menjunjung tinggi nilai integritas, kejujuran, dan keadilan dalam melakukan penelitian. Penggunaan hewan uji coba harus memegang prinsip utama 3R, yaitu:

- a. *Replacement* atau penggantian dengan metode mensubstitusi hewan dengan program komputer, kultur sel atau hewan coba dengan tingkatan sensitivitas lebih rendah.
- b. *Reduction* atau pengurangan dengan strategi meminimalisir jumlah hewan dan perlakuan tanpa mengurangi validitas data.
- c. *Refinement* atau perbaikan terkait modifikasi pemeliharaan dan prosedur penelitian untuk mencegah hewan sakit dan stres.

Adapun penelitian dengan subjek manusia harus memegang 3 prinsip dasar, yaitu:

- a. Prinsip menghormati harkat martabat manusia yang memiliki kebebasan berkehendak dan bertanggung jawab secara pribadi terhadap keputusannya sendiri.
- b. Prinsip berbuat baik dan tidak merugikan dengan mengupayakan manfaat maksimal dengan kerugian minimal yang mensyaratkan bahwa: (a) risiko harus wajar dibanding manfaat yang diharapkan. (b) desain penelitian harus ilmiah. (c) peneliti mampu melaksanakan dan menjaga kesejahteraan subjek penelitian.
- c. Prinsip *do no harm* (tidak merugikan), yaitu menentang tindakan dengan sengaja merugikan subjek penelitian.
- d. Prinsip keadilan yang mengacu pada kewajiban memperlakukan setiap orang dengan moral yang benar dan layak untuk memperoleh haknya terkait keadilan yang merata, seimbang dalam hal beban dan manfaat yang diperoleh subjek dari penelitian.

AKTIVITAS 4.19.

Mengevaluasi Bioteknologi Modern dengan Bioetika

1. Bacalah artikel berikut.

Rekayasa DNA Bayi untuk Cegah HIV, Etiskah?

Ilmuwan China, He Jiankui mengklaim berhasil merekayasa DNA bayi antiinfeksi HIV. Dua bayi kecil, bernama Lulu dan Nana terlahir dan terlihat normal seperti bayi pada umumnya. Lulu dan Nana dilahirkan melalui fertilisasi *in vitro* (IVF) dengan menyuntikkan protein dan “instruksi operasi gen” untuk memodifikasi gen pada embrionya. Proses ini dilakukan untuk menyingkirkan gen yang menjadi pintu masuk infeksi HIV. Selanjutnya, dilakukan pemeriksaan perkembangan proses pengeditan gen. Lalu, embrio ditanam pada rahim ibunya, Grace. Walaupun kehamilan berlangsung normal, perkembangannya dipantau secara ketat dengan peralatan *ultrasound* dan tes darah.

Setelah lahir, Jiankui kembali memastikan keselarasan seluruh genom Lulu dan Nana serta membuktikan operasi gen ini aman, tidak ada gen yang diubah kecuali yang mencegah infeksi HIV. Kedua bayi tersebut aman dan sehat seperti bayi lainnya.

Sebelum sampai pada lompatan besar ini, peneliti dari *Southern University of Science and Technology of China* ini telah bereksperimen dengan embrio tikus dan monyet selama beberapa tahun. Pada tahap selanjutnya, ia dan timnya memodifikasi embrio tujuh pasangan yang identitasnya dirahasiakan. Grace adalah hasil operasinya yang berhasil.

Tujuan operasi ini, bukan untuk menyembuhkan atau mencegah penyakit turunan, tetapi untuk memberikan sifat unik pada Nana dan Lulu, yakni kemampuan melawan kemungkinan infeksi HIV. Perlu diketahui, Mark (ayah Lulu dan Nana) seorang pengidap AIDS. Memiliki anak yang mewarisi penyakitnya merupakan masalah besar bagi Mark dan Grace. Terlebih lagi, menurut Jiankui, orang-orang seperti Mark di negara-negara berkembang sering mengalami diskriminasi. Jiankui mengaku itulah dorongan terbesarnya untuk melakukan rekayasa genetik terhadap embrio Nana dan Lulu.

Sumber: Fadrik Aziz Firdausi (2018)/ <https://tirto.id/daBP> (dengan pengubahan seperlunya)

2. Bagi kelas dalam 2 kelompok besar, yaitu kelompok **pro** dan **kontra**. Lalu, masing-masing kelompok besar dibagi menjadi kelompok kecil yang terdiri atas 2 – 3 orang.
3. Jawablah pertanyaan berikut bersama kelompok kecil kalian.
 - a. Apakah tindakan Jiankui merekayasa gen Lulu dan Nana melanggar bioetika dan tak bertanggungjawab? Berikan alasannya!
 - b. Mengapa penelitian rekayasa genetika hanya diizinkan untuk terapi penyembuhan dan mencegah penyakit serius yang belum ditemukan metode pengobatannya, bukan untuk mengubah atau mengganti susunan gen pada manusia? Berikan alasannya?
4. Sampaikan jawaban kelompok kalian di depan kelas. Kelompok lain bisa melakukan debat atas jawaban yang diberikan. Lakukan secara bergantian.

Pada Aktivitas 4.19, kalian menjadi lebih memahami batasan yang diperbolehkan dan dilarang dalam bioetika. Etika yang dilanggar, yaitu mengubah gen bawaan atau sifat bawaan pada embrio yang seharusnya tidak tahan serangan HIV-AIDS dihilangkan atau diedit. Hal ini berarti melanggar sifat hakiki yang diberikan Tuhan sehingga tidak menghargai kehormatan dan harkat serta martabat manusia ciptaan Tuhan.

Bagaimanapun perkembangan bioteknologi harus tetap menghargai dan menghormati harkat serta martabat manusia, kebaikan dan keadilan, serta tidak merugikan, martabat manusia, dan kesucian hidup.

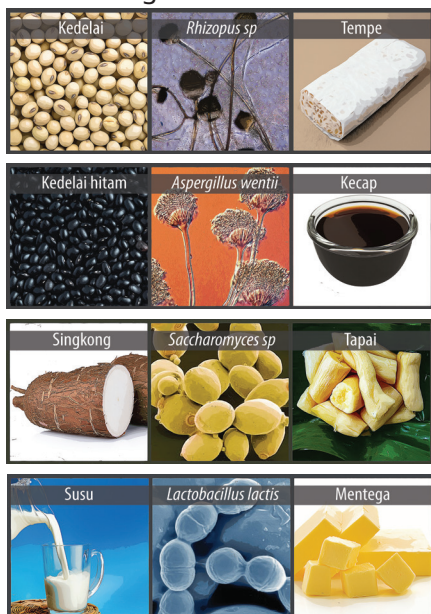
Refleksi

1. Apakah yang sudah kalian lakukan terhadap produk bioteknologi kontroversial yang tidak aman bagi kesehatan dan lingkungan?
2. Apakah kalian akan mengubah sikap dan perilaku dengan mengkampanyekan produk-produk bioteknologi yang aman bagi kesehatan dan lingkungan?
3. Inovasi apakah yang dapat kalian lakukan untuk menjaga keamanan produk bioteknologi bagi kesehatan dan lingkungan?
4. Bagaimanakah seharusnya kalian bersikap pada inovasi teknologi biologi yang melibatkan manusia sebagai subjeknya?

UJI KOMPETENSI

Jawablah soal-soal berikut ini sesuai karakteristiknya masing-masing!

1. Perhatikan gambar berikut ini!



Berdasarkan gambar produk bioteknologi di atas, tentukan apakah pernyataan berikut ini benar atau salah!

Pernyataan	Benar	Salah
Tape, tempe dan kecap merupakan produk bioteknologi konvensional		
Agen biologi dalam pembuatan tempe dan kecap termasuk kelompok jamur		
Agen biologi untuk pembuatan keju dan yoghurt termasuk kelompok bakteri atau monera		
Teknologi yang digunakan untuk membuat tape, tempe, kecap, yoghurt dan anggur adalah bioproses fermentasi		
Kondisi dalam proses pembuatan tempe, tape dan kecap termasuk kondisi nonsteril		
Tape berasal dari bahan dasar berupa singkong kukus, agen biologinya berupa <i>Saccharomyces</i> sp. dan peranan agen biologinya mengubah gula menjadi alkohol		

2. Agen biologi pada proses pembuatan tempe menghasilkan bermacam enzim yang akan mengubah zat-zat makanan yang terkandung pada kedelai menjadi senyawa atau zat gizi yang lebih mudah larut dan diserap tubuh.

Buatlah bagan atau skema proses pemecahan macam macam zat makanan, jenis enzimnya dan hasil zat gizi yang dihasilkan?

3. Simaklah penjelasan berikut ini!

Pembuatan tempe yang terstandar diharapkan dapat memberi solusi terhadap permasalahan mutu tempe yang kurang konstan bila dilakukan dengan metode tradisional. Teknologi "Quick Tempeh" alias "Tempe Cepat" merupakan hasil penelitian ilmiah yang dilakukan di Institut Pertanian Bogor. Teknologi ini memperhatikan perbedaan kualitas kedelai lokal dan impor, tahapan pengasaman, pemilihan kultur jamur dan pengelolaan air limbahnya, terutama jika dilakukan di perkotaan. Khusus teknik pengasamannya yang dipilih adalah asam glukonat yang diperoleh dari senyawa *glucono delta-lactone* atau sering disingkat sebagai GDL. Penerapan teknologi yang sudah siap aplikasi ini direncanakan untuk dapat diimplementasikan dalam skala luas.

Berdasarkan artikel di atas tentukan pernyataan berikut ini benar atau salah!

Pernyataan	Benar	Salah
Kedelai impor sebagai bahan dalam pembuatan tempe umumnya merupakan tanaman transgenik		
Proses pembuatan tempe dengan teknologi fermentasi merupakan penerapan bioteknologi konvensional.		
Proses pembuatan kedelai transgenik dilakukan dengan teknologi rekayasa genetika		
Kultur murni Jamur <i>Rhizopus oligosporus</i> sebagai agen biologi dalam pembuatan tempe merupakan hasil rekayasa genetika		
Pengelolaan limbah proses pembuatan tempe dapat dilakukan dengan teknologi bioremediasi		
Seluk beluk penerapan teknologi tempe cepat dapat digunakan untuk mempelajari manfaat bioteknologi dalam pemecahan masalah di bidang pertanian, pangan dan lingkungan.		

4. Perhatikan komponen-komponen bioteknologi berikut ini!

Produk: 1. Yoghurt 2. Antibodi monoklonal, 3. Padi Biosalin, 4. *Nata de coco*, 5. Domba Dolly, 6. *Golden rice*, 7. Kapas Bollgard, 8. Kedelai *Roundup Ready*. 9. Tebu *Giant sugance*, 10. Alkohol (biofuel), IPAL

Teknologi: a. fermentasi, b. bioremediasi. c. rekayasa genetika. e.kultur jaringan, f. Kloning, g. *stem cell*, h.penyuntingan genom.

Macam bioteknologi: A. Konvensional, B. Modern

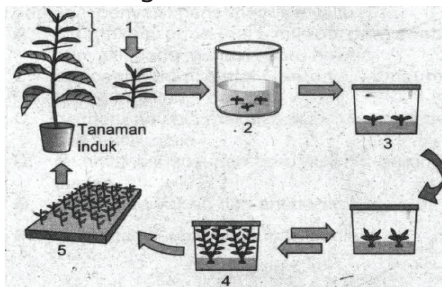
Bidang kehidupan: 1) Pangan, 2) Pertanian, 3) Peternakan, 4) Lingkungan 5) Kesehatan, 7) Energi

Jodohkan masing masing komponen bioteknologi di atas dengan memasukkannya pada kolom dan baris tabel berikut ini!

No	Nama Produk	Macam Teknologi	Janis Bioteknologi	Bidang kehidupan
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

5. Tahapan Kultur Jaringan

Perhatikan gambar berikut ini!



Berikan nama tahapan dan peristiwa yang terjadi pada kultur jaringan sesuai nomor yang tertera!

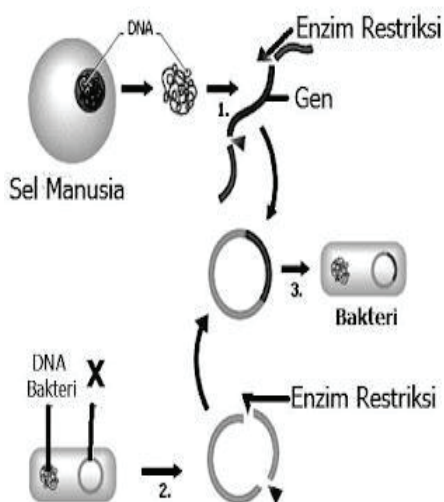
Nomor Gambar	Nama Tahapan

6. Peranan kultur jaringan

Kultur jaringan dalam perkembangan tidak hanya digunakan untuk menyiapkan bibit yang bersifat unggul dari induk aslinya, namun setelah penerapan rekayasa genetika pada tanaman sekarang lebih banyak digunakan untuk mengembangkan bibit dalam jumlah banyak dan seragam pada tanaman transgenik. Berikut ini hasil kultur jaringan pada tanaman transgenik, *kecuali*

- Benih padi Biosalin 1 dan 2 yang adaptif pada air dengan kadar garam tinggi.
- Benih Kedelai Dering 1 yang toleran kekeringan, toleran masam, produktivitas tinggi dan cepat masak.
- Benih ubi jalar (*sweet potato*) yang berwarna kuning dan ungu dengan kandungan glukosa tinggi.
- Kentang hitam (*Coleus tuberosus*), yang mengandung asam triterpenoid adalah asam betulinic, asam oleanolic, dan asam ursolik yang berperan sebagai antikanker dan antitumor.
- Mangga yang mengandung glukomanan yang dapat membunuh sel kanker.

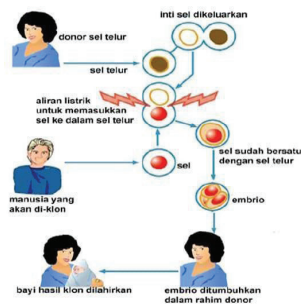
Perhatikan gambar berikut ini!



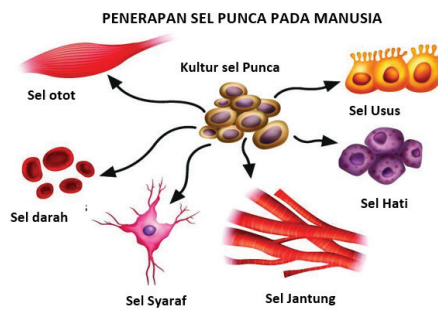
Pasangan antara nomor/label 1,2,3 dan X pada gambar dengan tahapan yang benar adalah

Nomor /label pada gambar	Tahapan rekayasa genetika

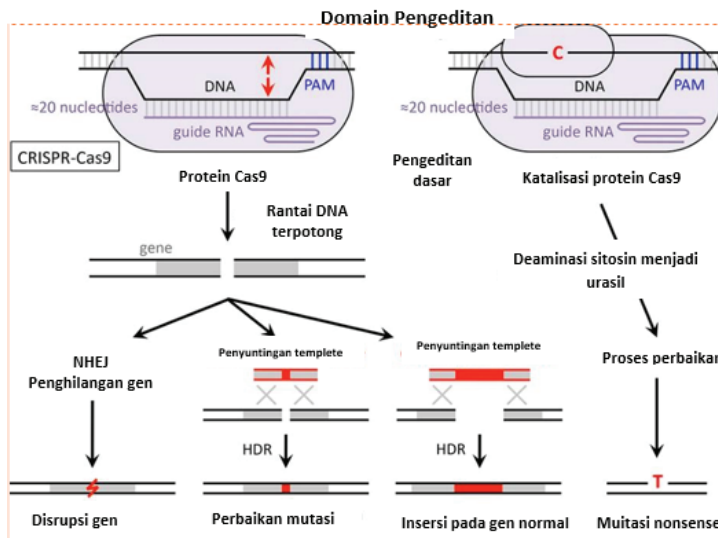
Perhatikan infografis rekayasa genetika pada manusia berikut ini!



Kloning Manusia



Stem Cell



Penyuntingan Gen

Saran yang tepat untuk pemanfaatan ketiga teknologi pada manusia di atas adalah

- Stem cell* sebaiknya hanya diperuntukkan penyembuhan penyakit yang menyebabkan rusaknya atau hilangnya jaringan tubuh dan belum ditemukan metode dan jenis obat untuk penyembuhan,
- Kloning manusia sebaiknya hanya dijadikan alternatif untuk transplantasi organ tubuh
- Kloning manusia sebaiknya digunakan untuk membantu pasangan suami isteri untuk mendapatkan keturunan dari gen kedua orang tuanya
- Stem cell* sebaiknya hanya dapat digunakan untuk memperbaiki sifat gen yang rusak karena infeksi virus
- Penyuntingan gen sebaiknya diperuntukkan untuk merubah sifat asli manusia sehingga menyimpang dari sifat gen yang dibawa oleh kedua orang tuanya.

Tentukan pernyataan berikut ini benar atau salah!

- a. Kultur jaringan menggunakan prinsip totipotensi sel meristem yang dimanfaatkan untuk menghasilkan bibit yang bersifat unggul, seragam dan dalam waktu yang singkat (B/S)
- b. DNA rekombinan salah satunya digunakan untuk menghasilkan hormon insulin dengan pencangkakan DNA pankreas pada DNA bakteri *E. coli* melalui perantara plasmid (B/S)
- c. Bakteri *Agrobacterium tumefaciens* dapat disisipkan pada DNA tanaman agar tahan terhadap antibiotik kanamisin (B/S)
- d. Perbanyak ternak dengan teknik kloning dapat dilakukan dengan kloning terapeutik (B/S)
- e. x yang bersumber pada sel embrionik yang bersifat pluripotent, jika ada salah satu sel tidak dapat berkembang dapat menjadi tumorigenik yang dapat menyebabkan kanker (B/S)

Tentukan pernyataan berikut ini benar atau salah!

- a. Ditemukannya teknik kultur jaringan dikarenakan kebutuhan akan bibit tanaman yang bersifat unggul, seragam dan dalam jumlah banyak sehingga menghemat waktu, lahan dan biaya (B/S)
- b. Diterapkannya teknik DNA rekombinan pada tanaman padi biosalin I dan II karena untuk menghasilkan tanaman yang bergizi tinggi, adaptasi terhadap lingkungan yang berkadar garam tinggi serta responsif terhadap pupuk (B/S)
- c. Penerapan teknik hibridoma pada pembuatan *antibody monoclonal* diharapkan dapat mengenali berbagai antigen dan hanya melawan antigen tertentu (B/S)
- d. Pengujian kandidat vaksin fase tiga dengan sampel 1.000 - 5.000 orang karena tujuannya untuk memastikan keamanan, efektivitas, serta keuntungan yang melebihi risiko penggunaan dengan memantau respons kekebalan tubuh dan efek samping vaksin dalam jangka waktu tertentu (B/S)
- e. Penyuntingan gen dapat terjadi karena adanya enzim nuklease terekayasa dapat memotong bagian *double helix* DNA pada tempat tertentu, sedangkan enzim ligase akan menyambungkannya dengan gen tujuannya (B/S)

Tentukan pernyataan berikut benar atau salah!

- a. Produk tanaman dengan teknik kultur jaringan jika dikonsumsi dapat menimbulkan alergi dan keracunan sehingga dianggap melanggar bioetika (B/S)
- b. Kloning manusia yang mengubah sifat yang berbeda dari warisan sifat kedua orang tuanya tidak diijinkan oleh bioetika (B/S)

- c. Penyuntingan gen yang menghasilkan manusia yang tahan terhadap virus HIV dapat diterima secara etik untuk mencegah penyakit HIV (B/S)
- d. Penyuntikan hormon pertumbuhan dan antibiotik hasil rekayasa genetika melebihi dosis anjuran pada ayam pedaging merupakan tindakan yang kurang bertanggungjawab karena dapat menyebabkan alergi dan kebal pada antibiotik pada pengonsumsinya dalam jangka waktu yang panjang (B/S)
- e. Pemanfaatan insektisida dapat menyebabkan kekebalan pada hama dan alergi bagi yang mengkonsumsinya merupakan tindakan yang membahayakan kesehatan (B/S)

Pasar Bioteknologi di Era *Post Genomik*


Di era *post genomic*, setelah genom selesai disekuens untuk proses analisis dan identifikasi fungsi gen dan sebagainya, diperlukan *software* khusus. Semakin menumpuknya data genom makhluk hidup maka program untuk mengumpulkan, mensistemasi, dan melakukan anotasi atau identifikasi fungsi gen harus semakin canggih.

Produk teknologi baru bioinformatika mempunyai pasar yang menjanjikan untuk komersialisasi *software*. Selain permintaan produk teknologi untuk diagnostik lainnya yang muncul bersamaan dengan proyek genom, seperti DNA *chips*, DNA *microarray*, dan protein *microarray* berada pada kurva naik. Ke depan, perusahaan-perusahaan di bidang sekuensing dan analisis data genomik diramalkan akan bermetamorfosis menjadi industri farmasi (*farmacogenomica*). Hal ini dikarenakan analisis data genomik menjadi jalan pintas handal untuk penemuan obat, dibanding metode konvensional yang *try and error* dan *time-consuming*.

Pasar *era post genomik* ini memacu Jepang untuk unjuk gigi. Sumbangan Jepang untuk proyek genom manusia cukup signifikan. Sejak tahun 1997 sampai sekarang, sedikitnya Jepang menyumbangkan 12 spesies mikroba yang genomnya telah selesai dibaca. Selain itu, beberapa makhluk hidup tingkat tinggi, seperti padi dan sapi sedang dalam proses pembacaan. Untuk tahun 2010, Jepang menargetkan dapat menyelesaikan 100 mikroba yang genomnya selesai dibaca. Walaupun dalam penerapan komersialisasi hasil penelitian Jepang lebih lambat daripada Amerika Serikat, tetapi nampaknya ini hanya soal waktu saja.

Setelah membaca uraian di atas, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut!

1. Apakah uraian di atas menginspirasi kalian untuk melakukan inovasi teknologi terkait kesehatan dan lingkungan? Jika ya, bagian atau kalimat apakah yang menginspirasi?
2. Temukan dan rancanglah macam inovasi yang berbasis kecerdasan buatan untuk membantu memecahkan permasalahan di bidang kesehatan dan lingkungan?



*Mungkin hasil paling berharga
dari semua pendidikan adalah
kemampuan untuk melakukan hal
yang harus dikerjakan ketika hal itu
memang harus dikerjakan, entah
mereka menyukainya atau tidak.*

--Thomas Henry Huxley

● Glosarium

abiogenesis	paham yang menjelaskan munculnya kehidupan dari benda mati.
adaptasi	kemampuan makhluk hidup dalam penyesuaian diri terhadap kondisi lingkungan yang baru.
anabolisme	penyusunan zat dari senyawa/molekul sederhana menjadi senyawa kompleks yang membutuhkan energi.
apoenzim	bagian enzim yang tersusun atas protein.
ATP (<i>adenosine triphosphate</i>)	molekul yang membebaskan energi ketika ikatan fosfatnya terhidrolisis.
ATP sintase	enzim yang mengkatalis pembentukan ATP dari ADP dan fosfat.
aklimatisasi	suatu upaya penyesuaian fisiologis atau adaptasi dari suatu organisme terhadap suatu lingkungan baru yang akan dimasuki.
<i>artificial intelligence</i>	simulasi dari kecerdasan yang dimiliki manusia yang dimodelkan di dalam mesin.
antibodi monoklonal	antibodi yang spesifik mengenali satu antigen dan diproduksi dengan menggabungkan sel B (suatu sel imun) yang normal.
antibiotik	obat yang hanya diresepkan untuk melawan bakteri.
analogi	organ-organ tubuh yang mempunyai fungsi sama tetapi bentuk asalnya berbeda.
alel	gen-gen yang terdapat pada lokus yang bersesuaian.
antikodon	urutan tiga (3) basa yang merupakan komplemen dari kodon dan terdapat pada RNA-t.
amitosis	pembelahan sel yang terjadi secara spontan tanpa melalui tahap-tahap pembelahan sel.
biogenesis	paham yang menjelaskan munculnya kehidupan dari kehidupan sebelumnya.
biodegradasi	proses di mana bahan organik diuraikan oleh enzim yang dihasilkan oleh organisme hidup.
bioproses	cabang ilmu teknik yang menggarap proses-proses konversi biomassa tumbuhan, hewan, atau mikroorganisme melalui reaksi biokimia.
bioremediasi	proses penguraian limbah organik maupun anorganik polutan dari sampah dengan menggunakan organisme.
bioetika	ilmu pengetahuan untuk mempertahankan hidup dan terpusat pada penggunaan ilmu-ilmu biologis untuk memperbaiki mutu hidup.
bioinformatika	ilmu yang mempelajari penerapan teknik komputasional untuk mengelola dan menganalisis informasi.
bidang ekuator	pertengahan dari sel, garis horisontal.
<i>crossing over</i>	pindah silang yang memungkinkan terbentuknya rekombinan (kombinasi gen baru).
dekarboksilasi oksidatif	reaksi pembentukan Asetil KoA dari asam piruvat dengan melepaskan karbon dioksida dan NADH.
DNA	atau <i>deoxyribo nucleic acid</i> merupakan asam nukleat yang menyimpan semua informasi tentang genetika.
DNA templet	DNA cetakan dalam pembentukan molekul komplementer RNA-d.
<i>double helix</i>	pita ganda benang DNA yang saling komplemen.
diploid	keadaan sel yang kromosomnya berpasangan (2n).
enzim	zat yang berfungsi mempercepat reaksi, namun tidak mengalami perubahan selama reaksi sehingga dapat digunakan berulang.
evolusi	perubahan atau perkembangan pada makhluk hidup secara berangsur-angsur dalam kurun waktu yang lama.

fenotip	bentuk organisme yang dapat diamati merefleksikan pengaruh genetik dan lingkungan.
filial	keturunan yang diperoleh sebagai hasil dari perkawinan parental. Keturunan pertama disingkat F1, keturunan kedua disingkat F2, keturunan ketiga disingkat F3, dan seterusnya.
fermentasi	proses produksi energi dalam sel secara anaerob.
fotofosforilasi nonsiklik	proses perubahan energi cahaya (foton) menjadi ATP dan NADPH dengan air sebagai donor elektron dan melibatkan FS II dan FS I.
fotofosforilasi siklik	proses perubahan energi cahaya (foton) menjadi energi kimia (ATP) yang hanya melibatkan FS I.
fosforilasi oksidatif	proses konversi NADH dan FADH ₂ menjadi ATP yang terjadi melalui transpor elektron dan kemiosmosis dengan bantuan ATP sintase.
gonosom	kromosom yang menentukan jenis kelamin.
genom	rangkaian lengkap informasi genetik yang dimiliki oleh organisme.
gen	susunan genetik yang berisi perintah dan tersimpan dalam kumpulan pesan-pesan kimia yang berfungsi sebagai penentu sifat.
gen letal	gen yang dapat menyebabkan kematian dalam keadaan homozigotik.
genotip	susunan gen yang dimiliki individu.
gen dominan	gen yang mengekspresikan dirinya dalam fenotip ketika dipasangkan dengan gen dominan lainnya maupun gen resesif.
gen resesif	gen yang terekspresikan pada fenotip ketika berpasangan dengan gen resesif lainnya tetapi tidak dengan gen dominan.
gamet	sel haploid (sperma dan ovum) yang bersatu pada fertilisasi membentuk zigot.
<i>genetic drift</i>	kejadian acak yang mengubah distribusi dan frekuensi alel dalam suatu populasi.
<i>gene flow</i>	perpindahan alel dari satu populasi ke populasi lain, baik secara imigrasi atau emigrasi.
<i>gene pool</i>	kumpulan total gen dalam sebuah populasi.
glikolisis	serangkaian reaksi kimia yang memecah molekul glukosa menjadi 2 molekul asam piruvat.
gen intermediet	gen yang pengaruhnya sama kuat dengan alelnya.
gametogenesis	proses pembentukan gamet/sel kelamin.
gelendong pembelahan	disebut juga benang spindel, yaitu struktur berbentuk seperti benang-benang yang menghubungkan kutub-kutub pembelahan.
haploid	sifat kromosom yang tidak berpasangan.
heterozigot	zigot dengan dua alel yang berbeda untuk ciri tertentu.
homozigot	zigot dengan alel yang identik untuk ciri tertentu.
hibrid	individu atau keturunan hasil persilangan induk dengan susunan gen berbeda.
hibridoma	teknologi penggabungan antara sel limfosit dengan sel kanker.
homologi	organ-organ makhluk hidup yang memiliki bentuk asal yang sama, kemudian berubah strukturnya sehingga memiliki fungsi yang berbeda.
inhibitor	zat-zat yang berfungsi menghambat biasanya pada kerja enzim.
interfase	sel dalam keadaan istirahat dari proses pembelahan, namun mempersiapkan pembelahan dengan mengadakan replikasi DNA.
interkinesis	tahap di antara dua pembelahan meiosis.
katabolisme	desimilasi yang merupakan rangkaian reaksi kimia yang berkaitan dengan proses pembongkaran, penguraian atau pemecahan molekul/senyawa kompleks menjadi molekul/senyawa yang lebih sederhana dengan bantuan enzim.

kemiosmosis	peristiwa perpindahan ion H ⁺ menuruni gradien konsentrasinya melalui ATP sintase.
koenzim	molekul organik yang menyusun bagian nonprotein dari sebuah enzim.
kofaktor	molekul anorganik yang menyusun bagian nonprotein dari sebuah enzim.
kromosom	benang-benang dalam inti sel yang mampu menyerap warna dan pembawa sifat menurun.
kromosom homolog	pasangan kromosom yang memiliki gen dan lokus yang sama.
kodominan	alel yang tidak seluruhnya dapat menutupi ekspresi alel resesif.
kultur jaringan	teknologi untuk memperoleh bibit unggul dengan cara menumbuhkan sebagian jaringan tumbuhan pada media khusus.
kloning	proses pembiakan vegetatif atau kultur jaringan pada hewan dan manusia.
kariokinesis	pembagian inti.
kromatin	benang-benang halus penyusun kromosom, yang memiliki kemampuan menyerap zat warna.
kromatid	belahan kromosom yang terjadi karena adanya duplikasi.
lokus	letak atau tempat gen dalam kromosom.
meiosis	pembelahan sel yang menghasilkan empat sel anakan yang masing-masing sel anakan mengandung separuh kromosom dari kromosom induknya.
mitosis	pembelahan sel yang menghasilkan dua sel anakan dan setiap sel anakan mengandung jumlah kromosom yang sama dengan kromosom induknya.
NADH	koenzim yang berfungsi sebagai pengangkut elektron universal, terbentuk dari NAD ⁺ (<i>nicotinamide adenine dinucleotide</i>) yang mengikat elektron berenergi tinggi (e ⁻) dan satu proton (H ⁺) dari hasil reaksi pembongkaran ikatan kimia pada zat makanan.
NADPH	koenzim yang berfungsi sebagai pengangkut elektron, terbentuk ketika NADP ⁺ (<i>nicotinamide adenine dinucleotide phosphate</i>) menerima elektron dan proton membentuk NADPH.
nukleosida	nukleotida yang kehilangan satu unsur penyusunnya.
nukleotida	unit terkecil penyusun DNA atau RNA yang tersusun atas molekul gula (deoksiribosa, basa nitrogen dan asam fosfat).
<i>nondisjunction</i>	peristiwa gagalnya satu kromosom atau lebih untuk berpisah ke arah kutub yang berlawanan pada saat meiosis I maupun meiosis II.
oogenesis	proses pembentukan ovum.
pautan	peristiwa dua gen atau lebih yang terletak pada kromosom yang sama dan tidak dapat memisah secara bebas pada waktu pembelahan meiosis.
replikasi	proses penggandaan DNA menjadi dua DNA yang identik.
reaksi terang	tahap fotosintesis yang menggunakan energi cahaya untuk membentuk ATP dan NADPH.
reaksi gelap	tahap fotosintesis yang berfungsi membentuk zat makanan menggunakan energi yang dihasilkan pada reaksi terang.
respirasi aerob	proses pembentukan energi (ATP) dari zat makanan yang membutuhkan oksigen.
respirasi anaerob	proses pembentukan energi (ATP) dari zat makanan tanpa menggunakan oksigen.
respirasi seluler	proses pembentukan energi (ATP) dari zat makanan.
rubisco	enzim yang diperlukan untuk menggabungkan ribulosa bifosfat (RuBP) dengan karbon dioksida pada reaksi gelap (siklus Calvin).

RuBP (<i>ribulose biphosphate</i>)	molekul yang berfungsi mengikat CO ₂ pada siklus Calvin (reaksi gelap).
rekayasa genetika	usaha manusia menciptakan varietas baru dengan teknologi memotong dan menyambung gen.
reduksi	terjadinya pengurangan atau penyusutan jumlah kromosom.
rekombinansi DNA	proses transfer segmen DNA dari satu organisme ke DNA organisme lain.
sentromer	bagian kromosom yang yang membagi kromosom menjadi dua lengan.
seleksi alam	perbedaan kemampuan untuk hidup dan bereproduksi dari suatu individu yang diakibatkan oleh perbedaan kecocokan fenotipe yang dimiliki organisme tersebut dengan lingkungan.
siklus asam sitrat	siklus yang diawali terbentuknya asam sitrat, terdiri atas reaksi-reaksi kimia untuk mengurai asetil KoA menghasilkan NADH, FADH ₂ , dan ATP dengan menghasilkan produk sampingan berupa CO ₂ .
siklus Krebs	tahap kedua dari tahapan respirasi sel, yang diawali dengan proses glikolisis.
sterilisasi	upaya untuk membunuh mikroorganisme termasuk dalam bentuk spora.
<i>stem cell</i>	sel yang belum memiliki fungsi khusus sehingga dapat mengubah, menyesuaikan, dan memperbanyak diri bergantung lokasi sel tersebut berada.
sitokinesis	pembelahan sitoplasma yang diikuti pembentukan sekat sehingga memisahkan dua inti menjadi dua sel anakan.
spermatogenesis	proses pembentukan sperma.
transpor elektron	tahap akhir respirasi aerob di mana elektron-elektron yang berasal dari NADH dan FADH ₂ dipindahkan melalui rantai transpor elektron untuk dikonversi menjadi ATP, hingga akhirnya diterima oleh akseptor elektron yang terakhir, yaitu oksigen.
transkripsi	proses pencetakan RNAd oleh benang DNA.
translasi	proses penerjemahan kodon menjadi asam amino oleh RNA-t pada sintesis protein.
tumbuhan C ₃	tumbuhan yang menghasilkan molekul berkarbon tiga pada proses fiksasi karbon, salah satu fase selama siklus Calvin.
tumbuhan C ₄	tumbuhan yang menghasilkan molekul berkarbon empat pada proses fiksasi karbon, salah satu fase pada siklus Calvin.
tumbuhan CAM (<i>crassulacean acid metabolism</i>)	tumbuhan yang melakukan fiksasi karbon dioksida pada malam hari karena stomata menutup pada siang hari.
tetrad	bentuk ikatan dari kromatid karena kromosom homolog mengganda, terdiri atas empat kromatid pada satu sentromer.
vaksin	bibit penyakit yang dilemahkan atau dimatikan yang bertujuan untuk memperoleh imunitas.

● Daftar Pustaka

- Albert, B dkk. (2008). *Molecular Biology of the Cell Garland Science*. New York: Francis Group.
- Arifin, Husnul. (2017). *The Origin of Species: Asal Usul Makhluk Hidup/ Charles Darwin*. Yogyakarta: Narasi.
- Ariningsih, E. (2016). "Prospek Penerapan Teknologi Nano dalam Pertanian". Forum Penelitian Agro Ekonomi.
- Campbell dkk. (2010). *Biologi (edisi 8, Jilid 1)*. Jakarta: Erlangga.
- De Vicente, C.M. (2005). *Issues on Gene Flow and Germplasm Management*. Rome: IPGRI.
- Dinata, Deden Indra. (2017). *Bioteknologi Pemanfaatan Mikroorganisme dan Teknologi Bioproses*. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EKG.
- Ernst, Mayr. (2005). *Evolusi: Dari Teori ke Fakta*. Jakarta: Gramedia.
- Henuhili, V. (2008). *Genetika dan Evolusi*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hikmah, R. (2017). *Bioteknologi*. Surakarta: Azka Presindo.
- Irwandi. (2020). *Strategi Pembelajaran Biologi*. Bandung: Pustaka Reka Cipta.
- Johnson, Reaven. (2003). *Biology, USA: McGraw Hill-Highger Education*. Inc.
- Jones, M. and G. Jones. (2004). *Biology (3th ed)*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jones, Mary dkk. (2007). *Biology*. New York: Cambridge University Press.
- Kolbert, E. (2020). *The sixth extinction*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Kusmaryanto. (2008). *Human Cloning An Ethical Approach*. Yogyakarta: Dehonian Press.
- Mackean, D.G. (2004). *Biology*. London: Hooder Murray.
- Mader, S.S. (2002). *Biology*. New York. McGraw-Hill Companies,
- Mardani, Yusuf dan Agus Krisno B. 2010. *Penggunaan Stem Cell dalam Bidang Ilmu Kedokteran*. Malang: Universitas Muhammadiyah Malang.
- Marx, Jean L. (1991). *Revolusi Bioteknologi*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Masson dkk. 2017. *Biology (11th ed)*. New York: McGraw-Hill Education.
- Mushoffa, Aziz. Imam Musbikin. (2001) *Kloning Manusia Abad XXI, Antara Harapan, Tantangan dan Kenyataan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Pickering, W.R. (2000). *Complete Biology*. Inggris: Oxford University Press.
- Setiowati, Retno Diah dkk. (2013). *Klon Kelapa Sawit Mengenal Bahan Tanaman Kelapa Sawit Hasil Kultur Jaringan*. Medan Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Siteoe, Mangku. (2001). *Rekayasa Genetika*. Jakarta: Grasindo.
- Starr, C. (2006). *Basic Concepts in Biology*. Australia: Thomson.
- Starr, C., Taggart, R. (2004). *Biology: The Unity and Diversity of Life*. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Suryo. (1992). *Genetika (cetakan ke-5)*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Urry dkk. (2021). *Biology (12th ed)*. New York: Pearson Education inc.

Tautan Internet

- Agroponikpedia. Apa Itu Tanaman Transgenik? Diunggah oleh Agroponikpedia. 24 Agustus 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=qI8xHpcxfnA>
- Agrotani. Asal Usul Sejarah Hidroponik yang Terlupakan. Diunggah oleh Agrotani. 7 Juli 2019. Dari <https://www.youtube.com/watch?v=1lCyrIqlyWc>
- Agrozine ID. Mengenal Teknik Kultur Jaringan Tanaman. Diunggah oleh Agrozine. 3 November 2021. Dari <https://www.youtube.com/watch?v=qBB51meS4Cs>

- CNNIndonesia. (2020). Studi: Gen Buat Orang Korea Tak Bau Badan. Diunduh pada 22 Oktober 2022. Dari <https://www.cnnindonesia.com/gaya-hidup/20200721085713-277-526974/studi-gen-buat-orang-korea-tak-bau-badan>
- Cornell, B. (2016). *Metabolism*. Diakses pada 21 Juli 2022 dari <http://ib.bioninja.com.au>.
- Corner, Kesling. Pengolahan Anaerobik Air Limbah. Diunggah oleh Kesling Corner. 12 Juli 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=TJiKvw1q1zs>
- DAAI TV, Bumiku Satu. Bioremediasi Limbah Minyak Bumi. Diunggah oleh Bumiku Satu DAAI TV. 12 Januari 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=AvWCwbaepS4>
- Firdausi, Fadrik Azis. (2018). Ilmuwan Cina Rekayasa DNA Bayi untuk Cegah HIV, Etiskah? Dari <https://tirto.id/daBP>
- Hananto, A. (2018, 30 Januari). Zhong Zhong dan Hua Hua, Monyet Hasil Kloning Ini Akan Hidup Menderita?. Diakses pada 11 Juli 2022 dari <https://www.mongabay.co.id/2018/01/30/zhong-zhong-dan-hua-hua-monyet-hasil-kloning-ini-akan-hidup-menderita/>
- KompasTV. Beda Vaksin Covid-19: Nusantara & Merah Putih. Diunggah oleh KompasTV. 2 Maret 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=628XpPiTdN4>
- Kurnia, IGA Maya. (2015, 6 April). Kultur Jaringan pada Pisang. Diakses pada 10 Juli 2022 dari <https://distan.bulelengkab.go.id/informasi/detail/artikel/kultur-jaringan-pada-pisang-35>.
- Maftuha, Lilis dkk. (2018). KLONING BIOTEKNOLOGI Program Studi Pendidikan Biologi. Dari <https://slideplayer.info/slide/13218597/>
- Manis, Si. (2022). Pengertian Kloning, Jenis-Jenis dan Manfaat Kloning Terlengkap. Dari <https://www.pelajaran.co.id/pengertian-kloning-jenis-jenis-dan-manfaat-kloning/>
- Milanisti, Cha. (2015). Teknologi DNA Rekombinan. Dari <https://slideplayer.info/slide/2859535/>
- Newsroom, Narasi. Memahami Antibodi Monoklonal: Harapan Baru untuk Terapi COVID-19. Diunggah oleh Narasi Newsroom. 7 Februari 2021. https://www.youtube.com/watch?v=9eQ3_px_bU8
- Nurhasna, Azizah Fitria. (2018). Penggunaan Stem Cell sebagai Aplikasi Biologi Sel dalam Bidang Kesehatan dan Kefarmasian. Dari <https://www.kompasiana.com/azizahfitria/5bf84bdaeebe118bf4c64f5/penggunaan-stem-cell-sebagai-aplikasi-biologi-sel-dalam-bidang-kesehatan-dan-kefarmasian>
- Official, Sains Terapan. Media dan Zat Pengatur Tumbuh Kultur Jaringan. Diunggah oleh Sains Terapan Official. 2 Juni 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=raFwpC9Cvpk>
- Sari, Isnaini Permata dan Yunita Siti Mardhiyyah. (2020). Kajian Literatur: Potensi Pemanfaatan Protein Tempe Non-Kedelai. Dari <https://uisi.ac.id/assets/upload/media/7fe6c2beb8317acc05b9a305e90769dc.pdf>
- Sukmawati, Ni Made Suci. (2015). *Bioinformatika*. Laboratorium Biokimia Fakultas Peternakan Universitas Udayana. Dari https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_dir/d6dda88bc5abde5f564d24aaa7bda351.pdf.
- Sumartiningtyas, Holy Kartika Nurwigati. (2021, 12 Januari). Efikasi Vaksin Sinovac 65,3 Persen, Bagaimana Cara Menghitungnya?. Diakses pada 13 Juli 2022 dari <https://www.kompas.com/sains/read/2021/01/12/135000423/efikasi-vaksin-sinovac-653-persen-bagaimana-cara-menghitungnya?page=all>.
- Yusman, Arini. Membuat Media Dasar MS0: Media Kultur Jaringan. Diunggah oleh Arini Yusman. 19 November 2019. https://www.youtube.com/watch?v=F3xDBN_aEwo

Indeks

A

abiogenesis 239, 249
adaptasi 239, 249
aklimatisasi 239, 249
alel 239, 241, 242, 249
amitosis 239, 249
anabolisme 2, 3, 15, 16,
239, 249
anafase 249
analogi 239, 249
antibodi monoklonal 239,
249
antikodon 239, 249
apoenzim ix, 5, 50, 239,
249
artificial intelligence 239,
249
ATP 14, 15, 16, 17, 18, 20,
21, 23, 25, 27, 28, 30, 31,
36, 37, 38, 39, 47, 48, 51,
52, 53, 239, 240, 242,
243, 244, 249, 253

B

bidang ekuator 240, 249
bioetika 239, 249
biogenesis 239, 249
bioproses ix, 239, 249
bioremediasi 239, 249

C

crossing over 240, 249

D

dekarbosisasi oksidatif
249
diploid 240, 249
DNA 240, 241, 242, 243,
244, 246, 247, 249, 252
double helix 240, 249

E

enzim ix, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,
8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,
15, 16, 20, 22, 24, 25,
36, 39, 46, 47, 50, 51, 52,
239, 240, 241, 242, 243,
249, 253
evolusi iv, 240, 249

F

fenotip 240, 241, 250
fermentasi 2, 17, 29, 30,
31, 53, 240, 250, 253
filial 240, 250
fosforilasi oksidatif 51, 53,
240, 250
fotofosforilasi nonsiklik
34, 36, 37, 240, 250
fotofosforilasi siklik 36,
37, 240, 250

G

gamet 241, 250
gametogenesis 241, 250
gelendong pembelahan
241, 250
gen iv, 239, 240, 241, 242,
243, 250
gen dominan 241, 250
gene flow 241, 250
genetic drift 241, 250
gen intermedier 250
genom 240, 250
genotip 241, 250
gen pool 250
gen resesif 241, 250
gonosome 250

H

haploid 241, 250
heterozigot , 241, 250
hibrid 241, 250
hibridoma 241, 250
homologi 241, 250
homozigot , 241, 250

I

inhibitor ix, 6, 13, 14, 50,
250, 253
interfase , 241, 250
interkinesis 241, 250

K

kariogenesis 251
katabolisme 2, 4, 15, 16,
241, 251
katalisator 4, 8, 52, 251
kemiosmosis 25, 27, 36,
37, 240, 242, 251
kloning 242, 246, 247, 251
kodominan 242, 251
koenzim ix, 5, 20, 25, 50,
242, 251
kofaktor ix, 5, 50, 242, 251
kromatid 242, 244, 251
kromosom 240, 241, 242,
243, 244, 251
kromosom homolog , 242,
244, 251
kultur jaringan 242, 251

L

lokus 239, 242, 251

M

meiosis 241, 242, 243, 251
metafase 251
mitosis 242, 251

N

NADH 20, 21, 22, 23, 25,
26, 27, 30, 51, 52, 53,
240, 242, 243, 244, 251
NADPH 36, 37, 38, 39, 48,
53, 240, 242, 243, 251
non disjunction 251
nukleosida 242, 251
nukleotida , 242, 251

O

oogenesis , 243, 251
ovum , 241, 243, 251

P

pautan 243, 251
pindah silang , 240, 251
plantlet 252
profase 251
prometafase 251

R

reaksi gelap 33, 37, 38, 39,
243, 252, 253
reaksi terang 2, 33, 34, 35,
37, 38, 39, 40, 46, 48, 53,
243, 252, 253

reduksi , 30, 38, 39, 53,
243, 252
rekayasa genetika , 243,
252
rekombinasi DNA 252
replikasi , 241, 243, 252
respirasi 2, 4, 7, 15, 16, 17,
18, 19, 25, 27, 28, 30,
31, 32, 47, 51, 243, 244,
252, 253
respirasi aerob 252
respirasi anaerob 17, 243,
252
respirasi seluler 2, 243,
252
rubisko 252

S

seleksi alam 243, 252
sentromer , 243, 244, 252
siklus asam sitrat 18, 23,
51, 52, 243, 252
siklus Krebs 18, 23, 24, 25,
28, 243, 252
sitokinesis , 244, 252

spermatogenesis , 244,
252
stem cell 244, 252
sterilisasi 243, 252

T

telofase 252
tempe 252
tetrad , 244, 252
transkripsi , 244, 252
translasi , 244, 252
transpor elektron 18, 25,
26, 27, 28, 35, 240, 244,
252
tumbuhan C3 47, 48, 244,
252
tumbuhan C4 244, 252
tumbuhan CAM 47, 244,
252

U

usar 252

V

vaksin 244, 247, 253
variabel 16, 28, 32, 40, 253

PROFIL PELAKU PERBUKUAN

● Profil Penulis

Shilviani Dewi, S.Pd

Email : shilviani.dewi@gmail.com
Bidang Keahlian : Guru Biologi

Riwayat Pekerjaan

1. 2011 – 2015: Staf Surya Institute
2. 2015 – 2016: Guru Biologi Sekolah Kharisma Bangsa
3. 2016 – 2020: Guru Biologi Sekolah Insan Cendikia Madani
4. 2020 – sekarang: Guru Biologi di SMA Negeri 47 Jakarta

Riwayat Pendidikan

S1 program pendidikan Biologi di Universitas Negeri Jakarta



Amalia Shari, S.Pd., M.Biomed

Email : amaliashari.aretadena@gmail.com
Bidang Keahlian : Biologi/ Biologi Molekuler, Andrologi dan Bakteriologi

Riwayat Pekerjaan

- 2016 – 2020 : Dosen prodi D4 Teknologi Laboratorium Medis Universitas Binawan
- 2020 – sekarang : Dosen prodi D4 Teknologi Laboratorium Medis dan staf LPPM Politeknik Kesehatan Hermina

Riwayat Pendidikan

S1 Pendidikan Biologi, Universitas Negeri Jakarta (2006-2010)
S2 Biologi Kedokteran, Universitas Indonesia (2012-2015)

Judul Buku yang Ditulis

1. Modul Praktikum Instrumen Media dan Reagensia (2022)
2. Patologi Gerak dan Sendi (2022)
3. Petunjuk Praktikum Hematologi Dasar (2022)



Rani Eliza Purba, S.Pd, B.Ed.

Email : ranirlisaelpurba@gmail.com
Instansi : SMA
Alamat Instansi : SMP Methosit Pelita Kasih Medan
Bidang Keahlian : Biologi



Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir):

1. Guru Mapel Biologi di Sekolah Lentera Harapan Nias (2018–2021)
2. Guru Mapel Biologi di Sekolah Tunas Harapan Bogor (2021 – 2022)
3. Guru Mapel Biologi di SMP Methodist Pelita Kasih Medan (2022 – sekarang)
4. Guru Mapel Kimia di SMA Methodist Pelita Kasih Medan (2022 – sekarang)

Riwayat Pendidikan

S1 Pendidikan Biologi Universitas Pelita Harapan (2014 – 2018)

Judul Buku yang Ditulis

Antologi Puisi Mimpi-Mimpi Cinta Pertama

Remigius Gunawan Susilowarno

Email : gsusilowarno1@gmail.com
Instansi : SMA BUDI UTAMA YOGYAKARTA
Alamat Instansi : Jalan Wijaya Kusuma 121 Siduadi Mlati Sleman DIY
Bidang Keahlian : Biologi dan Penelitian dan Evaluasi Pendidikan



Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir):

1. Guru Biologi SMA Budi Utama Yogyakarta (2015-sekarang)
2. Guru SMA Stella Duce 1 Yogyakarta (1991 – 2015)
3. Dewan Pembina Yayasan Sagasitas (2017 – sekarang)
4. Predium Asosiasi Guru Pembimbing Penelitian Indonesia (AGPPI) Tingkat Pusat (2013 – 2019)
5. Sekjen AGPPI/FPPBI (2019 – sekarang)
6. Dewan Pembina MGPPK DIY (2018 – sekarang)
7. Dewan Pembina MGPPK Kabupaten Sleman (2019 – sekarang)
8. Manager Akademik Bimbel YSC Yogyakarta (2010 – 2012)
9. Sekretaris Jaringan Peleitian Pendidikan Kota Yogyakarta (JP2KY) 2008 - 2012
10. Ketua II Musyawarah Guru Pengembang Penelitian (MGPP) Kota Yogyakarta (2011 – 2015)
11. Presedium Asosiasi Guru Pembimbing Penelitian Indonesia (AGPPI) Tingkat Pusat (2013 – 2020)
12. Tim Redatur/Editor Jurnal Ilmiah Penelitian Sagasitas Yogyakarta (2010 – 2020)
13. Tim Redaktur/Editor Jurnal Ilmiah Pendidikan PIAWAI Yogyakarta (2014 – 2015)

Riwayat Pendidikan dan Tahun Belajar:

S1 Pendidikan Biologi, FPMIPA IKIP Yogyakarta (1988 – 1993)

S2 Penelitian dan Evaluasi Pendidikan Universitas Sarjana Wiyata Taman Siswa (2009-2012)

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. KIR DAN PETUNJUK MEMBIMBING DAN MENELITI REMAJA, PT.Grasindo, Jakarta, 2003
2. BIOLOGI SMA 1A,1B, 2A,2B,3A,3B, PT. Grasindo, Jakarta, 2005
3. BIOLOGI SMA X.XI IPA, XII IPA, PT. Grasindo Jakarta, 2007
4. CARA MUDAH MENGHADAPI UJIAN NASIONAL BIOLOGI, PT. Grasindo, Jakarta 2008.2009, 2010,2011, 2012.2013, 2014
5. STRATEGI JITU MENGHADAPI TPA SNPTN, PT. Grasindo Jakarta, 2013
6. TPA MENUJU PTN, PT. Grasindo Jakarta, 2015
7. GURU BAGI PENELITI BELIA, Candra Ide Cemerlang, Yogyakarta 2019
8. JEJAK HATI PAK GURU, Candra Ide Cemerlang, Yogyakarta 2022

● Profil Penelaah

Endang Semiarti

Email : endsemi@ugm.ac.id
Bidang Keahlian : Biologi/Kultur Jaringan Tumbuhan/
Bioteknologi Tumbuhan

Riwayat Pekerjaan

1 Maret 1988 – sekarang : Dosen Fakultas Biologi UGM

Riwayat Pendidikan

S1: Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada (1981-1986)

S2: Jurusan Ilmu-ilmu MIPA, Fakultas Pasca Sarjana UGM (1987-1989)

S2: Graduate School of Science, Nagoya University, Japan (Major in Biological Science) (1996-1998)

S3: Graduate School of Science, Nagoya University, Japan (Major in Biological Science) (1998-2001)

Judul Buku yang pernah ditulis:

1. Ari Wijayani and Endang Semiarti. Pesona Anggrek Vanda. PT, Kanisius, Yogyakarta. (2009)
2. Semiarti E., Indrianto A., Purwantoro A., Machida Y. and Machida C. Agrobacterium-mediated Genetic Transformation of Indonesian Orchids for Micropropagation. A Chapter in: Scientific e-book Genetic Transformation, ISBN 978-953-307-364-4, ed by M.Alvarez, InTech-Open Publisher, <http://www.intechweb.org/>. (2011)
3. Purnomo, Trijoko, R.P. Sancayaningsih, et al. (2015). Pengelolaan Ekosistem DAS Di Kabupaten Gianyar

4. Semiarti E., Purwantoro A., and Sari I.P. (2022). Biotechnology Approaches on Characterization, Mass Propagation, and Breeding of Indonesian Orchids *Dendrobium lineale* (Rolfe.) and *Vanda tricolor* (Lindl.) with Its Phytochemistry. A chapter in: *Orchids Phytochemistry, Biology and Horticulture*. Springer Nature Switzerland. eBook ISBN: 978-3-030-38392-3, Print ISBN: 978-3-030-38391-6 https://doi.org/10.1007/978-3-030-11257-8_12-1, <http://link-springer-com-443.webvpn.fjmu.edu.cn/referencework/10.1007/978-3-030-11257-8>
5. Purwantoro A., Purwestri Y.A., Lawrie M.D., and E. Semiarti (2022). Genetic transformation via plant tissue culture techniques: Current and future approaches. A Chapter in: *Advances In: Plant Tissue Culture Current Developments and Future Trends*, ISBN: 978-0-323-90795-8 Edited by A.C. Rai, A. Modi, M.Singh, Academic Press, UK, Elsevier Inc. P. 131-156. <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
6. Semiarti E., Purwestri Y.A., Rohman S., and Putri W.A. (2022). Genetic Transformation in Prokaryotic and Eukaryotic Cells. A Chapter in: *Molecular Cloning*. IntechOpen Ltd., DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.103839>

Widi Purwianingsih

Email : widipurwianingsih@upi.edu
 Bidang Keahlian : Pembelajaran Biologi/Pembelajaran IPA

Riwayat Pekerjaan

Dosen/Staf Pengajar di Prodi Pendidikan Biologi dan Sekolah Pasca Sarjana Universitas Pendidikan Indonesia.

Riwayat Pendidikan

1. S1 Fisiologi Tumbuhan, Institut Teknologi Bandung, tahun lulus 1985
2. S2 Biologi Fungsi, Institut Teknologi Bandung, tahun lulus 1997
3. S3 Pendidikan IPA, Universitas Pendidikan Indonesia, tahun lulus 2011

Judul Buku/Artikel yang pernah ditulis:

1. Pemanfaatan ekstrak kalus *Morinda citrifolia* (Mengkudu) sebagai Biopestisida terhadap *Bactrocera dorsalis* Hend. (2013)
2. Implikasi pendidikan karakter berbasis budaya Islam terhadap prestasi belajar Biologi dan karakter siswa SMA. (2013)
3. Programe Development for Debriefing of Biotechnology Pedagogical Content Knowledge (PCK) through lecture Kapita Selektta Biologi SMA. (2013)
4. Implikasi pendidikan karakter berbasis budaya Islam terhadap prestasi belajar Biologi dan karakter siswa SMA. (2013)
5. Efektivitas Penggunaan Peta Konsep sebagai strategi pembelajaran dan alat evaluasi untuk meningkatkan penguasaan konsep siswa SMP pada materi sistem ekskresi. (2014)
6. Analisis hubungan antara habits of mind dan hasil belajar biologi siswa kelas XII SMA Kota Bandung. (2014)

7. Profil Kemampuan PCK calon guru Biologi sebelum mengikuti perkuliahan Perencanaan Pembelajaran. (2014)
8. Kemampuan PCK guru Biologi dalam mengajarkan materi sistem hormon. (2014)
9. Formation flavonoid secondary metabolites in callus culture of *Chrysanthemum cinerariofolium* as alternative provision medicine. (2015)
10. Upaya Pelestarian tanaman edelweiss (*Anaphalis javanica*) dengan metode kultur jaringan. (2016)
11. Formation flavonoid secondary metabolites in callus culture of *Chrysanthemum cinerariofolium* as alternative provision medicine. (2016)
12. Integration Of Reasoning and Wellbeing on the Lesson Plan and Implementation in Learning. (2017)
13. Teachers ability to integrate reasoning and student wellbeing in Pedagogical Content Knowledge. (2017)
14. Genetic Pedagogical Content Knowledge (PCK) Ability Profile of Prospective Biology teacher. (2017)

Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 tahun terakhir)

1. Improving students communication skills in Biology (A classroom research of implementation of lesson study in SMPN 1 Tanjungsari Kabupaten Sumedang). Penelitian Mandiri, tahun 2009.
2. Pemanfaatan Ekstrak Kunyit (*Curcuma domestica Val*) sebagai Biofungisida. Penelitian Hibah Bersaing, tahun 2009.
3. Program Pembekalan Kemampuan Pedagogical content Knowledge (PCK) Bioteknologi melalui Penguasaan konsep-konsep dasar, bagi mahasiswa calon guru Biologi. (Penelitian Hibah Doktor, DIKTI, 2010).
4. Penelitian disertasi berjudul Pengembangan Program Pembekalan Pedagogical Content Knowledge (PCK) Bioteknologi melalui Perkuliahan Kapita Selektta Biologi SMA. (Disertasi didanai oleh BPPS dan Hibah Doktor DIKTI, th 2010-2011).
5. Pembekalan Pedagogical Content Knowledge (PCK) calon guru biologi melalui perkuliahan Kapita Selektta (2013) (Didanai Dana BOPTN DIKTI, skim Penelitian PPKBK, 50 juta)
6. Pemanfaatan Rimpang Kunyit (*Curcuma domestica Val.*) sebagai Biofungisida dalam penghambatan sporulasi jamur *Colletotricum gloeosporioides Pnz.* dan *Fusarium oxysporum Schlecht.* (2013) . Didanai Dana Hibah Bersaing Dikti.
7. Pembentukan metabolit sekunder flavonoid pada kultur kalus *Chrysanthemum cinerariofolium* sebagai alternatif penyediaan bahan obat tahun 1. Didanai Hibah Bersaing Dikti 2015.
8. Pembentukan metabolit sekunder flavonoid pada kultur kalus *Chrysanthemum cinerariofolium* sebagai alternatif penyediaan bahan obat tahun 2. Didanai Hibah Bersaing Dikti 2016.
9. Upaya Pelestarian tanaman edelweiss (*Anaphalis javanica*) dengan metode kultur jaringan. Dana mandiri 2016. (Widi,Dini, Kusdianti)
10. Pembentukan Senyawa Obat Quercetin pada Kultur Kalus *Chrysanthemum cinerariofolium*, Seminar Nasional Biologi dan pembelajarannya, UIN Bandung 2017

● Profil Ilustrator

Hasbi Yusuf

Email : abi.yusuf09@gmail.com

Bidang Keahlian : Desainer

Riwayat Pekerjaan

1. Desainer & Ilustrator RSL Award
2. Desainer & Ilustrator SD Menara St. Martinus Makasar

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. 2020 Buku Panduan Guru Seni Musik untuk SMP Kelas VII
2. 2021 Buku Panduan Guru Seni Musik untuk SD Kelas IV
3. 2021 Buku Panduan Guru Seni Musik untuk SMP Kelas VIII
4. 2021 Buku Guru Matematika Tingkat Lanjut SMA Kelas XII
5. 2021 Matematika Tingkat Lanjut SMA Kelas XII
6. 2021 Geografi SMA Kelas XI
7. 2021 Buku Panduan Guru Geografi SMA Kelas XI
8. 2022 Dasar-Dasar Kuliner Semester 1 SMK Kelas X



● Profil Editor

Dwi Pajar Ratriningsih

Email : sifa.february@gmail.com

Bidang Keahlian : Biologi

Riwayat pekerjaan/profesi (10 Tahun Terakhir)

1. April 2013 – sekarang penulis dan editor freelance
2. Maret 2010 – April 2013 Editor di PT Puspa Swara
3. April 2008 – Maret 2010 Editor dan penulis di PT Zikrul Hakim

Riwayat Pendidikan

S1 : Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada (2001-2006)

Judul Buku yang pernah Disunting dalam 5 Tahun Terakhir:

1. Buku Panduan Guru Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial untuk SD Kelas IV (2021);
2. Buku Panduan Guru Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial untuk SD Kelas V (2021);
3. Buku Panduan Guru Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial untuk SD Kelas VI (2021);
4. Buku Siswa Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial untuk SD Kelas IV (2021);
5. Buku Siswa Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial untuk SD Kelas V (2021);
6. Buku Siswa Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial untuk SD Kelas VI (2021);
7. Buku Teks Peminatan Biologi untuk SMA/MA Kelas X (2019);
8. Buku Teks Pelajaran Program Keahlian: Dasar Keamanan Pangan untuk SMK/MAK Kelas X;



9. Buku Teks Pelajaran Program Keahlian Keperawatan: Anatomi dan Fisiologi untuk SMK/MAK Kelas X (2019);
10. Buku Evaluasi Tematik: BETA untuk SD/MI Kelas VI (2018); dan
11. Buku Pembelajaran Tematik Terpadu: Peduli terhadap Makhluk Hidup untuk SD/MI Kelas IV (2017).

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. Buku Pintar Dana Desa: Dana Desa untuk Kesejahteraan Rakyat (2022);
2. Buku Pengayaan Pengetahuan Tingkat SMP/MTs: Alat Transportasi di Ibukota dari Masa ke Masa (2020);
3. Buku Pengayaan Pengetahuan Tingkat SMP/MTs: Ensiklopedi Batik Nusantara (2020);
4. Buku Pengayaan Pengetahuan Tingkat SMP/MTs: Mengenal Kain Nusantara (2020);
5. Budidaya Udang Vaname yang Menguntungkan (2020);
6. Buku Pengayaan Mengenal Toga Buah dan Biji (2020);
7. Buku Pengayaan Mengenal Toga Bunga (2020);
8. Buku Pengayaan Budidaya Jamur (2019);
9. Buku Teks Pelajaran Biologi untuk SMP kelas IX (2019);
10. Buku Pengayaan Bisnis Cabai Hias (2018);
11. Ensiklopedi Napza: Zat Adiktif Jenis-jenis dan Kandungannya (2016);
12. Dongeng Interaktif: Boneka Pemecah Kacang vs Raja Tikus (2014);
13. Ensiklopedia Penemuan Terhebat Ilmuwan Muslim (2013);
14. Catatan Sains Hebat (2013);
15. Pelangi, Tornado, Gerhana & 25 Fenomena Alam Lainnya yang Perlu Kamu Ketahui (2012);
16. 35 Cerita Sains (2012);
17. Buku Pintar Matematika seri Intermediate (2012); dan
18. Buku Pintar Matematika seri Basic (2011).

Arifah Dinda Lestari

Email : arifahdinda89@gmail.com

Bidang Keahlian : Biologi

Riwayat pekerjaan/profesi (10 Tahun Terakhir)

Januari 2018 – sekarang: Analis Penilaian Buku di Pusat Perbukuan Kemendikbudristek

Riwayat Pendidikan

S1 : Fakultas Biologi Universitas Indonesia (2007-2010)

Judul Buku yang pernah Disunting dalam 5 Tahun Terakhir:

1. Buku Panduan Guru Pendidikan Anak Usia Dini Elemen Agama dan Budi Pekerti (2021)



● Profil Desainer

Sona Purwana

Email : inisihsona@gmail.com

Bidang Keahlian : Desain Grafis

Riwayat Pekerjaan/Profesi

Desainer Grafis, 2010-sekarang

Riwayat Pendidikan

S1 Desain Komunikasi Visual, Sekolah Tinggi Teknologi Bandung, tahun lulus 2021



Pengalaman Mendesain Buku (3 tahun terakhir)

1. Dasar-Dasar Teknik Geospasial (2022).
2. Buku Panduan Guru Pendidikan Khusus bagi Peserta Didik Autis disertai Hambatan Intelektual (2022).
3. Parentime (2022).
4. Fatherman (2022).
5. Agar Ayah Enggak Masuk Neraka (2022).
6. Kolam Uang (2022).
7. Ilmu Bayan; Menyingkap Kekayaan Bahasa Arab Alquran (2022).
8. Buku Panduan Guru Informatika untuk SMA Kelas XI (2021).
9. Buku Panduan Guru Informatika untuk SMP Kelas IX (2021).
10. Main Instagram (2021).
11. Reseller Gendeng (2021).
12. Emak-Emak Jago Jualan (2021).
13. Tafsir Annisaa 1; Tafsir Alquran Surah Annisaa [4]:1-85 (2019).