



**KELAS 12**

# **BIOLOGI**

**Dinamika Kehidupan: Gen hingga Evolusi**

**Buku Pegangan Biologi untuk Siswa Kelas 12**

## Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas terbitnya e-book Biologi ini yang merupakan bagian dari upaya menghadirkan pembelajaran yang lebih mudah diakses oleh seluruh pelajar Indonesia. Biologi adalah mata pelajaran yang mempelajari makhluk hidup dan lingkungannya, mulai dari struktur tubuh, fungsi organ, hingga ekosistem dan keanekaragaman hayati, yang bermanfaat dalam membangun kepedulian terhadap kehidupan dan kelestarian lingkungan.

E-book ini disusun berdasarkan Capaian Pembelajaran Biologi Fase E (sesuai dengan Keputusan Kepala Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 008/H/KR/2022 Tentang Capaian Pembelajaran Pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah Pada Kurikulum Merdeka). Konten e-book ini dirancang agar peserta didik dapat memahami materi Biologi secara komprehensif, mengasah keterampilan berpikir kritis, serta menerapkannya dalam kehidupan sehari-hari. Selain materi utama, e-book ini juga dilengkapi dengan latihan soal, pembahasan, serta tautan ke sumber belajar tambahan seperti video pembelajaran interaktif.

E-book ini merupakan bagian dari platform [Fitri](#), sebuah platform pembelajaran digital yang menyediakan akses gratis ke berbagai materi belajar, termasuk e-book, latihan soal, dan video pembelajaran interaktif untuk seluruh anak Indonesia. Fitri hadir sebagai wujud kontribusi nyata dalam mendukung pemerataan akses pendidikan berkualitas di Indonesia. Dengan semangat gotong royong dan inklusi, Fitri berkomitmen untuk membantu seluruh siswa, di mana pun berada, agar dapat belajar secara mandiri, efektif, dan menyenangkan. Hal ini selaras dengan tujuan besar pendidikan Indonesia, yaitu mewujudkan generasi yang cerdas, berkarakter, dan siap menghadapi tantangan zaman.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung tersedianya e-book ini. Semoga kehadiran e-book Biologi ini dapat memberikan manfaat nyata dalam proses belajar peserta didik dan turut berkontribusi dalam meningkatkan literasi bangsa.

Jakarta, Juni 2025

Tim Fitri

## Daftar Isi

<b>BAB 1: ENZIM DAN METABOLISME .....</b>	<b>5</b>
1. Metabolisme: Mesin Energi Tubuh dan Rahasia di Baliknya .....	7
2. Misteri Enzim dan Metabolisme: Cara Tubuh Mengolah Energi .....	9
3. Metabolisme dan Kesehatan: Karbohidrat .....	21
4. Membongkar Rahasia Lemak dan Protein: Sumber Energi Tersembunyi .....	30
5. Rahasia Metabolisme: Anabolisme, Katabolisme, dan Pengelolaan Berat Badan. ....	33
6. Anabolisme: Dari Molekul Sederhana ke Kompleksitas Kehidupan .....	36
Rangkuman.....	42
Latihan Soal .....	43
Referensi .....	45
<b>BAB 2: DARI GEN KE GENERASI: PERJALANAN SIFAT MAKHLUK HIDUP .....</b>	<b>46</b>
1. Materi Genetik: Pondasi Kehidupan .....	48
2. Mengurangi Pola-pola Hereditas: Rahasia di Balik Silsilah .....	62
3. Hereditas Manusia: Sifat-sifat yang Kita Warisi .....	87
4. Mutasi: Perubahan dalam Cetak Biru Gen.....	103
Rangkuman.....	121
Latihan Soal .....	122
Referensi .....	124
<b>BAB 3: PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN MAKHLUK HIDUP.....</b>	<b>125</b>
1. Menggali Konsep Dasar: Apa itu Pertumbuhan dan Perkembangan Makhluk Hidup... 127	
2. Keajaiban Hijau: Bagaimana Tumbuhan Tumbuh dan Berkembang .....	130
3. Rahasia Di Balik Pertumbuhan Tumbuhan: Faktor-faktor Kunci yang Menggerakkan Kehidupan .....	142
4. Dari Zigot hingga Dewasa: Mengungkap Proses Pertumbuhan pada Hewan dan Manusia .....	154
Rangkuman.....	161
Latihan Soal .....	162
Referensi .....	164
<b>BAB 4: PERJALANAN LUAR BIASA EVOLUSI.....</b>	<b>165</b>
1. Makna dan Konsep Evolusi .....	167
2. Teori-teori Besar tentang Evolusi .....	171
3. Lamarck, Weismann, dan Darwin: Perbandingan Gagasan Evolusi .....	175
4. Fenomena Alam yang Mengungkap Evolusi.....	178

<b>5. Bukti-bukti yang Menunjukkan Jejak Evolusi.....</b>	<b>181</b>
<b>6. Mekanisme Evolusi.....</b>	<b>186</b>
<b>7. Teori Asal Mula Kehidupan: Dari Molekul Hingga Makhluk Hidup .....</b>	<b>193</b>
<b>Rangkuman.....</b>	<b>200</b>
<b>Latihan Soal .....</b>	<b>201</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>203</b>



## BAB 1:

# ENZIM DAN METABOLISME

### Karakter Pelajar Pancasila

▷ **Beriman, Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa, dan Berakhlak Mulia**

Menghargai ciptaan Tuhan, serta memelihara keseimbangan kehidupan yang ada di dalamnya.

▷ **Bernalar Kritis**

Mampu menganalisis dan membedakan proses-proses metabolisme seperti katabolisme dan anabolisme, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kerja enzim dalam reaksi biokimia tubuh.

### Tujuan Pembelajaran: Menjelajahi Keharmonisan dalam Tubuh

1. **Mendeskripsikan Perbedaan Metabolisme, Katabolisme, dan Anabolisme**

- ▷ Memahami definisi metabolisme sebagai proses biokimia yang terjadi dalam sel.
- ▷ Mengidentifikasi karakteristik utama katabolisme, termasuk pemecahan molekul kompleks menjadi molekul sederhana.
- ▷ Menjelaskan proses anabolisme sebagai penyusunan molekul sederhana menjadi molekul kompleks.
- ▷ Menyimpulkan perbedaan antara katabolisme (penguraian) dan anabolisme (penyusunan) dalam konteks metabolisme.

- **Kata Kunci:** Enzim, Metabolisme, Katabolisme, Anabolisme, Glikolisis, Proses Biokimia, Suhu & pH.

## **2. Menganalisis Komponen Penyusun Penyusun Enzim, Sifat-Sifat Enzim, Cara Kerja Enzim, dan Faktor yang Mempengaruhi Kerja Enzim**

- ▷ Mengidentifikasi komponen utama penyusun enzim, termasuk apoenzym dan koenzim.
- ▷ Menjelaskan sifat-sifat enzim seperti spesifisitas, sensitivitas terhadap suhu dan pH, dan kerja katalik.
- ▷ Mendeskripsikan teori kunci dan gembok (lock and key) serta teori kecocokan terinduksi (induced fit) dalam cara kerja enzim.
- ▷ Menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi kerja enzim, seperti suhu, pH, konsentrasi, substrat, dan keberadaan inhibitor.

## **3. Menganalisis Reaksi pada Respirasi Aerob dan Anaerob, serta Perbedaannya**

- ▷ Menjelaskan tahap-tahap respirasi aerob, termasuk glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus krebs, dan rantai transport electron.
- ▷ Menguraikan proses respirasi aerob dan anaerob dalam hal kebutuhan oksigen, jumlah energi yang dihasilkan, dan produk akhir.
- ▷ Menguraikan proses respirasi aerob dan produk yang dihasilkan, seperti asam laktat dan alkohol.
- ▷ Menjelaskan peran respirasi aerob dan anaerob dalam menyediakan energi untuk sel.

## **4. Menelaah Permasalahan dalam Kehidupan yang Berkaitan dengan Proses Metabolisme, Misalnya Diet Tinggi Protein untuk Mencegah Obesitas**

- ▷ Mengidentifikasi kaitan antara metabolisme dan pengelolaan berat badan.
- ▷ Menganalisis bagaimana diet tinggi protein mempengaruhi katabolisme lemak dan protein dalam tubuh.
- ▷ Menguraikan efek diet tinggi protein pada keseimbangan energi dan penurunan berat badan.

## **5. Menganalisis Reaksi Terang dan Reaksi Gelap dalam Tahapan Fotosintesis, Produk Fotosintesis, serta Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis**

- ▷ Menjelaskan tahap reaksi terang dan gelap (siklus calvin) dalam fotosintesis.
- ▷ Mengidentifikasi produk fotosintesis seperti glukosa dan oksigen.
- ▷ Menjelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi fotosintesis, seperti intensitas cahaya, konsentrasi karbon dioksida, suhu, dan ketersediaan air.
- ▷ Menganalisis pentingnya fotosintesis bagi kehidupan, termasuk kontribusinya dalam rantai makanan dan siklus karbon.

**F I T R I**



## 1. Metabolisme: Mesin Energi Tubuh dan Rahasia di Baliknya

### Definisi Metabolisme sebagai Proses Biokimia dalam Sel

Metabolisme merupakan rangkaian reaksi kimia yang terjadi dalam setiap sel organisme hidup. Proses ini mencakup semua aktivitas biokimia yang diperlukan untuk mempertahankan kehidupan, memungkinkan organisme untuk tumbuh, berkembang, memperbaiki kerusakan jaringan, dan merespons perubahan lingkungan. Dalam konteks seluler, metabolisme terdiri dari dua jalur utama: anabolisme dan katabolisme. Kedua jalur ini bekerja sama untuk mengatur dan menjaga keseimbangan energi serta komponen penting yang diperlukan oleh tubuh. Proses metabolisme tidak hanya melibatkan produksi energi, tetapi juga penguraian molekul-molekul besar menjadi unit-unit kecil serta penyusunan kembali unit-unit tersebut menjadi molekul yang lebih besar dan lebih kompleks. Semua reaksi kimia ini terjadi di dalam sel dengan bantuan enzim sebagai katalisator, yang mempercepat reaksi tanpa ikut berubah dalam proses tersebut.

### Anabolisme dan Katabolisme

Secara umum, metabolisme dapat dibagi menjadi dua kategori utama:

#### a. Anabolisme

Anabolisme adalah jalur metabolisme yang melibatkan penyusunan molekul-molekul sederhana menjadi molekul yang lebih kompleks. Proses ini memerlukan input energi. Contoh anabolisme adalah sintesis protein dari asam amino, atau sintesis glikogen dari molekul glukosa. Dalam konteks metabolisme sel, anabolisme bertanggung jawab atas pembentukan komponen seluler yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perbaikan.

#### b. Katabolisme

Katabolisme merupakan jalur metabolisme yang berlawanan dengan anabolisme. Dalam katabolisme, molekul-molekul kompleks diuraikan menjadi molekul yang lebih sederhana, dan proses ini sering kali menghasilkan energi yang diperlukan oleh sel. Contoh katabolisme adalah pemecahan glukosa dalam proses respirasi sel untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP (Adenosin Trifosfat).

Kedua proses ini, anabolisme dan katabolisme, berjalan seiring untuk menjaga keseimbangan dalam sel. Energi yang dihasilkan dari proses katabolik digunakan untuk mendukung proses anabolik, sehingga seluruh proses metabolisme berjalan secara harmonis demi mempertahankan fungsi tubuh yang optimal.



### Biologipedia

#### Tubuhmu Punya Pembangkit Listrik Sendiri!

Setiap langkah yang kamu ambil, detak jantungmu, bahkan kedipan matamu, semuanya membutuhkan energi. Nah, energi ini berasal dari proses metabolisme—serangkaian reaksi kimia yang terjadi di dalam sel tubuhmu.

Contohnya ketika kamu makan nasi, tubuhmu mengubah karbohidrat jadi glukosa. Glukosa ini masuk ke dalam "pembangkit listrik" sel, yaitu mitokondria, dan diubah menjadi ATP, bahan bakar utama tubuhmu.

Tanpa kamu sadari, proses ini terjadi jutaan kali per detik, bahkan saat kamu sedang tidur! Itulah mengapa metabolisme disebut rahasia kehidupan karena ia bekerja diam-diam, tapi sangat vital.



## Contoh Soal

Jelaskan perbedaan antara proses anabolisme dan katabolisme dalam metabolisme sel serta berikan masing-masing satu contohnya!

### Jawaban:

Anabolisme adalah proses metabolisme yang menyusun molekul-molekul sederhana menjadi molekul yang lebih kompleks dan membutuhkan energi. Contohnya adalah sintesis protein dari asam amino.

Katabolisme adalah proses pemecahan molekul kompleks menjadi molekul sederhana dan menghasilkan energi. Contohnya adalah pemecahan glukosa dalam proses respirasi sel.

### Pembahasan:

Metabolisme dalam tubuh mencakup dua jalur utama, yaitu anabolisme dan katabolisme. Anabolisme bersifat membangun, artinya menyusun zat-zat sederhana menjadi zat kompleks yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perbaikan sel. Sebaliknya, katabolisme bersifat memecah, yaitu menguraikan zat-zat kompleks untuk menghasilkan energi yang digunakan dalam berbagai aktivitas sel. Energi yang dihasilkan dari katabolisme (misalnya dalam bentuk ATP) akan digunakan untuk mendukung proses-proses anabolik. Kedua proses ini saling melengkapi agar tubuh tetap seimbang dan berfungsi secara optimal.



## 2. Misteri Enzim dan Metabolisme: Cara Tubuh Mengolah Energi

### Definisi Enzim sebagai Biokatalisator

Enzim adalah molekul protein yang berfungsi sebagai biokatalisator, yaitu zat yang mempercepat laju reaksi kimia dalam tubuh tanpa ikut berubah atau habis dalam proses reaksi tersebut. Sebagai katalis, enzim memainkan peran penting dalam berbagai proses metabolisme yang terjadi di dalam sel. Tanpa kehadiran enzim, sebagian besar reaksi kimia di dalam tubuh manusia dan makhluk hidup lainnya akan berlangsung terlalu lambat untuk mendukung kehidupan.

Reaksi kimia dalam tubuh, seperti pemecahan nutrisi menjadi energi, pembentukan sel-sel baru, dan eliminasi produk-produk sisa, semuanya dikendalikan oleh enzim. Misalnya, dalam proses pencernaan, enzim memecah molekul-molekul besar seperti protein, lemak, dan karbohidrat menjadi molekul-molekul kecil yang dapat diserap oleh tubuh.

Enzim bekerja dengan cara menurunkan energi aktivasi, yaitu energi minimum yang diperlukan untuk memulai suatu reaksi kimia. Dengan menurunkan energi ini, enzim memungkinkan reaksi berjalan lebih cepat dan lebih efisien, memastikan bahwa sel-sel dapat melaksanakan fungsinya secara tepat waktu.

### Klasifikasi Enzim Berdasarkan Tempat Kerja

Enzim dapat diklasifikasikan berdasarkan tempat mereka bekerja dalam tubuh atau organisme. Ada dua kategori utama:

#### a. Enzim Ekstraseluler

Enzim ekstraseluler adalah enzim yang berfungsi di luar sel tempat mereka diproduksi. Contoh enzim ini adalah enzim-enzim pencernaan, seperti amilase yang ditemukan dalam air liur dan berfungsi untuk memecah karbohidrat kompleks menjadi gula yang lebih sederhana.

#### b. Enzim Intraseluler

Enzim intraseluler adalah enzim yang bekerja di dalam sel. Enzim-enzim ini berperan dalam berbagai proses metabolisme seluler, termasuk respirasi, sintesis protein, dan replikasi DNA. Sebagai contoh, enzim yang terlibat dalam siklus Krebs atau glikolisis, yang berfungsi dalam proses produksi energi di dalam mitokondria, termasuk dalam kategori ini.

### Klasifikasi Enzim Berdasarkan Tipe Reaksi

Enzim dapat dikelompokkan berdasarkan tipe reaksi kimia yang mereka katalisis. Setiap enzim memiliki spesifitas yang tinggi terhadap substrat tertentu dan hanya akan mempercepat reaksi yang melibatkan substrat tersebut. Berikut adalah klasifikasi enzim berdasarkan tipe reaksi yang mereka katalis:

#### a. Oksidoreduktase

Oksidoreduktase adalah enzim yang berperan dalam reaksi oksidasi-reduksi, yaitu reaksi yang melibatkan transfer elektron dari satu molekul ke molekul lain. Reaksi oksidasi adalah proses di mana suatu molekul kehilangan elektron, sementara reaksi reduksi adalah kebalikannya, di mana suatu molekul memperoleh elektron. Contoh enzim oksidoreduktase adalah dehidrogenase, yang berperan dalam proses respirasi seluler dengan menghilangkan elektron dari molekul makanan.

#### **b. Transferase**

Transferase adalah kelompok enzim yang memfasilitasi transfer gugus kimia dari satu molekul ke molekul lain. Gugus yang ditransfer dapat berupa gugus fosfat, metil, atau gugus lainnya. Contoh enzim transferase adalah kinase, yang memindahkan gugus fosfat dari ATP ke molekul target, suatu langkah penting dalam banyak jalur sinyal seluler.

#### **c. Hidrolase**

Hidrolase adalah enzim yang mengkatalisis reaksi hidrolisis, di mana air digunakan untuk memutuskan ikatan kimia. Enzim-enzim hidrolase memainkan peran penting dalam proses pencernaan. Sebagai contoh, lipase adalah enzim hidrolase yang memecah lemak menjadi asam lemak dan gliserol.

#### **d. Liasa**

Liasa adalah enzim yang memecahkan ikatan kimia, seperti ikatan C-C, C-O, C-N, dan ikatan lainnya, tanpa melibatkan hidrolisis atau oksidasi. Enzim ini sering digunakan dalam reaksi-reaksi yang membentuk atau menghilangkan ikatan rangkap. Misalnya, dekarboksilase menghilangkan gugus karboksil dari molekul, menghasilkan  $\text{CO}_2$  sebagai produk sampingan.

#### **e. Isomerase**

Isomerase adalah enzim yang mengkatalisis perubahan dalam struktur molekul tanpa mengubah jumlah atom atau jenis atom yang ada. Enzim ini memfasilitasi konversi satu isomer ke isomer lain. Contohnya adalah fosfoheksosa isomerase, yang mengubah glukosa-6-fosfat menjadi fruktosa-6-fosfat dalam jalur glikolisis.

#### **f. Ligase**

Ligase adalah enzim yang menyatukan dua molekul besar dengan membentuk ikatan baru, biasanya melalui hidrolisis ATP. Enzim ini sangat penting dalam proses replikasi DNA, di mana DNA ligase membantu menyatukan fragmen DNA yang terpisah selama proses sintesis DNA.

Klasifikasi ini membantu dalam memahami peran spesifik setiap enzim dalam reaksi biokimia yang terjadi di dalam sel. Dengan mengetahui tipe reaksi yang dikatalisis oleh enzim, kita dapat lebih memahami mekanisme metabolisme yang berlangsung dalam organisme.

### **Komponen Enzim dan Strukturnya**

Enzim memiliki struktur yang kompleks dan terdiri dari beberapa komponen utama yang memungkinkan mereka menjalankan fungsinya sebagai katalisator biologis. Struktur enzim menentukan spesifitas dan efisiensinya dalam mempercepat reaksi kimia. Secara umum, enzim terdiri dari dua komponen utama: apoenzim dan kofaktor. Kombinasi dari keduanya membentuk holoenzim, yang merupakan enzim aktif secara fungsional.

#### **a. Apoenzim**

Apoenzim adalah bagian protein dari enzim yang menentukan spesifitas enzim terhadap substratnya. Struktur tiga dimensi apoenzim menciptakan situs aktif, yaitu tempat di mana substrat akan berikatan dan reaksi akan terjadi. Bentuk situs aktif ini sangat spesifik, mirip dengan bentuk kunci yang sesuai dengan gembok tertentu. Tanpa kofaktor, apoenzim biasanya tidak aktif atau kurang efisien dalam mengkatalisis reaksi.

Apoenzim terbentuk melalui penggulungan rantai asam amino dalam struktur sekunder, tersier, dan kadang kuartener. Penggulungan ini penting untuk membentuk situs aktif yang sesuai untuk berinteraksi dengan substrat tertentu.

## b. Kofaktor

Kofaktor adalah komponen non-protein yang diperlukan untuk aktivitas katalitik enzim. Kofaktor dapat berupa ion logam atau molekul organik kecil. Berdasarkan jenisnya, kofaktor dapat dibagi menjadi dua kelompok utama:

### ▷ Ion Logam

Banyak enzim memerlukan ion logam, seperti ion magnesium ( $Mg^{2+}$ ), seng ( $Zn^{2+}$ ), besi ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ), atau tembaga ( $Cu^{2+}$ ), sebagai kofaktor. Ion logam ini berfungsi untuk membantu menstabilkan struktur enzim atau berperan dalam proses transfer elektron. Contoh enzim yang memerlukan ion logam adalah karbonat anhidrase, yang memerlukan ion seng untuk berfungsi.

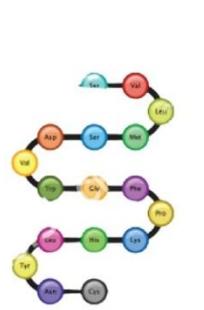
### ▷ Koenzim

Koenzim adalah molekul organik kecil yang berfungsi sebagai kofaktor. Biasanya, koenzim berasal dari vitamin dan sering kali berperan sebagai pembawa atom atau gugus kimia selama reaksi enzimatik. Contoh koenzim yang penting adalah  $NAD^+$  (Nikotinamid Adenin Dinukleotid) yang berperan dalam reaksi redoks, serta koenzim A yang berperan dalam metabolisme asam lemak dan siklus Krebs.

## c. Holoenzim

Holoenzim adalah bentuk enzim yang lengkap dan aktif, yaitu kombinasi antara apoenzim dan kofaktor. Holoenzim dapat mengkatalisis reaksi biokimia secara efektif karena memiliki situs aktif yang terbentuk dengan sempurna serta kofaktor yang mendukung aktivitas katalitik. Tanpa kofaktor, apoenzim tidak dapat berfungsi sepenuhnya, dan kofaktor juga tidak dapat bekerja sendiri tanpa apoenzim.

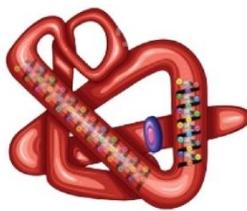
## d. Struktur Enzim



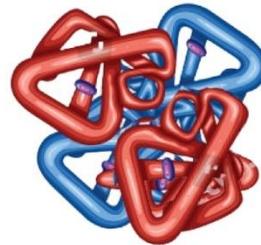
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Struktur Primer, (b) Struktur Sekunder, (c) Struktur Tersier, (d) struktur Kuarterner – Shutterstock.com 1474657079

Struktur enzim secara umum dapat digambarkan melalui beberapa tingkatan:

- ▷ Struktur Primer: Merupakan urutan linear asam amino yang menyusun rantai polipeptida.
- ▷ Struktur Sekunder: Lipatan lokal rantai polipeptida membentuk heliks alfa atau lembar beta, yang distabilkan oleh ikatan hidrogen.
- ▷ Struktur Tersier: Struktur tiga dimensi dari rantai polipeptida yang merupakan hasil interaksi antara berbagai bagian rantai. Struktur ini menciptakan situs aktif enzim.

- ▷ Struktur Kuartener: Terdiri dari beberapa subunit polipeptida yang terorganisir menjadi satu unit fungsional. Tidak semua enzim memiliki struktur kuartener; hanya enzim dengan lebih dari satu subunit yang memiliki tingkatan ini.

Struktur tiga dimensi enzim sangat penting karena menentukan bagaimana enzim berinteraksi dengan substratnya dan bagaimana proses katalisis terjadi.

## Sifat-sifat Enzim

Enzim memiliki sifat-sifat khusus yang membuatnya unik sebagai biokatalisator. Sifat-sifat ini menentukan bagaimana enzim berfungsi dalam mempercepat reaksi kimia dan bagaimana mereka berinteraksi dengan substrat di lingkungan biologis. Berikut adalah beberapa sifat utama enzim:

### a. Spesifitas Enzim

Enzim sangat spesifik terhadap substrat yang mereka katalisis. Spesifitas ini dipengaruhi oleh bentuk situs aktif enzim, yang hanya sesuai dengan substrat tertentu, seperti kunci yang sesuai dengan gembok. Terdapat beberapa tingkat spesifitas:

- ▷ Spesifitas Absolut: Enzim ini hanya mengkatalisis satu tipe reaksi untuk satu jenis substrat. Misalnya, urease hanya bekerja pada urea dan tidak pada senyawa lain.
- ▷ Spesifitas Grup: Enzim ini mengkatalisis reaksi untuk kelompok senyawa yang mirip. Contohnya adalah enzim heksokinase yang bekerja pada berbagai gula heksosa, seperti glukosa dan fruktosa.
- ▷ Spesifitas Ikatan: Enzim ini spesifik untuk tipe ikatan kimia tertentu, tanpa memperdulikan struktur keseluruhan substrat. Contoh enzim ini adalah protease yang memecah ikatan peptida dalam protein.

### b. Enzim Berfungsi pada Kondisi Suhu dan pH Tertentu

Aktivitas enzim dipengaruhi oleh suhu dan pH lingkungan tempat mereka bekerja. Setiap enzim memiliki suhu dan pH optimum di mana mereka paling aktif. Di luar rentang ini, enzim dapat kehilangan fungsinya akibat denaturasi, yaitu perubahan dalam struktur tiga dimensi enzim.

- ▷ Suhu: Suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat laju reaksi enzim, sementara suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan enzim terdenaturasi. Sebagian besar enzim dalam tubuh manusia bekerja paling baik pada suhu sekitar 37°C (suhu tubuh normal).
- ▷ pH: Setiap enzim juga memiliki pH optimum. Misalnya, pepsin, enzim pencernaan di lambung, bekerja optimal pada pH asam sekitar 2, sementara enzim amilase dalam mulut bekerja pada pH netral sekitar 7.

### c. Dapat diatur oleh Inhibitor dan Aktivator

Aktivitas enzim dapat diatur oleh molekul-molekul yang disebut inhibitor atau aktivator:

- ▷ Inhibitor adalah molekul yang menghambat aktivitas enzim. Inhibitor ini bisa bersifat kompetitif, yaitu bersaing dengan substrat untuk berikatan dengan situs aktif, atau non-kompetitif, di mana inhibitor berikatan dengan tempat lain pada enzim sehingga mengubah bentuk situs aktif.
- ▷ Aktivator adalah molekul yang meningkatkan aktivitas enzim dengan cara berikatan pada situs khusus enzim dan meningkatkan afinitas enzim terhadap substrat atau memperbaiki struktur situs aktif.

**d. Enzim tidak Mengubah Kesetimbangan Reaksi**

Salah satu ciri utama enzim sebagai katalis adalah bahwa mereka mempercepat laju reaksi kimia tanpa mengubah posisi kesetimbangan reaksi. Enzim hanya mempercepat reaksi maju dan mundur (bolak-balik) menuju kesetimbangan, tetapi mereka tidak mempengaruhi rasio produk dan reaktan pada titik kesetimbangan tersebut.

**e. Dapat digunakan Berulang Kali**

Enzim tidak ikut habis dalam reaksi yang mereka katalis. Setelah selesai mengkatalisis reaksi, enzim kembali ke bentuk semula dan dapat digunakan kembali untuk mengkatalisis reaksi yang sama dengan substrat lain. Hal ini memungkinkan enzim untuk bekerja secara efisien dalam jumlah kecil tetapi tetap mampu mempercepat banyak reaksi dalam waktu singkat.

**f. Enzim Memiliki Aktivitas Spesifik**

Setiap enzim memiliki "aktivitas spesifik" yang mengukur seberapa banyak substrat yang dapat diubah menjadi produk dalam jangka waktu tertentu. Aktivitas spesifik ini tergantung pada konsentrasi enzim, substrat, dan kondisi lingkungan seperti suhu dan pH.

Sifat-sifat ini menjadikan enzim sangat efektif dalam mengendalikan berbagai reaksi biokimia di dalam sel. Dengan memahami karakteristik unik enzim, para ilmuwan dapat mengaplikasikan pengetahuan ini dalam bidang-bidang seperti kedokteran, bioteknologi, dan penelitian ilmiah.

## Cara Kerja Enzim

Enzim bekerja dengan mempercepat laju reaksi kimia di dalam sel. Mekanisme kerja enzim sangat terkait dengan interaksinya dengan substrat di situs aktif enzim. Ada dua teori utama yang menjelaskan bagaimana enzim berinteraksi dengan substratnya: Teori Lock and Key dan Teori Induced Fit.

**a. Teori Lock and Key**

Teori Lock and Key (Kunci dan Gembok) adalah salah satu model awal yang menjelaskan cara kerja enzim. Teori ini diusulkan oleh Emil Fischer pada tahun 1894 dan menyatakan bahwa situs aktif enzim memiliki bentuk yang spesifik dan tetap, seperti kunci yang pas dengan gembok. Dalam model ini, substrat dianggap sebagai "kunci" yang harus cocok sempurna dengan "gembok" atau situs aktif enzim. Berikut adalah prinsip dasar teori ini:

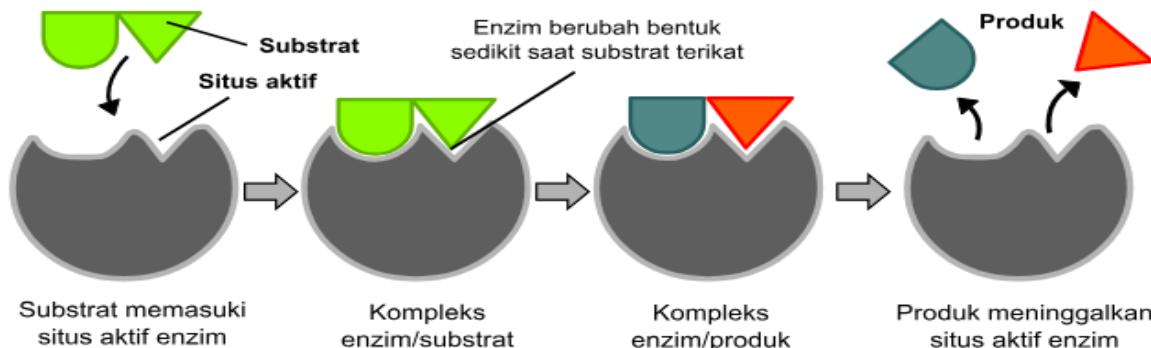
- ▷ Situs aktif enzim memiliki bentuk yang tepat untuk menerima substrat tertentu.
- ▷ Substrat harus memiliki bentuk yang sesuai untuk dapat berikatan dengan enzim.
- ▷ Setelah substrat terikat pada situs aktif, reaksi kimia terjadi dan substrat diubah menjadi produk.
- ▷ Setelah reaksi selesai, produk dilepaskan dari enzim, dan enzim siap untuk berinteraksi dengan substrat berikutnya.

Keunggulan dari teori ini adalah kesederhanaannya, tetapi teori ini tidak sepenuhnya menjelaskan bagaimana enzim dapat menunjukkan fleksibilitas dan beradaptasi dengan substrat yang sedikit berbeda bentuknya.

**b. Teori Induced Fit**

Teori Induced Fit (Penyesuaian Terinduksi) diperkenalkan oleh Daniel Koshland pada tahun 1958 untuk memperbaiki model Lock and Key yang dianggap terlalu kaku. Menurut teori ini, situs aktif enzim tidak memiliki bentuk yang sepenuhnya kaku, tetapi justru dapat mengalami perubahan bentuk atau konformasi untuk menyesuaikan diri dengan substrat yang berikatan. Prinsip utama teori Induced Fit adalah:

- ▷ Situs aktif enzim bersifat fleksibel dan dapat berubah bentuk setelah substrat mulai berikatan.
- ▷ Ketika substrat mendekati enzim, interaksi antara substrat dan situs aktif menginduksi perubahan konformasi pada enzim, sehingga enzim "menyesuaikan" diri agar dapat mengikat substrat dengan lebih baik.
- ▷ Setelah substrat terikat erat dengan situs aktif yang sudah menyesuaikan, reaksi kimia terjadi, dan substrat diubah menjadi produk.
- ▷ Produk kemudian dilepaskan, dan enzim kembali ke bentuk awalnya.



Skema kerja enzim dalam reaksi katabolisme – commons.wikimedia.org/Imran Khan 1992

Teori ini lebih menjelaskan fleksibilitas dan dinamika enzim dalam mengikat substrat yang tidak sepenuhnya pas dengan situs aktif pada awalnya. Teori *Induced Fit* juga lebih menggambarkan bagaimana beberapa enzim dapat bekerja pada substrat yang berbeda tetapi mirip, serta bagaimana enzim dapat beradaptasi dalam kondisi lingkungan yang berubah.

### c. Proses Kerja Enzim Secara Umum

Meskipun ada perbedaan dalam teori yang menjelaskan interaksi awal antara enzim dan substrat, proses kerja enzim secara umum terdiri dari beberapa langkah:

- ▷ Pengikatan Substrat: Substrat berikatan dengan situs aktif enzim, baik melalui mekanisme Lock and Key atau melalui penyesuaian Induced Fit.
- ▷ Pembentukan Kompleks Enzim-Substrat: Ketika substrat terikat, terbentuk kompleks enzim-substrat yang merupakan tahap sementara sebelum reaksi kimia terjadi.
- ▷ Katalisis: Enzim mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi, yang memungkinkan reaksi terjadi lebih cepat dan lebih efisien. Pada tahap ini, substrat diubah menjadi produk.
- ▷ Pembentukan Produk: Setelah reaksi terjadi, substrat diubah menjadi produk.
- ▷ Pelepasan Produk: Produk yang terbentuk dilepaskan dari enzim, dan enzim kembali ke bentuk awalnya, siap untuk berikatan dengan substrat baru.

Enzim memainkan peran yang sangat penting dalam hampir setiap proses biokimia di dalam tubuh. Tanpa enzim, banyak reaksi kimia yang penting bagi kehidupan akan berlangsung sangat lambat atau bahkan tidak terjadi sama sekali. Fleksibilitas enzim dan cara mereka berinteraksi dengan substrat memungkinkan sel untuk melakukan reaksi-reaksi kompleks secara efisien dan terkendali.

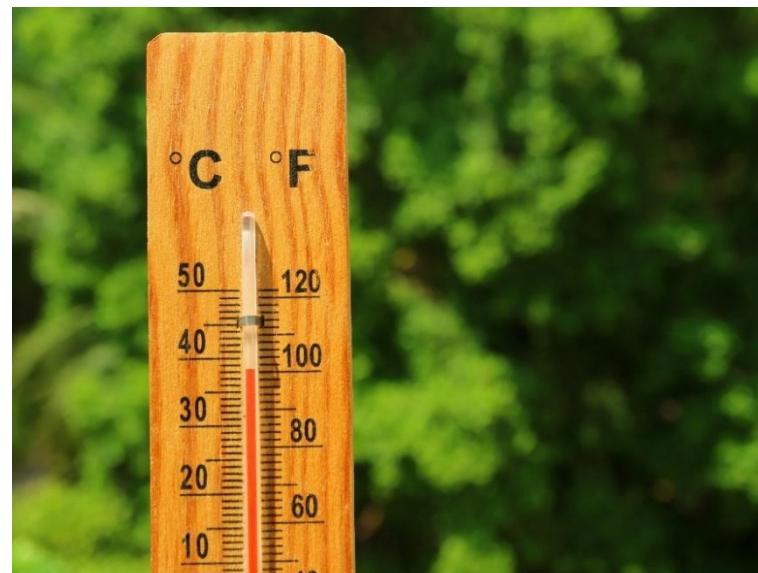
## Faktor-faktor yang Memengaruhi Aktivitas Enzim

Aktivitas enzim dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal dan internal. Faktor-faktor ini dapat meningkatkan atau menghambat kinerja enzim dalam mempercepat reaksi kimia. Memahami faktor-faktor ini sangat penting karena enzim berperan vital dalam menjaga fungsi-fungsi biokimia dalam tubuh. Berikut adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi aktivitas enzim.

### a. Suhu

Suhu merupakan faktor penting yang mempengaruhi laju reaksi enzimatik. Peningkatan suhu cenderung meningkatkan aktivitas enzim, karena molekul substrat dan enzim bergerak lebih cepat, yang meningkatkan frekuensi tumbukan antara enzim dan substrat. Namun, ada batasan suhu di mana enzim dapat berfungsi dengan optimal:

- ▷ Suhu optimum: Setiap enzim memiliki suhu optimum di mana aktivitasnya paling tinggi. Pada suhu optimum ini, enzim bekerja dengan efisiensi maksimal
- ▷ Suhu Tinggi: Jika suhu meningkat terlalu tinggi di atas suhu optimum, enzim dapat mengalami denaturasi. Denaturasi adalah proses di mana struktur tiga dimensi enzim berubah secara permanen, sehingga enzim kehilangan kemampuannya untuk mengikat substrat dan mengkatalisis reaksi
- ▷ Suhu Rendah: Pada suhu yang lebih rendah dari suhu optimum, aktivitas enzim menurun karena molekul bergerak lebih lambat, yang mengurangi frekuensi tumbukan antara enzim dan substrat



Sebagian besar enzim dalam tubuh manusia bekerja paling efisien pada suhu sekitar 37°C, yaitu suhu tubuh normal.

### b. pH (Tingkat Keasaman)

pH lingkungan juga sangat mempengaruhi aktivitas enzim. Setiap enzim memiliki pH optimum, yaitu pH di mana mereka bekerja paling baik. Perubahan pH di luar kisaran optimal dapat menyebabkan penurunan aktivitas enzim atau bahkan denaturasi enzim:

- ▷ pH Optimum: Pada pH optimum, struktur enzim tetap stabil, dan situs aktif mampu mengikat substrat dengan baik. Sebagai contoh, enzim pepsin yang terdapat di lambung bekerja optimal pada pH asam sekitar 2, sedangkan enzim amilase yang terdapat dalam mulut bekerja pada pH netral sekitar 7.
- ▷ pH Asam atau Basa Ekstrem: pH yang terlalu asam atau basa dapat menyebabkan perubahan pada muatan ionik enzim dan substrat, yang mengganggu interaksi antara enzim dan substrat. Hal ini dapat mengubah struktur situs aktif enzim dan menurunkan aktivitas katalitiknya.

### c. Konsentrasi Substrat

Aktivitas enzim juga dipengaruhi oleh konsentrasi substrat. Peningkatan konsentrasi substrat akan meningkatkan laju reaksi hingga mencapai titik jenuh:

- ▷ Konsentrasi Substrat Rendah: Pada konsentrasi substrat rendah, hanya sedikit enzim yang terikat dengan substrat, sehingga laju reaksi meningkat seiring peningkatan konsentrasi substrat.

- ▷ Konsentrasi Substrat Tinggi: Ketika konsentrasi substrat terus meningkat, laju reaksi juga meningkat sampai semua situs aktif enzim terikat dengan substrat. Pada titik ini, enzim mencapai kapasitas maksimalnya dan laju reaksi tidak dapat meningkat lebih jauh, karena semua enzim sudah "jenuh" oleh substrat. Titik ini dikenal sebagai kecepatan maksimal ( $V_{max}$ ).

#### d. Konsentrasi Enzim

Laju reaksi juga dipengaruhi oleh jumlah enzim yang tersedia. Semakin banyak enzim yang ada, semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk mengikat substrat, sehingga laju reaksi akan meningkat secara proporsional dengan konsentrasi enzim. Namun, jika substratnya terbatas, peningkatan konsentrasi enzim tidak akan meningkatkan laju reaksi setelah semua substrat terikat dengan enzim.

#### e. Inhibitor

Inhibitor adalah zat yang dapat mengurangi atau menghentikan aktivitas enzim. Ada dua jenis utama inhibitor:

- ▷ Inhibitor Kompetitif: Molekul ini bersaing dengan substrat untuk berikatan dengan situs aktif enzim. Inhibitor kompetitif memiliki struktur yang mirip dengan substrat, sehingga dapat "menipu" enzim dan menghalangi substrat untuk berikatan. Namun, efek inhibitor kompetitif dapat dikurangi dengan meningkatkan konsentrasi substrat.
- ▷ Inhibitor Non-kompetitif: Inhibitor non-kompetitif berikatan dengan bagian lain dari enzim (bukan situs aktif), yang menyebabkan perubahan bentuk pada enzim. Perubahan bentuk ini mempengaruhi situs aktif sehingga substrat tidak dapat berikatan secara efektif, bahkan jika substrat berlimpah.

#### f. Aktivator

Aktivator adalah molekul yang meningkatkan aktivitas enzim. Aktivator dapat berikatan dengan enzim dan mengubah konformasi atau struktur enzim, sehingga meningkatkan afinitas enzim terhadap substrat atau membuat situs aktif lebih mudah diakses oleh substrat. Contoh aktivator enzim adalah ion logam tertentu yang berfungsi sebagai kofaktor dan diperlukan untuk aktivitas enzim.

#### g. Kofaktor dan Koenzim

Sebagian besar enzim memerlukan komponen tambahan, seperti ion logam (kofaktor) atau molekul organik kecil (koenzim), untuk berfungsi dengan optimal. Ketiadaan kofaktor atau koenzim dapat menghambat atau bahkan menghentikan aktivitas enzim. Sebagai contoh, enzim dehidrogenase memerlukan  $NAD^+$  sebagai koenzim untuk mentransfer elektron dalam reaksi oksidasi-reduksi.

#### h. Kekuatan Ionik Lingkungan

Kekuatan ionik atau konsentrasi ion dalam lingkungan tempat enzim bekerja juga mempengaruhi aktivitas enzim. Ion-ion tertentu dapat menstabilkan atau mengganggu interaksi antara enzim dan substrat. Perubahan kekuatan ionik dapat mempengaruhi struktur enzim dan muatan di situs aktif, yang dapat meningkatkan atau menurunkan aktivitas enzim.



#### Nasi Dituduh, Tapi Bukan Dia Pelakunya!

Nasi putih bukan penyebab utama kegemukan. Yang bikin berat badan naik adalah porsi berlebihan dan kurang gerak. Karbohidrat dari nasi berubah menjadi glukosa sebagai sumber energi utama, terutama untuk otak. Jika kamu menghindari karbohidrat total, kamu bisa lemas dan sulit fokus. Jadi nasi aman asal porsinya pas dan diimbangi aktivitas.



## Penghambat Kerja Enzim (Inhibitor)

Inhibitor adalah molekul yang menghambat aktivitas enzim dengan cara berikatan pada enzim tersebut dan mengganggu proses katalisis. Kehadiran inhibitor dapat mengurangi kecepatan reaksi atau bahkan menghentikan reaksi sepenuhnya. Inhibitor berperan penting dalam regulasi aktivitas enzim di dalam tubuh dan juga digunakan secara luas dalam terapi obat. Ada beberapa jenis penghambat kerja enzim, yang diklasifikasikan berdasarkan cara mereka berinteraksi dengan enzim dan substrat.

### a. Inhibitor Kompetitif

Inhibitor kompetitif adalah molekul yang bersaing langsung dengan substrat untuk berikatan dengan situs aktif enzim. Molekul ini biasanya memiliki struktur yang mirip dengan substrat, sehingga dapat "menipu" enzim dan berikatan di situs aktif. Namun, tidak seperti substrat, inhibitor kompetitif tidak mengalami reaksi kimia di dalam situs aktif.

- ▷ Cara Kerja: Inhibitor kompetitif menghalangi substrat untuk mengikat situs aktif, sehingga mencegah terjadinya reaksi. Namun, penghambatan kompetitif bersifat *reversible* (dapat dibalik) dan dapat dikurangi dengan meningkatkan konsentrasi substrat. Ketika konsentrasi substrat lebih tinggi, peluang substrat untuk berikatan dengan situs aktif menjadi lebih besar daripada inhibitor.
- ▷ Contoh: Obat-obatan tertentu bertindak sebagai inhibitor kompetitif. Sebagai contoh, metotreksat adalah inhibitor kompetitif untuk enzim dihidrofolat reduktase, yang penting dalam sintesis DNA. Metotreksat digunakan untuk menghambat pertumbuhan sel kanker.

### b. Inhibitor Non-Kompetitif

Inhibitor non-kompetitif berikatan dengan enzim di tempat lain selain situs aktif, yang disebut situs alosterik. Ikatan ini menyebabkan perubahan konformasi pada enzim yang mengubah bentuk situs aktif, sehingga substrat tidak dapat berikatan dengan benar atau enzim tidak dapat melakukan katalisis secara efisien. Tidak seperti inhibitor kompetitif, inhibitor non-kompetitif tidak bersaing dengan substrat untuk situs aktif.

- ▷ Cara Kerja: Inhibitor non-kompetitif mengurangi laju reaksi tanpa mempengaruhi pengikatan substrat. Bahkan jika konsentrasi substrat ditingkatkan, inhibitor tetap efektif dalam mengurangi aktivitas enzim, karena ia tidak bersaing di situs aktif.
- ▷ Contoh: Beberapa logam berat, seperti timbal dan merkuri, bertindak sebagai inhibitor non-kompetitif dengan berikatan pada situs alosterik enzim dan menyebabkan perubahan struktur enzim yang *irreversibel*, sehingga menghambat aktivitas enzim tersebut

### c. Inhibitor Tidak Kompetitif (*Uncompetitive Inhibition*)

Inhibitor tidak kompetitif bekerja dengan cara yang sedikit berbeda dari kedua jenis inhibitor sebelumnya. Inhibitor ini hanya berikatan dengan enzim setelah substrat terikat, membentuk kompleks enzim-substrat. Setelah inhibitor terikat, kompleks enzim-substrat tidak dapat melanjutkan proses reaksi, sehingga produk tidak terbentuk.

- ▷ Cara Kerja: Inhibitor ini hanya bekerja setelah enzim terikat dengan substrat. Dengan demikian, inhibitor ini menurunkan aktivitas enzim dengan menghambat konversi substrat menjadi produk. Peningkatan konsentrasi substrat tidak mengurangi efek inhibitor, karena inhibitor hanya berikatan setelah terbentuknya kompleks enzim-substrat.
- ▷ Contoh: Inhibitor jenis ini sering kali ditemukan dalam mekanisme penghambatan yang lebih kompleks dalam jalur metabolisme, meskipun lebih jarang digunakan dalam aplikasi obat dibandingkan dengan inhibitor kompetitif.

#### d. Inhibitor Irreversibel

Inhibitor *irreversibel* adalah molekul yang mengikat enzim secara permanen, biasanya dengan membentuk ikatan kovalen dengan situs aktif atau bagian penting lainnya dari enzim. Pengikatan ini mengubah struktur enzim secara permanen, membuatnya tidak dapat berfungsi lagi. Tidak seperti inhibitor *reversible* (kompetitif dan non-kompetitif), efek inhibitor *irreversibel* tidak dapat dibalik, sehingga enzim yang terkena harus digantikan oleh sintesis enzim baru.

- ▷ Cara Kerja: Inhibitor *irreversibel* mengikat secara permanen dan menyebabkan kerusakan struktural pada enzim, sehingga menonaktifkan fungsi katalitik enzim tersebut secara permanen. Setelah inhibitor ini berikatan, enzim tidak bisa digunakan lagi.
- ▷ Contoh: Salah satu contoh inhibitor *irreversibel* adalah obat aspirin yang menghambat enzim siklookksigenase (COX) dalam jalur inflamasi. Aspirin mengikat situs aktif COX secara permanen, yang mengurangi produksi prostaglandin dan mengurangi peradangan dan rasa sakit.

#### e. Regulasi Alosterik

Regulasi alosterik adalah proses di mana enzim dikendalikan oleh molekul-molekul yang berikatan pada situs alosterik, yang terpisah dari situs aktif. Molekul-molekul ini bisa berupa aktivator atau inhibitor. Inhibitor alosterik menyebabkan perubahan konformasi pada enzim yang mengurangi afinitasnya terhadap substrat.

- ▷ Cara Kerja: Dalam regulasi alosterik, inhibitor mengubah bentuk enzim sehingga aktivitas katalitiknya berkurang atau terhenti. Inhibitor ini bisa bekerja secara reversible dan biasanya berfungsi dalam kontrol umpan balik (*feedback inhibition*), di mana produk akhir suatu jalur metabolisme menghambat enzim yang terlibat di langkah awal jalur tersebut.
- ▷ Contoh: Salah satu contoh klasik dari regulasi alosterik adalah penghambatan enzim fosfofruktokinase oleh ATP dalam jalur glikolisis. Ketika kadar ATP tinggi, ATP bertindak sebagai inhibitor alosterik dan menurunkan aktivitas fosfofruktokinase, yang memperlambat jalur glikolisis dan produksi lebih lanjut dari ATP.

#### f. Inhibitor Berbasis Umpan Balik (*Feedback Inhibition*)

*Feedback inhibition* adalah mekanisme pengaturan di mana produk akhir dari suatu jalur metabolisme bertindak sebagai inhibitor enzim yang terlibat dalam langkah awal jalur tersebut. Mekanisme ini mencegah produksi berlebihan dari produk akhir dan menjaga keseimbangan metabolisme di dalam sel.

- ▷ Cara Kerja: Produk akhir dari suatu jalur berikatan dengan enzim pertama dalam jalur tersebut, menghambat aktivitasnya dan mengurangi produksi produk lebih lanjut. Ini membantu menjaga homeostasis di dalam sel dan mencegah akumulasi produk yang berlebihan.
- ▷ Contoh: Dalam sintesis asam amino, jika konsentrasi asam amino tertentu meningkat di atas level yang dibutuhkan, asam amino tersebut dapat bertindak sebagai inhibitor umpan balik dan menghambat enzim-enzim yang terlibat dalam jalur sintesisnya.

## Contoh Soal

Jelaskan mengapa enzim dikatakan sebagai biokatalisator, dan bagaimana peran enzim dalam mempercepat reaksi metabolisme di dalam sel!

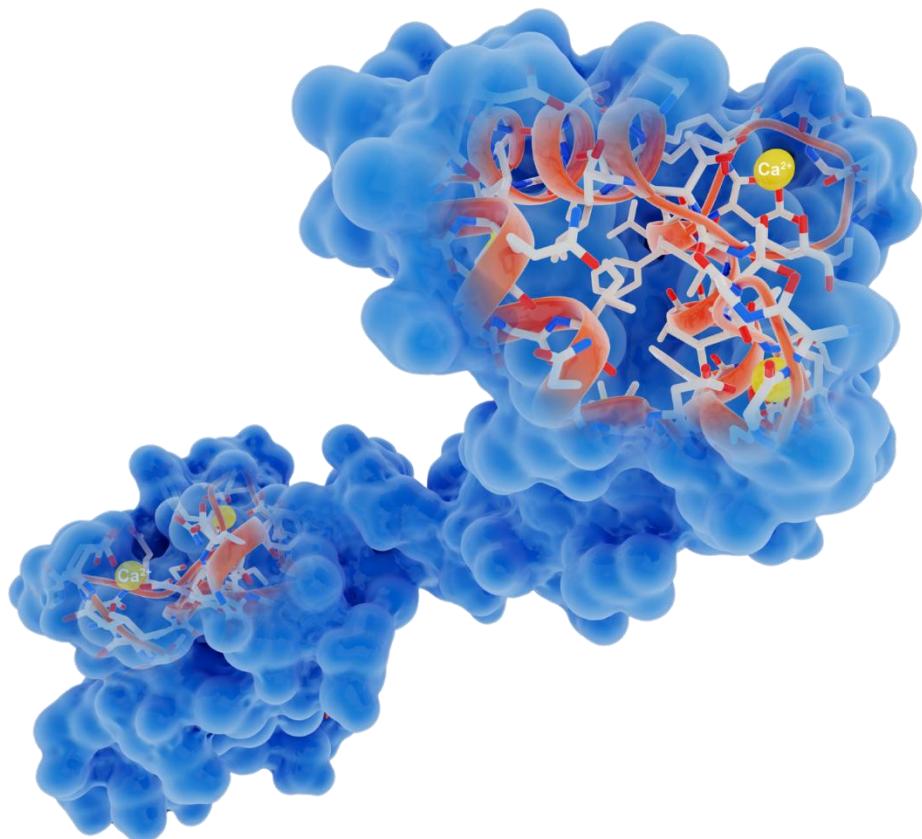
### Jawaban:

Enzim disebut sebagai biokatalisator karena berfungsi mempercepat laju reaksi kimia dalam tubuh tanpa ikut habis atau berubah secara permanen setelah reaksi berlangsung. Enzim menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan untuk memulai suatu reaksi kimia, sehingga reaksi tersebut dapat berlangsung lebih cepat dan efisien.

Dalam metabolisme, enzim memungkinkan reaksi-reaksi kompleks seperti pemecahan nutrisi, sintesis molekul baru, dan pembentukan energi terjadi dengan cepat pada suhu tubuh normal. Tanpa enzim, reaksi-reaksi tersebut akan berjalan sangat lambat dan tidak akan mampu mendukung kehidupan sel.

### Pembahasan:

Enzim bekerja seperti kunci yang hanya cocok untuk gembok tertentu, dalam hal ini, substrat. Setiap enzim memiliki situs aktif yang sesuai dengan bentuk substrat tertentu. Saat substrat berikatan dengan enzim, terbentuk kompleks enzim-substrat, lalu reaksi berlangsung dan produk terbentuk. Setelah itu, enzim dilepaskan tanpa berubah, dan dapat digunakan kembali. Enzim bekerja spesifik, memiliki suhu dan pH optimum, serta bisa diatur oleh inhibitor dan aktivator. Oleh karena itu, enzim sangat vital dalam menjaga efisiensi dan regulasi metabolisme seluler.



## Kegiatan Praktikum 1

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan mengamati bagaimana suhu memengaruhi aktivitas enzim katalase yang terdapat dalam hati ayam atau kentang, dilihat dari kecepatan pemecahan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) menjadi air dan oksigen.

1. Buatlah kelompok yang terdiri dari 4 orang lalu siapkan alat dan bahan berikut:
  - ▷ Larutan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) 3%
  - ▷ Potongan hati ayam segar atau kentang segar (sebagai sumber enzim katalase)
  - ▷ 3 Tabung reaksi
  - ▷ Air panas, air dingin/es, air suhu ruang
  - ▷ Stopwatch, Gelas ukur dan Pipet tetes
2. Siapkan tiga tabung reaksi, masing-masing diisi potongan hati atau kentang berukuran sama.
3. Tambahkan larutan  $H_2O_2$  ke masing-masing tabung dalam jumlah yang sama (misal: 5 mL).
4. Tempatkan tabung pertama di air dingin/es, tabung kedua di suhu ruang, dan tabung ketiga di air panas. Tunggu 2 menit agar suhu merata.
5. Amati dan catat kecepatan atau jumlah gelembung oksigen yang dihasilkan di masing-masing tabung selama 1 menit.
6. Bandingkan hasil antar tabung.
7. Diskusikan pertanyaan berikut lalu buat kesimpulan dari penelitian yang baru saja kamu lakukan.
  - a. Bagaimana suhu memengaruhi aktivitas enzim?
  - b. Pada suhu berapa enzim menunjukkan aktivitas paling optimal?
  - c. Apa yang terjadi jika suhu terlalu tinggi terhadap enzim? Jelaskan hubungannya dengan struktur enzim (denaturasi).
  - d. Bagaimana jika suhu terlalu rendah? Jelaskan alasan biologisnya.
  - e. Dalam kehidupan sehari-hari, bagaimana pengetahuan tentang pengaruh suhu terhadap enzim dimanfaatkan, misal di bidang industri atau kedokteran?

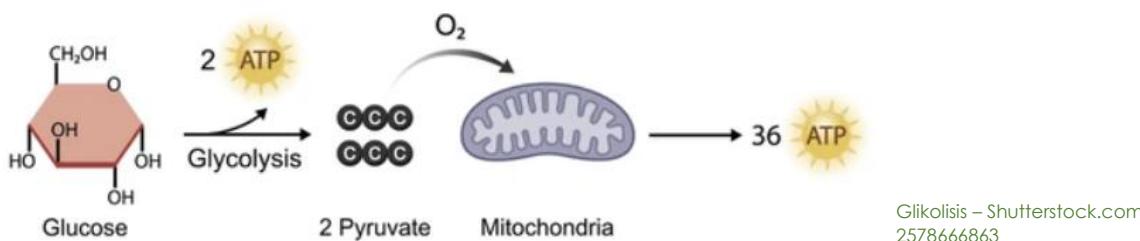


### 3. Metabolisme dan Kesehatan: Karbohidrat

#### Respirasi Aerob

Respirasi aerob adalah proses pemecahan karbohidrat, terutama glukosa, dalam keberadaan oksigen untuk menghasilkan energi dalam bentuk Adenosin Trifosfat (ATP). Proses ini terjadi di dalam mitokondria pada organisme eukariotik dan merupakan jalur katabolik yang sangat efisien dalam menghasilkan energi. Respirasi aerob mencakup tiga tahap utama: glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron.

##### a. Glikolisis



Glikolisis adalah tahap awal dari respirasi aerob yang berlangsung di sitoplasma sel, di mana satu molekul glukosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) dipecah menjadi dua molekul asam piruvat ( $C_3H_4O_3$ ). Proses ini terdiri dari serangkaian reaksi kimia yang terjadi dalam 10 langkah enzimatik. Glikolisis tidak memerlukan oksigen, sehingga dapat terjadi baik dalam kondisi aerob maupun anaerob.

Meskipun glikolisis terjadi tanpa oksigen, hasil akhirnya sangat penting bagi respirasi aerob karena asam piruvat yang dihasilkan kemudian masuk ke dalam mitokondria untuk diproses lebih lanjut dalam siklus Krebs dan rantai transpor elektron. Berikut adalah tahap-tahap utama dalam glikolisis.

##### 1) Tahap Persiapan (Investasi Energi)

Pada tahap awal glikolisis, glukosa diaktifkan dengan menggunakan dua molekul ATP untuk memulai proses pemecahan. Tahap ini sering disebut sebagai "fase investasi energi" karena energi dari ATP diperlukan untuk memecah glukosa menjadi dua molekul gula tiga karbon.

- ▷ Fosforilasi Glukosa: Glukosa diubah menjadi glukosa-6-fosfat oleh enzim heksokinase, menggunakan satu molekul ATP. Fosforilasi ini mencegah glukosa meninggalkan sel dan mempersiapkannya untuk reaksi selanjutnya.
- ▷ Isomerisasi: Glukosa-6-fosfat kemudian diubah menjadi fruktosa-6-fosfat oleh enzim fosfoheksosa isomerase.
- ▷ Fosforilasi Kedua: Fruktosa-6-fosfat diubah menjadi fruktosa-1,6-bifosfat dengan bantuan enzim fosfofruktokinase. Proses ini menggunakan satu lagi molekul ATP. Langkah ini merupakan titik pengendalian utama dalam glikolisis, di mana aktivitas enzim fosfofruktokinase diatur oleh konsentrasi ATP.

##### 2) Tahap Pemecahan

Fruktosa-1,6-bifosfat yang terbentuk pada tahap sebelumnya kemudian dipecah menjadi dua molekul tiga karbon: dihidroksiaseton fosfat (DHAP) dan gliseraldehida-3-fosfat (G3P). Reaksi ini dikatalisis oleh enzim aldolase.

- ▷ Isomerisasi DHAP: Dihidroksiaseton fosfat diubah menjadi gliseraldehida-3-fosfat oleh enzim triose fosfat isomerase, sehingga pada akhirnya terdapat dua molekul G3P yang masuk ke tahap berikutnya.

### 3) Tahap Penghasilan Energi (Pembentukan ATP)

Tahap ini melibatkan reaksi-reaksi yang menghasilkan energi dalam bentuk ATP dan molekul pembawa elektron NADH. Molekul-molekul gliseraldehida-3-fosfat mengalami serangkaian perubahan kimia, menghasilkan asam piruvat dan energi yang dapat digunakan oleh sel.

- ▷ Oksidasi dan Pembentukan NADH: Gliseraldehida-3-fosfat dioksidasi menjadi 1,3-bifosfoglicerat dengan bantuan enzim gliseraldehida-3-fosfat dehidrogenase. Dalam proses ini,  $\text{NAD}^+$  direduksi menjadi NADH, yang nantinya akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan lebih banyak ATP.
- ▷ Pembentukan ATP Pertama: 1,3-bifosfoglicerat kemudian diubah menjadi 3-fosfoglicerat oleh enzim fosfoglicerat kinase, dan satu molekul ATP dihasilkan dari setiap molekul G3P melalui reaksi fosforilasi tingkat substrat. Karena ada dua molekul G3P, dua molekul ATP dihasilkan pada tahap ini.
- ▷ Pembentukan Piruvat dan ATP Kedua: Reaksi terakhir dalam glikolisis adalah perubahan fosfoenolpiruvat menjadi piruvat oleh enzim piruvat kinase. Proses ini menghasilkan satu molekul ATP per molekul piruvat, sehingga dua molekul ATP dihasilkan dari dua molekul G3P.

### 4) Hasil Glikolisis

Secara keseluruhan, hasil dari glikolisis adalah sebagai berikut:

- ▷ Produk: Dua molekul asam piruvat, dua molekul NADH, dan dua molekul ATP (setelah dikurangi dua molekul ATP yang digunakan dalam tahap awal).
- ▷ Energi: Glikolisis menghasilkan sedikit energi langsung dalam bentuk ATP, tetapi lebih penting lagi adalah produksi NADH yang akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP tambahan.

### 5) Signifikansi Glikolisis

Glikolisis merupakan jalur penting dalam metabolisme energi karena merupakan sumber energi utama bagi sel-sel dalam berbagai kondisi, baik ketika ada oksigen maupun ketika oksigen terbatas (kondisi anaerob). Jika oksigen tersedia, piruvat akan masuk ke dalam mitokondria untuk diproses lebih lanjut melalui dekarboksilasi oksidatif dan siklus Krebs. Jika oksigen tidak tersedia, piruvat akan mengalami fermentasi untuk menghasilkan energi tambahan. Glikolisis juga sangat penting dalam jalur metabolisme lainnya. Banyak intermediet glikolisis yang dapat digunakan untuk sintesis senyawa penting lainnya, seperti asam amino, nukleotida, dan lipid.

#### b. Dekarboksilasi Oksidatif

Setelah proses glikolisis menghasilkan dua molekul asam piruvat dari satu molekul glukosa, molekul piruvat tersebut tidak langsung memasuki siklus Krebs. Sebelum itu, piruvat harus mengalami proses yang disebut dekarboksilasi oksidatif. Proses ini berlangsung di dalam mitokondria dan bertujuan untuk mempersiapkan piruvat menjadi asetyl-KoA (asetyl koenzim A), yang merupakan senyawa utama yang memasuki siklus Krebs.

#### Proses Dekarboksilasi Oksidatif

Dekarboksilasi oksidatif melibatkan serangkaian reaksi kimia yang dikatalisis oleh kompleks enzim yang dikenal sebagai piruvat dehidrogenase. Reaksi ini terjadi di dalam matriks mitokondria dan melibatkan tiga langkah utama:

##### 1) Transpor Piruvat ke Mitokondria

Setelah terbentuk di sitoplasma melalui glikolisis, piruvat diangkut melalui membran mitokondria luar dan dalam menuju matriks mitokondria, tempat dekarboksilasi oksidatif berlangsung.

Transportasi ini dibantu oleh protein transporter khusus yang memungkinkan piruvat melewati membran mitokondria.

## 2) Dekarboksilasi Piruvat

Di dalam matriks mitokondria, molekul piruvat ( $C_3H_4O_3$ ) mengalami dekarboksilasi, yaitu penghilangan satu gugus karboksil (-COOH) dalam bentuk karbon dioksida ( $CO_2$ ). Proses ini dikatalisis oleh kompleks enzim piruvat dehidrogenase. Akibat reaksi ini, molekul piruvat kehilangan satu atom karbon, dan yang tersisa adalah gugus asetil dua karbon ( $CH_3CO-$ ).

## 3) Pembentukan Asetil-KoA

Gugus asetil yang terbentuk dari dekarboksilasi kemudian berikatan dengan koenzim A (KoA) untuk membentuk asetil-KoA ( $C_2H_3O-SKoA$ ). Asetil-KoA adalah molekul penting yang akan memasuki siklus Krebs untuk melanjutkan proses katabolisme karbohidrat dan menghasilkan energi lebih lanjut dalam bentuk ATP.

## 4) Reduksi NAD\*

Menjadi NADH Selama proses dekarboksilasi oksidatif, molekul  $NAD^+$  direduksi menjadi NADH. Ini berarti bahwa elektron dan hidrogen yang dilepaskan selama dekarboksilasi ditangkap oleh  $NAD^+$ , yang berfungsi sebagai pembawa elektron. NADH yang terbentuk akan berperan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan lebih banyak ATP melalui proses fosforilasi oksidatif.

## 5) Hasil Dekarboksilasi Oksidatif

Dekarboksilasi oksidatif menghasilkan beberapa produk penting yang akan digunakan dalam tahap-tahap selanjutnya dari respirasi aerob:

- ▷ Asetil-KoA: Setiap molekul piruvat menghasilkan satu molekul asetil-KoA. Karena setiap molekul glukosa menghasilkan dua molekul piruvat dari glikolisis, dua molekul asetil-KoA akan dihasilkan untuk setiap molekul glukosa yang dimetabolisme.
- ▷ NADH: Setiap molekul piruvat menghasilkan satu molekul NADH. Dengan dua molekul piruvat per molekul glukosa, maka akan ada dua molekul NADH yang dihasilkan. NADH akan membawa elektron ke rantai transpor elektron di mitokondria untuk menghasilkan ATP.
- ▷  $CO_2$ : Setiap molekul piruvat menghasilkan satu molekul karbon dioksida ( $CO_2$ ) sebagai produk sampingan dekarboksilasi. Ini berarti, untuk setiap molekul glukosa yang dimetabolisme, dua molekul  $CO_2$  dilepaskan selama dekarboksilasi oksidatif.

## 6) Signifikansi Dekarboksilasi Oksidatif

Proses dekarboksilasi oksidatif sangat penting karena mempersiapkan asetil-KoA yang kemudian masuk ke dalam siklus Krebs. Asetil-KoA adalah senyawa dua karbon yang memasuki siklus Krebs dan memainkan peran sentral dalam penguraian lebih lanjut dari molekul glukosa dan produksi energi.

Selain itu, dekarboksilasi oksidatif juga menghasilkan NADH, yang berperan penting dalam rantai transpor elektron. NADH menyumbang elektron yang akan digunakan untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP di tahap akhir respirasi aerob. Dengan demikian, meskipun dekarboksilasi oksidatif tidak menghasilkan ATP secara langsung, ia berperan penting dalam mempersiapkan molekul untuk menghasilkan energi dalam jumlah besar melalui siklus Krebs dan rantai transpor elektron.

## 7) Regulasi Dekarboksilasi Oksidatif

Aktivitas enzim piruvat dehidrogenase diatur dengan ketat melalui mekanisme alosterik dan modifikasi kovalen (fosforilasi). Jika konsentrasi ATP tinggi, enzim ini akan dihambat untuk

mencegah pemborosan energi. Sebaliknya, jika konsentrasi ADP atau NAD<sup>+</sup> tinggi, enzim akan diaktifkan untuk meningkatkan produksi energi.

### c. Siklus Krebs

Siklus Krebs, juga dikenal sebagai siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat (TCA), adalah tahap sentral dalam respirasi seluler aerob yang terjadi di dalam matriks mitokondria. Siklus ini bertujuan untuk mengoksidasi asetil-KoA, yang terbentuk selama dekarboksilasi oksidatif, menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), serta menghasilkan elektron berenergi tinggi dalam bentuk NADH dan FADH<sub>2</sub>, yang akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP.

Siklus Krebs terdiri dari serangkaian reaksi kimia yang melibatkan enzim-enzim tertentu. Setiap molekul asetil-KoA yang memasuki siklus akan melewati delapan langkah enzimatik yang pada akhirnya menghasilkan ATP, NADH, FADH<sub>2</sub>, dan CO<sub>2</sub>.

#### Langkah utama dalam siklus krebs:

##### 1) Kondensasi Asetil-KoA dan Oksaloasetat

Langkah pertama siklus Krebs adalah kondensasi asetil-KoA (C<sub>2</sub>) dengan oksaloasetat (C<sub>4</sub>) untuk membentuk sitrat (C<sub>6</sub>). Reaksi ini dikatalisis oleh enzim sitrat sintase. Proses ini mengawali siklus dengan molekul enam karbon yang akan dipecah selama reaksi selanjutnya.

##### 2) Isomerisasi Sitrat menjadi Isositrat

Sitrat kemudian diisomerisasi menjadi isositrat oleh enzim akonitase melalui pembentukan senyawa perantara, yaitu cis-akonitat. Isomerisasi ini penting karena struktur isositrat lebih reaktif dan siap untuk dioksidasi pada langkah berikutnya.

##### 3) Dekarboksilasi Oksidatif Isositrat

Isositrat mengalami dekarboksilasi oksidatif oleh enzim isositrat dehidrogenase, menghasilkan a-ketoglutarat (C<sub>5</sub>), NADH, dan satu molekul karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Proses ini adalah tahap pertama di mana siklus Krebs menghasilkan CO<sub>2</sub>, salah satu produk akhir respirasi aerob.

##### 4) Dekarboksilasi Oksidatif a-Ketoglutarat

Pada langkah ini, a-ketoglutarat dioksidasi dan mengalami dekarboksilasi lagi oleh enzim a-ketoglutarat dehidrogenase, menghasilkan suksinil-KoA (C<sub>4</sub>), NADH, dan satu molekul CO<sub>2</sub>. Ini adalah langkah penting lain di mana NADH dihasilkan, yang nantinya akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk produksi ATP.

##### 5) Pembentukan GTP dari Suksinil-KoA

Suksinil-KoA kemudian dikonversi menjadi suksinat oleh enzim suksinil-KoA sintetase. Dalam proses ini, satu molekul guanosin trifosfat (GTP) dihasilkan melalui fosforilasi tingkat substrat. GTP ini dapat diubah menjadi ATP melalui transfer fosfat, sehingga memberikan energi langsung kepada sel.

##### 6) Oksidasi Suksinat menjadi Fumarat

Suksinat kemudian dioksidasi menjadi fumarat oleh enzim suksinat dehidrogenase, yang terletak pada membran dalam mitokondria. Proses ini menghasilkan FADH<sub>2</sub>, molekul pembawa elektron lain yang akan digunakan dalam rantai transpor elektron. Tidak seperti NADH, FADH<sub>2</sub> memasuki rantai transpor elektron di tahap yang lebih rendah, sehingga menghasilkan sedikit ATP.

##### 7) Hidrasi Fumarat menjadi Malat

Fumarat mengalami hidrasi (penambahan molekul air) menjadi malat, reaksi ini dikatalisis oleh enzim fumarase. Reaksi ini mempersiapkan malat untuk langkah oksidasi terakhir dalam siklus Krebs.

8) Oksidasi Malat menjadi Oksaloasetat

Langkah terakhir siklus Krebs adalah oksidasi malat menjadi oksaloasetat oleh enzim malat dehidrogenase. Reaksi ini menghasilkan NADH dan mengembalikan oksaloasetat, yang kemudian akan bereaksi lagi dengan asetil-KoA untuk memulai siklus Krebs dari awal.

### Hasil dari Siklus Krebs

Untuk setiap molekul asetil-KoA yang masuk ke siklus Krebs, berikut adalah hasil-hasil yang diperoleh:

- ▷ 3 molekul NADH: NADH yang dihasilkan pada tiga titik berbeda dalam siklus akan berperan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP.
- ▷ 1 molekul FADH<sub>2</sub>: FADH<sub>2</sub> juga berfungsi dalam rantai transpor elektron.
- ▷ 1 molekul GTP (atau ATP): Energi yang dihasilkan dalam bentuk GTP dapat diubah menjadi ATP.
- ▷ 2 molekul CO<sub>2</sub>: Karbon dioksida dilepaskan sebagai produk sampingan dari dekarboksilasi isositrat dan α-ketoglutarat.
- ▷ Oksaloasetat: Oksaloasetat diregenerasi untuk melanjutkan siklus dan bereaksi dengan asetil-KoA berikutnya.

Karena setiap molekul glukosa yang terurai melalui glikolisis menghasilkan dua molekul asetil-KoA, siklus Krebs berputar dua kali untuk setiap molekul glukosa. Ini berarti bahwa hasil siklus Krebs untuk satu molekul glukosa adalah dua kali lipat dari yang disebutkan di atas: 6 NADH, 2 FADH<sub>2</sub>, 2 GTP (atau ATP), dan 4 CO<sub>2</sub>.

### Signifikansi Siklus Krebs

Siklus Krebs adalah pusat metabolisme sel karena tidak hanya menyediakan elektron berenergi tinggi untuk produksi ATP melalui rantai transpor elektron, tetapi juga menghasilkan intermediat penting yang digunakan dalam sintesis asam amino, asam lemak, dan senyawa lain. Selain itu, siklus ini berfungsi sebagai penghubung antara berbagai jalur metabolismik, memungkinkan sel untuk mengelola sumber energi dan bahan baku dengan efisien.

Siklus Krebs juga berperan penting dalam produksi karbon dioksida yang dihilangkan oleh tubuh melalui pernapasan. Karena sebagian besar karbon dioksida dihasilkan selama siklus ini, respirasi aerob secara keseluruhan tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga mengatur sisa metabolismik seperti CO<sub>2</sub>.

### Regulasi Siklus Krebs

Siklus Krebs diatur dengan ketat untuk memastikan keseimbangan antara kebutuhan energi sel dan ketersediaan bahan baku. Beberapa enzim dalam siklus ini diatur oleh konsentrasi ATP, ADP, NADH, dan NAD<sup>+</sup>. Jika tingkat energi (ATP) tinggi, siklus Krebs akan diperlambat. Sebaliknya, jika tingkat energi rendah (ADP dan NAD<sup>+</sup> tinggi), aktivitas enzim akan meningkat untuk mempercepat siklus dan menghasilkan lebih banyak ATP.

#### d. Rantai Transpor Elektron

Rantai transpor elektron (Electron Transport Chain, ETC) adalah tahap terakhir dalam respirasi aerob, di mana energi dari elektron berenergi tinggi yang dihasilkan selama glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, dan siklus Krebs digunakan untuk menghasilkan ATP dalam jumlah besar. Proses ini terjadi di membran dalam mitokondria dan melibatkan serangkaian kompleks protein yang berperan sebagai pembawa elektron. Selain menghasilkan ATP, rantai transpor elektron juga menghasilkan air sebagai produk sampingan melalui reaksi dengan oksigen.

## Komponen Utama Rantai Transpor Elektron

Rantai transpor elektron terdiri dari empat kompleks protein utama dan dua pembawa elektron yang bergerak bebas, yaitu koenzim Q (ubikuinon) dan sitokrom c. Berikut adalah komponen-komponen utama rantai transpor elektron:

▷ **Kompleks I: NADH dehidrogenase (NADH-Q oksidoreduktase)**

Kompleks ini menerima elektron dari NADH yang dihasilkan selama glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, dan siklus Krebs. NADH menyerahkan elektronnya kepada kompleks I, yang kemudian mentransfer elektron ke koenzim Q. Selama proses ini, proton ( $H^+$ ) dipompa dari matriks mitokondria ke ruang antarmembran, menciptakan gradien proton.

▷ **Kompleks II: Succinyl dehidrogenase (suksinat-Q reduktase)**

Kompleks II menerima elektron dari  $FADH_2$  yang dihasilkan dalam siklus Krebs. Tidak seperti kompleks I, kompleks II tidak memompa proton melintasi membran, tetapi langsung mentransfer elektron ke koenzim Q, yang kemudian membawa elektron ke kompleks III.

▷ **Koenzim Q (Ubikuinon)**

Koenzim Q adalah pembawa elektron yang larut dalam lipid dan bertindak sebagai penghubung antara kompleks I dan II dengan kompleks III. Koenzim Q membawa elektron dari NADH dan  $FADH_2$  menuju kompleks III.

▷ **Kompleks III: Sitokrom  $bc_1$  (Q-sitokrom c oksidoreduktase)**

Kompleks ini menerima elektron dari koenzim Q dan mentransfernya ke sitokrom c. Selama transfer elektron ini, proton juga dipompa ke ruang antar membran, yang semakin memperkuat gradien proton.

▷ **Sitokrom c**

Sitokrom c adalah protein kecil yang bergerak bebas di permukaan membran dalam mitokondria dan membawa elektron dari kompleks III ke kompleks IV.

▷ **Kompleks IV: Sitokrom c oksidase**

Kompleks IV menerima elektron dari sitokrom c dan mentransfernya ke oksigen, yang merupakan akseptor elektron terakhir. Oksigen kemudian bereaksi dengan proton ( $H^+$ ) untuk membentuk air ( $H_2O$ ). Proses ini juga memompa proton ke ruang antar membran.

## Gradien Proton dan ATP Sintase

Salah satu hasil utama dari rantai transpor elektron adalah pembentukan gradien proton di seluruh membran dalam mitokondria. Proton dipompa dari matriks mitokondria ke ruang antar membran oleh kompleks I, III, dan IV. Akumulasi proton di ruang antar membran menciptakan gradien elektrokimia yang dikenal sebagai gaya gerak proton (proton motive force).

Gradien ini kemudian digunakan oleh enzim ATP sintase, yang terletak di membran dalam mitokondria, untuk menghasilkan ATP. Proton kembali ke matriks mitokondria melalui saluran pada ATP sintase, yang menggunakan energi aliran proton untuk menggabungkan ADP dan fosfat anorganik (Pi) menjadi ATP. Proses ini dikenal sebagai fosforilasi oksidatif.

## Hasil Rantai Transpor Elektron

Untuk setiap molekul glukosa yang dioksidasi secara sempurna, rantai transpor elektron menghasilkan ATP dalam jumlah yang signifikan:

- ▷ NADH: Setiap molekul NADH yang memasuki rantai transpor elektron menghasilkan sekitar 2,5 molekul ATP.

- ▷  $\text{FADH}_2$ : Setiap molekul  $\text{FADH}_2$  menghasilkan sekitar 1,5 molekul ATP, karena  $\text{FADH}_2$  memasuki rantai pada kompleks II, yang tidak memompa proton.

Secara total, satu molekul glukosa yang dioksidasi melalui glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron menghasilkan sekitar 30 hingga 32 molekul ATP, tergantung pada efisiensi transportasi dan penggunaan NADH dan  $\text{FADH}_2$ .

### Oksigen sebagai Akseptor Elektron Terakhir

Salah satu peran paling penting dalam rantai transpor elektron adalah penggunaan oksigen sebagai akseptor elektron terakhir. Ketika elektron melewati kompleks I, III, dan IV, mereka kehilangan energi, dan pada akhirnya diterima oleh oksigen di kompleks IV. Oksigen kemudian berikatan dengan proton ( $\text{H}^+$ ) untuk membentuk air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Tanpa oksigen, elektron tidak dapat ditransfer, dan seluruh proses rantai transpor elektron akan terhenti, yang berarti tidak ada ATP yang dapat dihasilkan melalui fosforilasi oksidatif.

### Pengambatan Rantai Transpor Elektron

Beberapa racun dan senyawa kimia dapat menghambat rantai transpor elektron dengan mengganggu kompleks tertentu, yang menyebabkan penghentian produksi ATP dan bisa berakibat fatal:

- ▷ Sianida dan karbon monoksida: Menghambat kompleks IV dengan menghalangi transfer elektron ke oksigen.
- ▷ Rotenone: Menghambat kompleks I dan mencegah transfer elektron dari NADH ke koenzim Q.
- ▷ Antimycin A: Menghambat kompleks III, sehingga memblokir transfer elektron dari koenzim Q ke sitokrom c.

### Signifikansi Rantai Transpor Elektron

Rantai transpor elektron adalah sumber utama produksi energi dalam sel eukariotik. Proses ini tidak hanya menghasilkan ATP dalam jumlah besar, tetapi juga memastikan bahwa oksigen, yang kita hirup selama respirasi, digunakan secara efektif dalam produksi energi. Selain itu, rantai transpor elektron menjaga keseimbangan metabolisme dengan mendaur ulang  $\text{NAD}^+$  dan FAD, yang diperlukan untuk berlangsungnya glikolisis dan siklus Krebs.

## Respirasi Anaerob

Respirasi anaerob adalah proses penguraian glukosa untuk menghasilkan energi dalam kondisi tanpa oksigen. Respirasi anaerob tidak menghasilkan ATP sebanyak respirasi aerob, tetapi tetap penting, terutama dalam kondisi di mana oksigen tidak tersedia. Ada dua jalur utama respirasi anaerob, yaitu fermentasi alkohol dan fermentasi asam laktat, yang terjadi pada organisme dan jaringan yang berbeda.

### a. Fermentasi Alkohol

Fermentasi alkohol adalah jalur respirasi anaerob yang terjadi terutama pada ragi (yeast) dan beberapa jenis bakteri. Proses ini mengubah glukosa menjadi etanol dan karbon dioksida sambil menghasilkan sejumlah kecil energi dalam bentuk ATP. Fermentasi alkohol digunakan dalam produksi minuman beralkohol dan roti.



**Proses fermentasi alkohol melibatkan dua tahap utama:**

**1) Glikolisis**

Sama seperti respirasi aerob, fermentasi alkohol dimulai dengan glikolisis. Selama glikolisis, satu molekul glukosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) dipecah menjadi dua molekul piruvat ( $C_3H_4O_3$ ), menghasilkan dua molekul ATP dan dua molekul NADH. Glikolisis terjadi di sitoplasma dan tidak memerlukan oksigen.

**2) Dekarboksilasi Piruvat menjadi Asetaldehida**

Dalam kondisi anaerob, piruvat tidak masuk ke mitokondria untuk diproses lebih lanjut dalam siklus Krebs. Sebaliknya, piruvat mengalami dekarboksilasi oleh enzim piruvat dekarboksilase, yang melepaskan satu molekul karbon dioksida ( $CO_2$ ) dari setiap molekul piruvat, menghasilkan asetaldehida ( $C_2H_4O$ ).

**3) Reduksi Asetaldehida menjadi Etanol Asetaldehida**

Asetaldehid kemudian direduksi menjadi etanol ( $C_2H_5OH$ ) oleh enzim alkohol dehidrogenase, menggunakan elektron dari NADH yang dihasilkan selama glikolisis. Proses ini juga meregenerasi  $NAD^+$ , yang diperlukan untuk memastikan bahwa glikolisis dapat terus berlangsung. Regenerasi  $NAD^+$  penting untuk menjaga aliran energi di bawah kondisi anaerob.

**Hasil Fermentasi Alkohol**

Untuk setiap molekul glukosa yang diuraikan melalui fermentasi alkohol, hasil akhirnya adalah:

- ▷ 2 molekul etanol: Produk akhir dari reduksi asetaldehida.
- ▷ 2 molekul karbon dioksida ( $CO_2$ ): Dihasilkan selama dekarboksilasi piruvat.
- ▷ 2 molekul ATP: Energi yang dihasilkan selama glikolisis.
- ▷  $NAD^+$ : Regenerasi  $NAD^+$  dari NADH memungkinkan glikolisis terus berlangsung.

**Aplikasi Fermentasi Alkohol**

- ▷ Produksi Minuman Beralkohol: Dalam industri pembuatan bir dan anggur, ragi digunakan untuk memfermentasi gula dalam buah atau biji-bijian menjadi alkohol dan karbon dioksida.
- ▷ Pembuatan Roti: Dalam pembuatan roti, karbon dioksida yang dihasilkan dari fermentasi alkohol menyebabkan adonan roti mengembang. Meskipun etanol juga diproduksi, ia menguap selama proses pemanggangan.

**b. Fermentasi Asam Laktat**

Fermentasi asam laktat terjadi di sel otot manusia selama aktivitas fisik yang intens ketika suplai oksigen terbatas. Selain itu, fermentasi asam laktat juga terjadi pada bakteri tertentu, seperti bakteri asam laktat (misalnya *Lactobacillus*), yang digunakan dalam produksi produk susu fermentasi seperti yogurt dan kefir. Fermentasi asam laktat juga dimulai dengan glikolisis, tetapi memiliki jalur akhir yang berbeda dari fermentasi alkohol.

**Proses Fermentasi Asam Laktat:**

**1) Glikolisis**

Sama seperti pada fermentasi alkohol, fermentasi asam laktat dimulai dengan glikolisis. Glukosa dipecah menjadi dua molekul piruvat, menghasilkan dua molekul ATP dan dua molekul NADH.



## 2) Reduksi Piruvat menjadi Asam Laktat

Dalam kondisi anaerob, piruvat tidak diubah menjadi asetaldehida, melainkan langsung direduksi menjadi asam laktat ( $C_3H_6O_3$ ) oleh enzim laktat dehidrogenase. NADH yang dihasilkan selama glikolisis digunakan untuk mereduksi piruvat, dan  $NAD^+$  diregenerasi selama proses ini.

Fermentasi asam laktat tidak menghasilkan karbon dioksida, karena piruvat hanya diubah menjadi laktat tanpa melepaskan gugus karboksil.

### Hasil Fermentasi Asam Laktat

Untuk setiap molekul glukosa yang diuraikan melalui fermentasi asam laktat, hasilnya adalah:

- ▷ 2 molekul asam laktat: Produk akhir dari reduksi piruvat.
- ▷ 2 molekul ATP: Energi yang dihasilkan selama glikolisis.
- ▷  $NAD^+$ : Regenerasi  $NAD^+$  yang memungkinkan glikolisis untuk terus menghasilkan ATP.

### Signifikansi Fermentasi Asam Laktat

- ▷ Pada Otot Manusia: Fermentasi asam laktat terjadi ketika otot bekerja keras dan tidak mendapatkan cukup oksigen untuk respirasi aerob. Asam laktat yang dihasilkan menumpuk di dalam otot, menyebabkan kelelahan dan rasa nyeri otot. Namun, setelah aktivitas berhenti dan oksigen tersedia kembali, asam laktat diubah kembali menjadi piruvat atau diangkut ke hati untuk diubah menjadi glukosa melalui proses glukoneogenesis.
- ▷ Dalam Produksi Makanan: Bakteri asam laktat digunakan dalam produksi berbagai makanan fermentasi, seperti yogurt, keju, sauerkraut, dan kimchi. Fermentasi asam laktat memberikan rasa asam yang khas pada produk-produk tersebut

### Contoh Soal

Apa dampak fisiologis dari penumpukan asam laktat di otot, dan bagaimana tubuh mengatasinya?

#### Jawaban:

Penumpukan asam laktat menyebabkan rasa nyeri dan kelelahan otot. Tubuh mengatasinya dengan mengubah kembali asam laktat menjadi piruvat saat oksigen tersedia atau mengangkutnya ke hati untuk proses glukoneogenesis.

#### Pembahasan:

Fermentasi asam laktat terjadi saat oksigen terbatas. Asam laktat sebagai produk akhirnya dapat menumpuk di jaringan otot, namun setelah suplai oksigen membaik, tubuh dapat mendaur ulang asam laktat agar tidak menumpuk dan menyebabkan gangguan metabolismik.



## 4. Membongkar Rahasia Lemak dan Protein: Sumber Energi Tersembunyi

### Katabolisme Lemak

Lemak, terutama dalam bentuk trigliserida, adalah salah satu sumber energi yang paling kaya bagi tubuh. Ketika glukosa tidak mencukupi atau selama keadaan puasa, tubuh mengandalkan lemak sebagai sumber energi utama. Katabolisme lemak, yang dikenal sebagai lipolisis, melibatkan pemecahan trigliserida menjadi asam lemak bebas dan gliserol, yang kemudian dimetabolisme lebih lanjut untuk menghasilkan ATP.

Proses katabolisme lemak dapat dibagi menjadi beberapa langkah utama:

#### 1) Lipolisis: Pemecahan Trigliserida

Trigliserida adalah bentuk penyimpanan lemak utama dalam sel-sel lemak (adiposit) dan jaringan lainnya. Lipolisis adalah proses yang menguraikan trigliserida menjadi gliserol dan asam lemak bebas:

- ▷ Trigliserida → Gliserol + Asam Lemak

Enzim lipase hormon-sensitif menghidrolisis trigliserida di jaringan adiposa, menghasilkan satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak bebas.

- ▷ Gliserol yang dihasilkan masuk ke jalur glikolisis atau dapat berpartisipasi dalam proses glukoneogenesis di hati, yang memungkinkan pembentukan glukosa baru dari gliserol selama keadaan kekurangan glukosa

#### 2) Beta-Oksidasi: Penguraian Asam Lemak

Setelah trigliserida dipecah, asam lemak bebas diangkut ke dalam mitokondria melalui mekanisme khusus yang melibatkan karnitin. Di dalam mitokondria, asam lemak mengalami beta-oksidasi, yaitu serangkaian reaksi yang memecah asam lemak menjadi unit dua karbon dalam bentuk asetil-KoA.

**Proses beta-oksidasi terjadi beberapa tahap:**

- ▷ **Aktivasi Asam Lemak:** Asam lemak diaktifkan dengan mengikat koenzim A (KoA), membentuk asil-KoA, menggunakan energi dari ATP.
- ▷ **Transportasi melalui Karnitin:** Asil-KoA tidak bisa melewati membran mitokondria secara langsung. Ia harus diangkut melalui sistem karnitin. Enzim karnitin asiltransferase membantu memindahkan asil-KoA ke dalam matriks mitokondria.
- ▷ **Pemecahan Beta-Oksidasi:** Setiap siklus beta-oksidasi menghilangkan dua atom karbon dari ujung asil-KoA, menghasilkan asetil-KoA, NADH, dan FADH<sub>2</sub>. Asetil-KoA kemudian memasuki siklus Krebs untuk dioksidasi lebih lanjut, sedangkan NADH dan FADH<sub>2</sub> berperan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP.

Setiap putaran beta-oksidasi memotong dua karbon dari rantai asam lemak, sehingga asam lemak dengan panjang rantai tertentu akan mengalami beberapa putaran sebelum habis. Sebagai contoh, asam lemak palmitat (C<sub>16</sub>) akan menjalani 7 putaran beta-oksidasi, menghasilkan 8 asetil-KoA, 7 NADH, dan 7 FADH<sub>2</sub>.

- ▷ **Produksi Energi dari Lemak**

Setelah beta-oksidasi, produk asetil-KoA yang dihasilkan akan memasuki siklus Krebs, dan NADH serta FADH<sub>2</sub> akan memasuki rantai transpor elektron. Setiap molekul asam lemak dapat menghasilkan ATP dalam jumlah besar dibandingkan dengan karbohidrat. Sebagai contoh, oksidasi lengkap asam lemak palmitat dapat menghasilkan hingga 106 molekul ATP.

▷ **Ketogenesis: Pembentukan Badan Keton**

Ketika kadar glukosa sangat rendah, seperti selama puasa panjang atau diabetes, hati mengubah sebagian asetil-KoA yang dihasilkan dari beta-oksidasi menjadi badan keton (seperti aseton, asetoasetat, dan beta-hidroksibutirat). Proses ini dikenal sebagai ketogenesis. Badan keton dapat digunakan oleh otot, jantung, dan otak sebagai sumber energi alternatif selama kekurangan glukosa.

## Katabolisme Protein

Selain lemak dan karbohidrat, protein juga dapat dimetabolisme untuk menghasilkan energi, terutama selama kondisi kekurangan makanan atau ketika tubuh membutuhkan asam amino untuk sintesis protein. Protein biasanya tidak digunakan sebagai sumber energi utama, tetapi ketika tubuh kekurangan energi dari lemak dan karbohidrat, protein akan diuraikan.

a. **Proteolisis: Pemecahan Protein**

Protein dipecah menjadi asam amino melalui proses proteolisis, yang melibatkan enzim protease. Proses ini terjadi di berbagai tempat dalam tubuh, termasuk di saluran pencernaan dan dalam sel-sel tubuh. Di saluran pencernaan, protein dipecah menjadi asam amino oleh enzim seperti pepsin di lambung dan tripsin serta kimotripsin di usus halus. Asam amino kemudian diserap ke dalam aliran darah dan diangkut ke berbagai jaringan tubuh.

b. **Deaminasi: Pemecahan Asam Amino**

Dalam sel, asam amino dapat digunakan untuk sintesis protein baru atau mengalami deaminasi jika digunakan untuk energi. Deaminasi adalah proses penghilangan gugus amino ( $-\text{NH}_2$ ) dari asam amino, yang menghasilkan amonia ( $\text{NH}_3$ ) dan kerangka karbon asam amino.

- ▷ **Kerangka Karbon:** Setelah deaminasi, kerangka karbon asam amino dapat diubah menjadi piruvat, asetil-KoA, atau senyawa lain yang dapat memasuki siklus Krebs. Asam amino yang dapat diubah menjadi glukosa disebut glukogenik, sedangkan asam amino yang diubah menjadi asetil-KoA atau badan keton disebut ketogenik.
- ▷ **Siklus Urea:** Amonia yang dihasilkan dari deaminasi bersifat toksik, sehingga harus diubah menjadi urea melalui siklus urea di hati. Urea kemudian dikeluarkan dari tubuh melalui urin.

c. **Produksi Energi dan Protein**

Setelah deaminasi, kerangka karbon yang tersisa dari asam amino dapat masuk ke jalur metabolismik untuk menghasilkan energi. Asam amino yang masuk ke siklus Krebs dapat dioksidasi lebih lanjut untuk menghasilkan  $\text{NADH}$ ,  $\text{FADH}_2$ , dan  $\text{ATP}$ . Namun, jumlah energi yang dihasilkan dari protein lebih rendah dibandingkan dengan lemak atau karbohidrat.



## Contoh Soal

Mengapa tubuh membentuk badan keton selama kelaparan atau kekurangan glukosa, dan bagaimana badan keton digunakan oleh tubuh?

### Jawaban:

Badan keton terbentuk saat kadar glukosa rendah karena tubuh mengalihkan asetil-KoA dari beta-oksidasi menjadi badan keton di hati. Badan keton ini dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif oleh otak, jantung, dan otot.

### Pembahasan:

Selama puasa atau kondisi seperti diabetes, glukosa tidak cukup tersedia untuk menghasilkan energi. Karena itu, tubuh memecah lemak menjadi asetil-KoA dan mengubahnya menjadi badan keton. Badan keton bersifat larut dalam air dan dapat melewati sawar darah-otak, sehingga sangat penting sebagai cadangan energi untuk otak.



## 5. Rahasia Metabolisme: Anabolisme, Katabolisme, dan Pengelolaan Berat Badan

### Pengaruh Protein pada Rasa Kenyang



Metabolisme merupakan rangkaian reaksi kimia yang terjadi dalam setiap sel organisme hidup. Proses ini mencakup semua aktivitas biokimia

Salah satu keuntungan utama dari diet tinggi protein adalah kemampuannya untuk meningkatkan rasa kenyang. Protein memiliki efek yang lebih besar pada rasa kenyang dibandingkan dengan karbohidrat atau lemak. Meningkatkan asupan protein dalam makanan harian dapat mengurangi rasa lapar dan mengontrol asupan kalori, yang sangat penting dalam pengelolaan berat badan.

Protein bekerja dengan beberapa mekanisme dalam mempromosikan rasa kenyang:

- ▷ Hormon Pengatur Nafsu Makan: Protein merangsang pelepasan hormon seperti peptida YY (PYY) dan cholecystokinin (CCK) yang menekan rasa lapar, sambil mengurangi kadar hormon ghrelin, yang dikenal sebagai hormon pemicu rasa lapar.
- ▷ Pengurangan Asupan Kalori: Karena protein lebih mengenyangkan, orang yang mengikuti diet tinggi protein cenderung secara alami mengonsumsi lebih sedikit kalori, yang berkontribusi pada defisit kalori yang diperlukan untuk penurunan berat badan.

### Termogenesis yang Ditingkatkan

Protein memiliki efek termogenik yang lebih besar dibandingkan dengan karbohidrat atau lemak. Efek termogenik makanan adalah jumlah energi yang diperlukan tubuh untuk mencerna, menyerap, dan memproses makanan. Proses ini membutuhkan lebih banyak energi untuk protein, yang berarti tubuh akan membakar lebih banyak kalori setelah makan makanan tinggi protein. Secara umum, efek termogenik protein diperkirakan sekitar 20–30% dari total energi yang dikonsumsi melalui makanan, sedangkan lemak hanya sekitar 0–3%, dan karbohidrat sekitar 5–10%. Ini berarti mengonsumsi makanan kaya protein akan meningkatkan pengeluaran energi secara keseluruhan, yang membantu dalam upaya penurunan berat badan.

### Proteksi terhadap Hilangnya Massa Otot

Selama proses penurunan berat badan, salah satu tantangan utama adalah kehilangan massa otot, terutama jika asupan protein tidak mencukupi. Massa otot adalah faktor penting dalam metabolisme basal tubuh karena otot membakar lebih banyak kalori daripada lemak bahkan saat tubuh sedang beristirahat. Kehilangan otot dapat memperlambat metabolisme dan menghambat penurunan berat badan jangka panjang.

Diet tinggi protein membantu melindungi massa otot selama periode penurunan berat badan, terutama ketika diet tersebut digabungkan dengan latihan kekuatan atau resistensi. Dengan mempertahankan

massa otot, metabolisme basal tetap lebih tinggi, yang pada gilirannya mendukung penurunan lemak tubuh secara efektif tanpa mengorbankan otot.

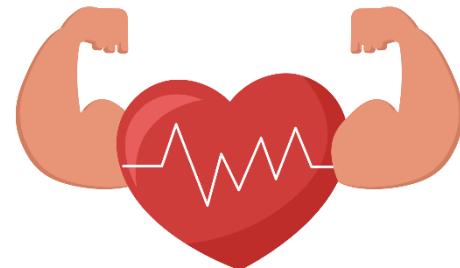
## Efektivitas dalam Diet Rendah Karbohidrat

Diet tinggi protein sering kali dikaitkan dengan diet rendah karbohidrat, seperti diet ketogenik atau diet Atkins. Kombinasi ini dianggap efektif untuk penurunan berat badan, karena pengurangan karbohidrat memaksa tubuh untuk menggunakan lemak sebagai sumber energi utama melalui produksi badan keton (ketosis). Diet tinggi protein dalam konteks rendah karbohidrat memberikan asupan protein yang memadai untuk menjaga otot dan meningkatkan metabolisme lemak. Banyak penelitian menunjukkan bahwa diet tinggi protein dan rendah karbohidrat lebih efektif dalam jangka pendek untuk menurunkan berat badan dibandingkan dengan diet rendah lemak. Namun, efektivitas jangka panjang masih memerlukan lebih banyak penelitian, terutama dalam hal keseimbangan gizi dan pemeliharaan kesehatan metabolismik.



### Tubuhmu Tukang Bangun!

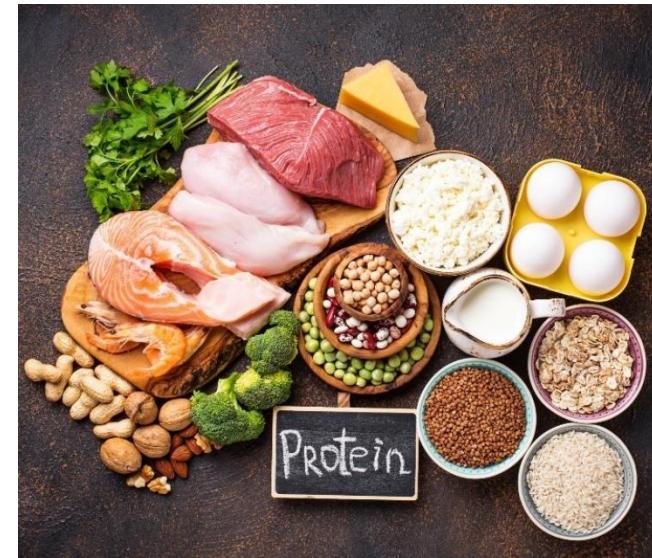
Tanpa disadari, tubuh kita selalu "membangun" dari molekul kecil. Proses anabolisme menyusun zat sederhana menjadi zat kompleks, seperti membuat protein dari asam amino. Paling aktif setelah olahraga dan tidur, anabolisme penting untuk pertumbuhan dan pemuliharaan tubuh.



## Sumber Protein dalam Diet Tinggi Protein

Ketika mengikuti diet tinggi protein, penting untuk memilih sumber protein yang sehat untuk memastikan bahwa diet tetap seimbang dan bergizi. Beberapa sumber protein sehat meliputi:

- Protein Hewani:** Daging tanpa lemak (seperti ayam, kalkun, dan ikan), telur, dan produk susu rendah lemak adalah sumber protein yang umum. Meskipun protein hewani memiliki asam amino esensial lengkap, beberapa sumber protein hewani yang tinggi lemak jenuh (seperti daging merah berlemak) sebaiknya dikonsumsi dalam jumlah terbatas.
- Protein Nabati:** Kacang-kacangan, biji-bijian, tahu, tempe, dan quinoa adalah sumber protein nabati yang baik. Protein nabati cenderung rendah lemak jenuh dan lebih tinggi serat, menjadikannya pilihan sehat untuk diet tinggi protein. Namun, perlu kombinasi untuk memastikan asupan asam amino esensial yang lengkap.
- Suplemen Protein:** Dalam beberapa kasus, terutama bagi mereka yang memiliki kebutuhan protein yang lebih tinggi, seperti atlet atau individu dengan aktivitas fisik intens, suplemen protein seperti whey protein atau protein kedelai bisa menjadi tambahan yang berguna.



## Potensi Risiko dan Pertimbangan

Meskipun diet tinggi protein memiliki banyak manfaat untuk penurunan berat badan, ada beberapa potensi risiko yang harus diperhatikan:

- a. **Beban pada Ginjal:** Asupan protein yang sangat tinggi dapat meningkatkan beban kerja ginjal, terutama pada individu dengan gangguan ginjal. Oleh karena itu, penting untuk mempertahankan asupan protein dalam batas yang aman dan seimbang, serta berkonsultasi dengan ahli gizi atau profesional kesehatan.
- b. **Kekurangan Nutrisi Lain:** Mengikuti diet tinggi protein tanpa memperhatikan asupan karbohidrat dan lemak sehat dapat menyebabkan kekurangan nutrisi penting, seperti serat, vitamin, dan mineral. Oleh karena itu, penting untuk menjaga keseimbangan nutrisi dan memastikan diet tetap bervariasi.
- c. **Peningkatan Asam Urat:** Diet tinggi protein, terutama protein hewani, dapat meningkatkan produksi asam urat dalam tubuh, yang berpotensi menyebabkan atau memperparah kondisi seperti asam urat (gout).

## Contoh Soal

Mengapa diet tinggi protein efektif untuk menurunkan berat badan dan bagaimana mekanismenya dalam tubuh?

**Jawaban:** Diet tinggi protein efektif menurunkan berat badan karena meningkatkan rasa kenyang, meningkatkan efek termogenik tubuh, serta mempertahankan massa otot. Protein memicu hormon penekan nafsu makan seperti PYY dan CCK, serta meningkatkan pembakaran kalori karena efek termogeniknya tinggi (20–30%). Selain itu, protein membantu menjaga otot saat kalori dikurangi.

### Pembahasan:

Diet tinggi protein bekerja melalui tiga mekanisme utama:

1. Meningkatkan rasa kenyang: Protein menstimulasi hormon yang mengurangi rasa lapar dan menurunkan hormon ghrelin.
2. Meningkatkan termogenesis: Tubuh membutuhkan lebih banyak energi untuk mencerna protein dibanding karbohidrat dan lemak, sehingga kalori terbakar lebih banyak setelah makan.
3. Melindungi massa otot: Saat diet, protein menjaga otot agar tidak hilang. Karena otot penting untuk metabolisme, maka menjaga otot akan membantu pembakaran kalori tetap tinggi, bahkan saat istirahat.

Namun, penting juga untuk memperhatikan keseimbangan nutrisi dan kesehatan ginjal, serta memilih sumber protein yang sehat dari hewani maupun nabati.



## 6. Anabolisme: Dari Molekul Sederhana ke Kompleksitas Kehidupan

### Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses biokimia di mana energi cahaya diubah menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa. Proses ini terjadi pada tumbuhan, alga, dan beberapa bakteri. Fotosintesis tidak hanya penting bagi organisme yang melakukan proses ini, tetapi juga bagi seluruh ekosistem karena menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan dan menyediakan dasar bagi rantai makanan. Reaksi kimia dari fotosintesis dapat dilihat dibawah ini:

Fotosintesis berlangsung di dalam kloroplas, organel khusus yang mengandung pigmen hijau yang disebut klorofil. Reaksi fotosintesis dapat dibagi menjadi dua tahap utama:

- Reaksi Terang:** Tahap ini bergantung pada cahaya dan berlangsung di membran tilakoid kloroplas.
- Reaksi Gelap (Siklus Calvin):** Tahap ini tidak memerlukan cahaya dan berlangsung di stroma kloroplas.



Proses Fotosintesis – Canva Studio

### Kloroplas sebagai Tempat Fotosintesis

Fotosintesis terjadi di dalam kloroplas, yang terutama ditemukan pada sel daun tumbuhan. Kloroplas memiliki struktur yang memungkinkan terjadinya proses fotosintesis secara efisien:

- Tilakoid:** Struktur seperti cakram yang tersusun dalam tumpukan yang disebut granum. Membran tilakoid mengandung klorofil, pigmen yang menangkap cahaya dan memulai reaksi fotosintesis.
- Stroma:** Ruang di luar tilakoid di dalam kloroplas, tempat reaksi gelap (Siklus Calvin) terjadi. Stroma mengandung enzim-enzim penting yang terlibat dalam konversi karbon dioksida menjadi glukosa.

### Fotosistem

Proses fotosintesis dimulai dengan penangkapan cahaya oleh kompleks protein yang disebut fotosistem. Ada dua jenis fotosistem yang terlibat dalam fotosintesis: Fotosistem I (PSI) dan Fotosistem II (PSII). Kedua fotosistem ini bekerja sama untuk memindahkan elektron melalui rantai transpor elektron, yang menghasilkan ATP dan NADPH yang diperlukan untuk reaksi gelap.

- Fotosistem II (PSII):** PSII berfungsi sebagai titik awal dalam rantai transpor elektron. Cahaya yang diserap oleh klorofil menyebabkan eksitasi elektron, yang kemudian dipindahkan melalui serangkaian pembawa elektron. Selama proses ini, air dipecah menjadi oksigen, proton, dan elektron melalui fotolisis.
- Fotosistem I (PSI):** Elektron dari PSII akhirnya mencapai PSI, di mana mereka dieksitasi kembali oleh cahaya. PSI berfungsi untuk memproduksi NADPH, yang akan digunakan dalam Siklus Calvin.

## Tahapan Reaksi Fotosintesis

Reaksi fotosintesis dapat dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu Reaksi Terang dan Reaksi Gelap. Reaksi terang terjadi di tilakoid dan menghasilkan energi dalam bentuk ATP dan NADPH, sementara reaksi gelap terjadi di stroma dan menggunakan energi tersebut untuk mensintesis glukosa dari karbon dioksida.

### a. Reaksi Terang

Reaksi terang berlangsung di membran tilakoid dan merupakan tahap pertama dari fotosintesis.

Reaksi ini melibatkan penyerapan cahaya oleh klorofil, pemindahan elektron, dan pembentukan ATP dan NADPH.

#### ▷ Aliran Elektron Nonsiklik

Dalam aliran elektron nonsiklik, elektron dipindahkan dari air menuju fotosistem II (PSII), kemudian melalui rantai transpor elektron ke fotosistem I (PSI), dan akhirnya digunakan untuk mereduksi  $\text{NADP}^+$  menjadi NADPH. Proses ini menghasilkan ATP melalui fotofosforilasi dan melepaskan oksigen sebagai produk sampingan.

#### Langkah-langkah dalam aliran elektron nonsiklik:

- Penyerapan Cahaya di PSII: Cahaya yang diserap oleh klorofil menyebabkan eksitasi elektron di fotosistem II. Elektron yang hilang dari PSII digantikan oleh elektron yang dihasilkan dari pemecahan air (fotolisis), yang juga menghasilkan oksigen.
- Rantai Transpor Elektron: Elektron dari PSII dipindahkan melalui serangkaian pembawa elektron di membran tilakoid, dan energi dari transfer ini digunakan untuk memompa proton ke dalam ruang tilakoid, menciptakan gradien proton.
- Fotofosforilasi: Gradien proton digunakan oleh enzim ATP sintase untuk menghasilkan ATP melalui proses fotofosforilasi.
- Penyerapan Cahaya di PSI: Elektron yang kehilangan energi di PSII diteruskan ke fotosistem I, di mana mereka sekali lagi dieksitasi oleh cahaya.
- Pembentukan NADPH: Elektron yang tereksitasi di PSI digunakan untuk mereduksi  $\text{NADP}^+$  menjadi NADPH. NADPH ini akan digunakan dalam reaksi gelap untuk sintesis glukosa.

#### ▷ Aliran Elektron Siklik

Selain aliran elektron nonsiklik, terdapat aliran elektron siklik, di mana elektron yang tereksitasi di fotosistem I kembali ke rantai transpor elektron di PSII, alih-alih direduksi menjadi NADPH. Proses ini hanya menghasilkan ATP tanpa produksi NADPH atau oksigen. Fotofosforilasi nonsiklik adalah jalur utama dalam fotosintesis karena menghasilkan kedua produk utama yang dibutuhkan untuk reaksi gelap: ATP dan NADPH.

### b. Reaksi Gelap (Siklus Calvin)

Setelah reaksi terang menghasilkan ATP dan NADPH, energi ini digunakan dalam reaksi gelap, atau Siklus Calvin, untuk mengubah karbon dioksida menjadi glukosa. Siklus ini berlangsung di stroma kloroplas dan tidak memerlukan cahaya langsung, tetapi sangat bergantung pada produk reaksi terang.

Tahap-tahap utama dalam Siklus Calvin meliputi:

- ▷ **Fiksasi Karbon:** Enzim rubisco menangkap karbon dioksida dari atmosfer dan menggabungkannya dengan molekul ribulosa bifosfat (RuBP) untuk membentuk molekul organik tiga karbon.
- ▷ **Reduksi:** Molekul organik ini kemudian direduksi menggunakan ATP dan NADPH dari reaksi terang, menghasilkan gula tiga karbon yang disebut gliseraldehida-3-fosfat (G3P).

- ▷ **Regenerasi RuBP:** Beberapa molekul G3P digunakan untuk regenerasi RuBP, sehingga siklus dapat terus berlangsung. G3P yang tersisa dapat digunakan oleh tumbuhan untuk membentuk glukosa dan karbohidrat lainnya.

## Penggunaan Produk Fotosintesis

Glukosa yang dihasilkan dari fotosintesis digunakan oleh tumbuhan untuk berbagai keperluan:

- Penyimpanan Energi:** Glukosa disimpan dalam bentuk pati di dalam kloroplas dan jaringan penyimpanan lainnya.
- Pertumbuhan dan Pemeliharaan:** Glukosa digunakan untuk mensintesis selulosa, yang merupakan komponen utama dinding sel tumbuhan.
- Respirasi Seluler:** Glukosa juga digunakan oleh tumbuhan untuk menghasilkan energi melalui respirasi seluler di mitokondria.

## Faktor yang Memengaruhi Fotosintesis

Beberapa faktor dapat mempengaruhi laju fotosintesis, termasuk:

- Cahaya:** Intensitas cahaya yang lebih tinggi akan meningkatkan laju fotosintesis, tetapi hanya sampai batas tertentu, setelah itu laju akan mencapai titik jenuh.
- Konsentrasi Karbon Dioksida:** Semakin tinggi konsentrasi karbon dioksida, semakin cepat proses fiksasi karbon dalam Siklus Calvin.
- Suhu:** Fotosintesis lebih efisien pada suhu yang optimal. Suhu yang terlalu tinggi atau rendah dapat memperlambat aktivitas enzim, terutama rubisko.
- Ketersediaan Air:** Kekurangan air dapat memperlambat atau menghentikan fotosintesis karena air diperlukan untuk fotolisis di PSII.

## Pembuktian Fotosintesis

Pembuktian bahwa fotosintesis adalah proses di mana tumbuhan menghasilkan oksigen dan glukosa dari karbon dioksida dan air telah dilakukan melalui berbagai percobaan ilmiah selama berabad-abad. Beberapa eksperimen kunci yang membuktikan adanya fotosintesis memberikan pemahaman mendalam tentang bagaimana proses ini bekerja. Berikut adalah beberapa percobaan yang secara historis penting dalam pembuktian fotosintesis.

### a. Percobaan Joseph Priestley (1771)

Salah satu eksperimen pertama yang menunjukkan bahwa tumbuhan menghasilkan oksigen dilakukan oleh Joseph Priestley. Dalam percobaannya, Priestley menemukan bahwa tanaman dapat "memperbaiki" udara yang telah tercemar oleh pembakaran lilin atau keberadaan hewan, seperti tikus. Dalam percobaan ini, Priestley menempatkan lilin yang menyala dan hewan di dalam wadah tertutup, dan lilin serta hewan itu akhirnya kehabisan oksigen. Namun, jika tanaman ditempatkan di dalam wadah yang sama, lilin dapat menyala lebih lama, dan hewan bertahan lebih lama.



Joseph Priestley - Wikipedia

**Kesimpulan:** Priestley menyimpulkan bahwa tumbuhan mampu "memurnikan" udara atau menghasilkan sesuatu yang memungkinkan makhluk hidup bertahan hidup. Ini adalah salah satu bukti awal bahwa tumbuhan melepaskan oksigen selama fotosintesis.

**b. Percobaan Jan Ingenhousz (1779)**



Jan Ingenhousz - Wikipedia

Jan Ingenhousz melanjutkan penelitian Priestley dan menunjukkan bahwa hanya bagian tumbuhan yang terpapar cahaya yang dapat "memperbaiki" udara. Dia menemukan bahwa tumbuhan hanya melepaskan oksigen di bawah paparan cahaya, sedangkan di tempat gelap, mereka menghasilkan karbon dioksida. Ingenhousz juga menunjukkan bahwa hanya daun hijau yang melakukan proses ini.

**Kesimpulan:** Percobaan ini membuktikan bahwa cahaya sangat penting untuk proses fotosintesis dan bahwa oksigen hanya dilepaskan ketika tumbuhan terpapar cahaya.

**c. Percobaan Julius von Sachs (1862)**

Julius von Sachs menemukan bahwa pati terbentuk di daun selama fotosintesis. Dia melakukan percobaan dengan menempatkan daun tumbuhan di bawah kondisi yang bervariasi—sebagian dari daun terpapar cahaya dan sebagian lainnya ditutup agar tidak terpapar cahaya. Setelah beberapa waktu, daun diuji dengan larutan yodium, yang dapat mengidentifikasi keberadaan pati.

**Hasil:** Bagian daun yang terpapar cahaya berubah warna menjadi biru gelap ketika diuji dengan yodium, menunjukkan adanya pati. Bagian daun yang tidak terkena cahaya tidak menunjukkan reaksi terhadap yodium.



Julius von Sachs - Wikipedia

**Kesimpulan:** Sachs menyimpulkan bahwa fotosintesis menghasilkan pati (karbohidrat) sebagai hasil akhirnya, dan cahaya sangat penting dalam proses ini. Ini adalah bukti bahwa fotosintesis menghasilkan zat penyimpan energi (pati) di bawah pengaruh cahaya.

**d. Percobaan Cornelis van Niel (1931)**

Cornelis van Niel melakukan eksperimen dengan bakteri fotosintetik, terutama bakteri yang tidak menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan fotosintesis, tetapi menggunakan hidrogen sulfida ( $H_2S$ ) alih-alih air. Dia menemukan bahwa bakteri ini menghasilkan sulfur (S) sebagai produk sampingan, bukan oksigen. Van Niel mengajukan hipotesis bahwa dalam fotosintesis, sumber elektron, bukan  $CO_2$ , yang dipecah untuk menghasilkan produk sampingan.

**Kesimpulan:** Van Niel mengusulkan bahwa pada tumbuhan, air ( $H_2O$ ) dipecah selama fotosintesis, menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan, sementara elektron dari air digunakan untuk mereduksi karbon dioksida menjadi glukosa. Ini adalah bukti bahwa oksigen yang dihasilkan selama fotosintesis berasal dari air, bukan dari karbon dioksida.

**e. Percobaan Samuel Ruben dan Martin Kamen (1941)**

Percobaan penting lainnya dalam pembuktian fotosintesis dilakukan oleh Samuel Ruben dan Martin Kamen, yang menggunakan isotop oksigen ( $O-18$ ) untuk melacak asal usul oksigen yang dilepaskan selama fotosintesis. Mereka menandai molekul air dengan isotop oksigen berat ( $H_2O-18$ ) dan menemukan bahwa oksigen yang dilepaskan oleh tumbuhan selama fotosintesis mengandung isotop O-18.

**Kesimpulan:** Percobaan ini mengkonfirmasi hipotesis van Niel bahwa oksigen yang dihasilkan selama fotosintesis berasal dari air, bukan dari karbon dioksida. Ini memperkuat pemahaman bahwa air adalah sumber elektron dan donor oksigen dalam fotosintesis.

#### f. Percobaan Melvin Calvin (1950-an)

Melvin Calvin, menggunakan teknik penelusuran radioisotop karbon-14 (C-14), mampu menjelaskan jalur biokimia dari fiksasi karbon dalam fotosintesis. Calvin menggunakan C-14 untuk melacak pergerakan karbon dioksida melalui reaksi gelap fotosintesis, yang kemudian dikenal sebagai Siklus Calvin.



Melvin Calvin - Wikipedia

**Kesimpulan:** Percobaan Calvin menunjukkan bagaimana karbon dioksida diubah menjadi gula sederhana (glukosa) melalui serangkaian reaksi kimia di stroma kloroplas. Penelitian ini mendemonstrasikan bagaimana energi kimia dari reaksi terang digunakan untuk mengikat karbon dioksida menjadi senyawa organik.

#### g. Pembuktian Modern dengan Spektrofotometri dan Mikroskop Elektron

Saat ini, metode spektrofotometri digunakan untuk mempelajari pigmen fotosintetik seperti klorofil, yang memainkan peran penting dalam penyerapan cahaya selama fotosintesis. Selain itu, mikroskop elektron digunakan untuk memvisualisasikan struktur internal kloroplas, seperti tilakoid, di mana reaksi terang terjadi. Penemuan ini membantu memperjelas lokasi fisik dari fotosintesis di dalam sel.

**Kesimpulan:** Teknik modern ini memberikan gambaran mendetail tentang bagaimana kloroplas bekerja dan memastikan bahwa fotosintesis terjadi di tilakoid dan stroma, dengan partisipasi berbagai pigmen fotosintetik dan protein.

### Contoh Soal

Jelaskan perbedaan antara reaksi terang dan reaksi gelap pada fotosintesis, serta hubungan antara keduanya dalam pembentukan glukosa!

#### Jawaban:

Reaksi terang membutuhkan cahaya dan berlangsung di membran tilakoid, menghasilkan ATP, NADPH, dan oksigen. Reaksi gelap tidak memerlukan cahaya dan terjadi di stroma kloroplas, menggunakan ATP dan NADPH dari reaksi terang untuk mengubah karbon dioksida menjadi glukosa. Kedua reaksi ini saling bergantung: reaksi terang menyediakan energi kimia yang dibutuhkan oleh reaksi gelap.

#### Pembahasan:

Fotosintesis terdiri dari dua tahap utama:

- ▷ Reaksi terang: Terjadi di membran tilakoid, menggunakan cahaya untuk memecah air ( $H_2O$ ) menjadi oksigen ( $O_2$ ), serta membentuk ATP dan NADPH melalui proses fotofosforilasi.
- ▷ Reaksi gelap (Siklus Calvin): Terjadi di stroma, menggunakan ATP dan NADPH dari reaksi terang untuk mengikat karbon dioksida ( $CO_2$ ) menjadi glukosa ( $C_6H_{12}O_6$ ).

Hubungan keduanya sangat erat: tanpa reaksi terang, reaksi gelap tidak memiliki energi dan reduktan yang dibutuhkan untuk sintesis glukosa. Oleh karena itu, meskipun disebut "reaksi gelap", proses ini tetap tergantung pada hasil reaksi terang.

## Kegiatan Praktikum 2

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan mengamati pengaruh intensitas cahaya terhadap laju fotosintesis menggunakan tanaman air (*Hidrlilia* sp./*Elodea* sp.), dilihat dari jumlah gelembung oksigen yang dihasilkan.

1. Buatlah kelompok yang beranggotakan 3-4 orang, lalu siapkan alat dan bahan berikut sebelum memulai praktikum:
  - ▷ Tanaman air (*Hidrlilia* sp. atau *Elodea* sp.)
  - ▷ Gelas bening berisi air
  - ▷ Lampu belajar atau senter terang
  - ▷ Stopwatch
  - ▷ Penggaris (untuk mengatur jarak lampu)
  - ▷ Kertas hitam (jika ingin mengatur cahaya hanya dari satu arah)
2. Letakkan tanaman air di dalam gelas berisi air jernih.
3. Nyalakan lampu pada jarak tertentu (misal 20 cm dari tanaman).
4. Hitung jumlah gelembung oksigen yang keluar selama 1 menit sebagai indikator laju fotosintesis.
5. Ulangi dengan mengatur jarak lampu (contoh: 40 cm, 60 cm) untuk melihat perbedaan hasil.
6. Catat dan bandingkan jumlah gelembung pada setiap jarak.
7. Diskusikan pertanyaan berikut dengan kelompokmu, lalu buat kesimpulan dari praktikum yang baru saja kamu lakukan
  - a. Bagaimana intensitas cahaya memengaruhi laju fotosintesis? Jelaskan hasil pengamatan kalian.
  - b. Mengapa fotosintesis sangat penting bagi kehidupan di bumi?
  - c. Faktor lain apa yang dapat memengaruhi laju fotosintesis selain cahaya?
  - d. Bagaimana kondisi lingkungan (contoh: perubahan iklim atau polusi) dapat memengaruhi fotosintesis tumbuhan?
  - e. Menurut kalian, apa dampak menurunnya laju fotosintesis terhadap keseimbangan ekosistem global?

## Rangkuman

Metabolisme adalah serangkaian reaksi biokimia yang terjadi dalam sel, terbagi menjadi dua jalur utama: anabolisme dan katabolisme. Anabolisme adalah proses pembentukan molekul kompleks dari molekul sederhana dengan menggunakan energi, sedangkan katabolisme adalah proses pemecahan molekul kompleks menjadi molekul sederhana, yang melepaskan energi. Kedua proses ini menjaga keseimbangan energi dalam tubuh dan penting untuk berbagai fungsi biologis. Enzim adalah biokatalisator yang mempercepat reaksi kimia dalam tubuh tanpa ikut habis dalam prosesnya. Enzim memiliki sifat spesifik dan bekerja pada kondisi tertentu (misalnya, suhu dan pH), serta rentan terhadap pengaruh faktor-faktor seperti inhibitor dan kofaktor. Enzim bekerja berdasarkan dua teori utama: teori Lock and Key (di mana enzim memiliki bentuk spesifik untuk substrat) dan teori Induced Fit (di mana enzim dapat berubah bentuk agar sesuai dengan substratnya). Jalur katabolisme karbohidrat melalui respirasi aerob (glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron) serta respirasi anaerob (fermentasi alkohol dan fermentasi asam laktat), yang merupakan sumber utama energi bagi sel. Katabolisme lemak dan protein juga dijelaskan sebagai jalur alternatif untuk menghasilkan energi. Dalam bagian tentang anabolisme, fokus utama adalah fotosintesis, yang merupakan proses di mana tumbuhan dan organisme tertentu mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa. Fotosintesis melibatkan dua reaksi utama: reaksi terang, yang menghasilkan ATP dan NADPH melalui penyerapan cahaya, dan reaksi gelap (Siklus Calvin), yang mengubah  $\text{CO}_2$  menjadi glukosa menggunakan produk reaksi terang.

## Latihan Soal

1. Pernyataan yang paling tepat mengenai perbedaan antara anabolisme dan katabolisme adalah?
  - A. Anabolisme menghasilkan energi sedangkan katabolisme menyimpan energi
  - B. Katabolisme membentuk molekul kompleks dari molekul sederhana
  - C. Anabolisme membutuhkan energi untuk menyusun molekul kompleks
  - D. Katabolisme hanya terjadi pada tumbuhan, sedangkan anabolisme hanya pada hewan
  - E. Anabolisme dan katabolisme bekerja tanpa pengaruh energi
2. Berikut ini adalah ciri utama dari enzim, kecuali...
  - A. Bekerja spesifik terhadap substrat tertentu
  - B. Dapat mempercepat reaksi kimia dalam tubuh
  - C. Mengalami perubahan bentuk permanen selama reaksi
  - D. Tidak habis dalam reaksi kimia yang dikatalisis
  - E. Dipengaruhi oleh suhu dan pH lingkungan
3. Teori enzim Induced Fit menjelaskan bahwa....
  - A. Enzim hanya bekerja jika bentuknya identik dengan substrat
  - B. Enzim tidak mengalami perubahan struktur saat berikatan dengan substrat
  - C. Enzim menyesuaikan bentuk aktifnya agar sesuai dengan substrat
  - D. Enzim tidak memerlukan substrat untuk berfungsi
  - E. Substrat akan mengubah bentuknya agar sesuai dengan enzim
4. Tahapan pertama dalam proses respirasi aerob yang terjadi di sitoplasma dan menghasilkan 2 ATP adalah...
  - A. Siklus Krebs
  - B. Dekarboksilasi oksidatif
  - C. Rantai transpor elektron
  - D. Glikolisis
  - E. Fermentasi
5. Fermentasi alkohol berbeda dengan fermentasi asam laktat karena...
  - A. Fermentasi alkohol menghasilkan ATP lebih banyak
  - B. Fermentasi alkohol menghasilkan  $\text{CO}_2$ , sedangkan asam laktat tidak
  - C. Fermentasi asam laktat memerlukan oksigen untuk berlangsung
  - D. Fermentasi alkohol terjadi di otot manusia saat kekurangan oksigen

- E. Fermentasi asam laktat menghasilkan etanol dan gas
6. Peran utama cahaya dalam proses reaksi terang fotosintesis adalah...
- Mengubah  $\text{CO}_2$  menjadi glukosa
  - Mengaktifkan enzim rubisko
  - Menyintesis glukosa dari senyawa organik
  - Menghasilkan ATP dan NADPH sebagai energi untuk reaksi gelap
  - Menyerap karbon dioksida dari udara
7. Jalur alternatif untuk menghasilkan energi saat karbohidrat tidak tersedia adalah melalui katabolisme...
- Glukosa dan air
  - Protein dan lemak
  - $\text{CO}_2$  dan oksigen
  - Asam laktat dan NADH
  - Etanol dan gliserol

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



## Referensi

- Alberts, B., et al. (2014). Molecular Biology of the Cell (6th ed.). Garland Science.
- Berg, J. M., et al. (2010). "Mechanism of Enzyme Action in Metabolism." *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 11(5), 380-395.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., & Stryer, L. (2015). Biochemistry (8th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Campbell, M. K., & Farrell, S. O. (2018). Biochemistry (9th ed.). Cengage Learning.
- Devlin, T. M. (2011). Textbook of Biochemistry with Clinical Correlations (7th ed.). Wiley.
- Evans, J. R. (1989). "Photosynthesis and Nitrogen Relationships in Leaves of C3 Plants." *Oecologia*, 78(1), 9-19.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2009). "Redox Regulation in Photosynthesis." *Antioxidants & Redox Signaling*, 11(4), 861-905.
- Garrett, R. H., & Grisham, C. M. (2016). Biochemistry (6th ed.). Cengage Learning.
- Hohmann-Marriott, M. F., & Blankenship, R. E. (2011). "Evolution of Photosynthesis." *Annual Review of Plant Biology*, 62, 515-548.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). Principles of Biochemistry (7th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Lodish, H., et al. (2016). Molecular Cell Biology (8th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Murray, R. K., Granner, D. K., & Rodwell, V. W. (2018). "Biochemical Effects of Protein Diets on Metabolism." *The American Journal of Clinical Nutrition*, 108(4), 782-790.
- Plaxton, W. C. (1996). "The Organization and Regulation of Plant Glycolysis." *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 47(1), 185-214.
- Rutter, J., & Winge, D. R. (2010). "Respiratory Chain Complexes in Mitochondrial Metabolism." *Cell Metabolism*, 11(2), 213-225.
- Shuvalov, V. A., & Heber, U. (2004). "Photosynthetic Reactions in Isolated Chloroplasts." *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1604(1), 12-22.
- Stryer, L. (2004). "Metabolism and Bioenergetics." *Annual Review of Biochemistry*, 73, 23-56.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). Plant Physiology (5th ed.). Sinauer Associates.
- Veech, R. L. (2004). "The Role of ATP and NADH in the Regulation of Metabolism." *Journal of Biological Chemistry*, 279(10), 487-497.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2016). Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level (5th ed.). John Wiley & Sons



## BAB 2:

# DARI GEN KE GENERASI: PERJALANAN SIFAT MAKHLUK HIDUP

### Karakter Pelajar Pancasila

▷ **Beriman, Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa, dan Berakhlaq Mulia**

Menghargai proses kehidupan yang terjadi di dalam makhluk hidup, serta menjaga nilai-nilai moral sebagai ciptaan Tuhan yang luar biasa.

▷ **Bernalar Kritis**

Menganalisis hukum-hukum genetika dan mempelajari penyimpangan hukum Mendel, serta menggunakan pemikiran kritis untuk memahami bagaimana perubahan genetik mempengaruhi sifat-sifat makhluk hidup.

### Tujuan Pembelajaran: Jejak Sifat dari Generasi ke Generasi

**1. Pemahaman Struktur dan Fungsi Genetika**

- ▷ Menjelaskan struktur kromosom beserta fungsinya.
- ▷ Mengidentifikasi kariotipe gonosom dan autosom serta perbedaannya.
- ▷ Menguraikan perbedaan DNA dengan RNA dalam hal struktur dan fungsi.
- ▷ Menjelaskan proses replikasi DNA secara detail.
- ▷ Menguraikan tahapan mekanisme sintesis protein mulai dari transkripsi hingga translasi.

**2. Analisis Hukum Mendel**

- ▷ Menganalisis Hukum Mendel I (Segregasi) dan Hukum Mendel II (Asoetasi Bebas) dengan jelas.
- ▷ Menjelaskan perbedaan rasio fenotipe dari hasil penyilangan berdasarkan peristiwa penyimpangan semu Hukum Mendel.



**Kata Kunci:** Genetika, Kromosom, DNA dan RNA, Sintesis Protein, Hukum Mendel.

- ▷ Menganalisis interaksi antar alel dan interaksi genetik yang menyebabkan penyimpangan Hukum Mendel.

### **3. Penerapan Teori Mendel pada Lingkungan Sekitar**

- ▷ Mengamati dan mengidentifikasi penyimpangan semu Hukum Mendel pada objek di lingkungan sekitar.
- ▷ Menghubungkan teori genetika dengan peristiwa genetik nyata yang terjadi pada makhluk hidup sekitarnya.

### **4. Pembuatan Pedigree Sifat Menurun**

- ▷ Membuat pedigree (diagram keturunan) untuk sifat-sifat menurun, seperti golongan darah.
- ▷ Menyusun pedigree untuk kelainan atau penyakit genetik pada suatu keluarga.

### **5. Perhitungan Rasio Fenotipe**

- ▷ Menghitung rasio fenotipe dari hasil keturunan berdasarkan tipe perkawinan tertentu.
- ▷ Menghitung rasio keturunan yang berkaitan dengan kelainan atau penyakit menurun pada manusia.

### **6. Analisis Mutasi dan Kelainan Genetik**

- ▷ Menganalisis penyebab mutasi genetik pada manusia dan organisme lainnya.
- ▷ Mengidentifikasi jenis mutasi pada tingkat gen dan kromosom.
- ▷ Menjelaskan kelainan genetik pada manusia yang disebabkan oleh mutasi.

**F I T R I**



## 1. Materi Genetik: Pondasi Kehidupan

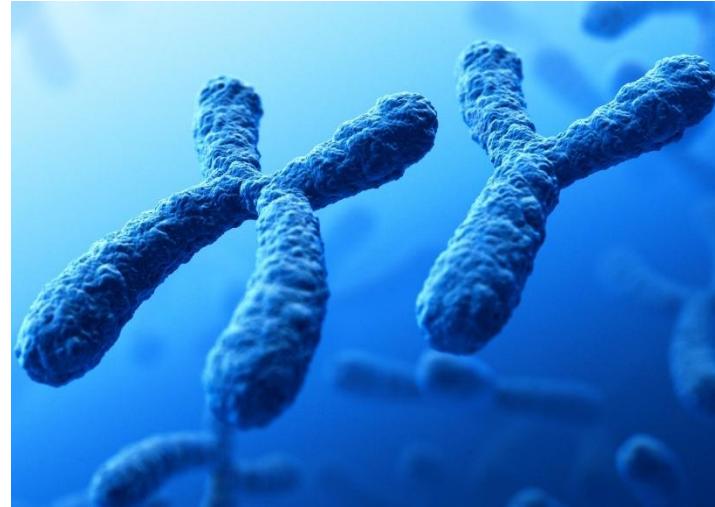
Materi genetik merupakan komponen dasar yang menentukan pewarisan sifat pada makhluk hidup. Setiap organisme, dari bakteri hingga manusia, memiliki instruksi biologis yang tersimpan di dalam materi genetiknya, yang mengendalikan semua fungsi dan karakteristik tubuhnya. Materi ini tidak hanya berperan dalam menentukan warna mata, tinggi badan, atau bentuk daun, tetapi juga dalam memastikan bahwa semua proses biologis, seperti pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi, dapat berlangsung dengan tepat. Informasi genetik ini disimpan dalam molekul yang sangat kompleks seperti DNA (asam deoksiribonukleat) dan RNA (asam ribonukleat), yang terdapat di dalam kromosom. Setiap sel makhluk hidup, baik prokariotik maupun eukariotik, memanfaatkan materi genetik ini untuk menjalankan instruksi biologisnya. Selain itu, materi genetik memungkinkan organisme untuk mentransfer sifat-sifat yang dimilikinya kepada keturunannya melalui proses pewarisan. Pada makhluk hidup yang lebih kompleks seperti hewan dan tumbuhan, materi genetik ini terorganisir dalam bentuk kromosom, yang membawa ribuan unit kecil yang disebut gen. Gen inilah yang mengandung informasi untuk menghasilkan protein, yang pada akhirnya membentuk struktur dan mengatur fungsi tubuh. Selain gen, makhluk hidup juga memiliki alel, bentuk alternatif dari suatu gen, yang turut mempengaruhi perbedaan sifat antar individu.

Secara keseluruhan, materi genetik mengatur seluruh kehidupan organisme dan memastikan kontinuitas sifat-sifat dari generasi ke generasi. Sebelum kita mendalami lebih lanjut mengenai gen, alel, DNA, RNA, serta sintesis protein, mari kita mulai dengan memahami dasar dari materi genetik, yaitu kromosom.

### Kromosom

Kromosom adalah struktur yang terdiri dari DNA dan protein yang terdapat di dalam inti sel. Fungsinya adalah membawa informasi genetik yang diperlukan untuk mengendalikan seluruh aktivitas sel dan pewarisan sifat. Setiap organisme, baik itu tumbuhan, hewan, maupun manusia, memiliki kromosom yang berbeda-beda dalam jumlah, bentuk, dan ukurannya. Kromosom merupakan komponen penting dalam proses pembelahan sel, pertumbuhan, dan reproduksi makhluk hidup.

Pada manusia dan sebagian besar makhluk hidup yang berkembang biak secara seksual, kromosom tersusun dalam pasangan, di mana masing-masing pasangan berasal dari kedua orang tua. Kromosom ini memuat gen-gen yang menentukan sifat-sifat individu, seperti warna mata, bentuk wajah, hingga metabolisme tubuh. Pada sub-bab ini, kita akan membahas lebih rinci mengenai jenis-jenis kromosom,



Kromosom X dan Kromosom Y – Canva Studio

#### a. Kromosom Tubuh (Autosom)

Kromosom tubuh, atau autosom, adalah jenis kromosom yang bertanggung jawab atas pewarisan sifat-sifat yang tidak berhubungan dengan jenis kelamin. Pada manusia, terdapat 22 pasang kromosom autosom yang berperan dalam pengaturan sifat-sifat fisik dan biologis. Kromosom tubuh ini menentukan berbagai karakteristik seperti tinggi badan, warna kulit, hingga kemampuan tubuh untuk melawan penyakit. Setiap pasangan kromosom tubuh berasal dari kedua orang tua, sehingga setiap individu memiliki dua salinan dari setiap gen yang terletak pada kromosom tubuh. Gen-gen ini dapat memiliki alel yang berbeda, yang mempengaruhi variasi sifat di antara individu-individu dalam suatu spesies.

### b. Kromosom Seks (Gonosom)

Berbeda dengan autosom, kromosom seks atau gonosom adalah jenis kromosom yang menentukan jenis kelamin suatu individu. Pada manusia, terdapat dua jenis kromosom seks, yaitu X dan Y. Kombinasi kromosom ini menentukan apakah individu akan berkembang menjadi laki-laki atau perempuan. Perempuan memiliki dua kromosom X (XX) dan laki-laki memiliki satu kromosom X dan satu kromosom Y (XY). Pada manusia, setiap individu normal memiliki total 46 kromosom yang terdiri dari 23 pasang. Di antara pasangan ini, 22 pasang adalah kromosom autosom, yang sama pada pria dan wanita, sedangkan 1 pasang sisanya adalah kromosom seks, yang menentukan jenis kelamin. Pada perempuan, pasangan kromosom seks terdiri dari dua kromosom X, dengan total komposisi 46 kromosom (44 autosom + XX). Ini berarti perempuan mendapatkan satu kromosom X dari ibu dan satu kromosom X dari ayah. Sementara itu, pada laki-laki, pasangan kromosom seks terdiri dari satu kromosom X yang diwariskan dari ibu, dan satu kromosom Y yang diwariskan dari ayah, dengan total komposisi 46 kromosom (44 autosom + XY). Kromosom Y inilah yang memicu perkembangan karakteristik seksual pria, seperti pembentukan testis. Jumlah kromosom yang normal baik pada pria maupun wanita adalah 46, namun perbedaannya terletak pada kombinasi kromosom seks antara pria (XY) dan wanita (XX).

### c. Struktur Kromosom: Sentromer dan Kromatid

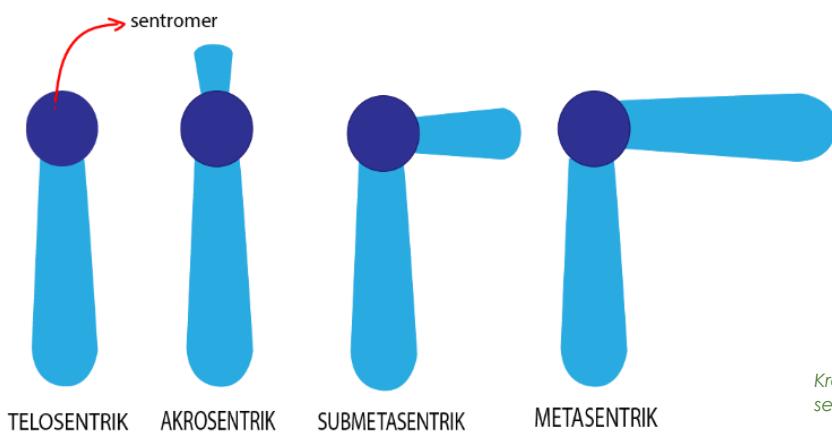
Setiap kromosom terdiri dari struktur kompleks yang memungkinkan proses replikasi dan pembelahan sel berlangsung dengan benar. Struktur utama kromosom meliputi:

- ▷ Sentromer adalah bagian tengah dari kromosom yang menghubungkan dua kromatid kembar. Sentromer berperan penting dalam pemisahan kromosom selama pembelahan sel, karena inilah tempat di mana mikrotubulus akan menempel untuk menarik kromosom menuju kutub sel.
- ▷ Kromatid adalah salinan identik dari kromosom yang terbentuk setelah DNA mengalami replikasi. Sebelum sel membelah, kromosom akan terdiri dari dua kromatid yang dihubungkan oleh sentromer. Setiap kromatid akan berpisah selama pembelahan sel dan masuk ke dalam dua sel anak yang berbeda.
- ▷ Telomer adalah bagian ujung kromosom yang melindungi kromosom dari kerusakan selama proses replikasi. Telomer juga membantu menjaga stabilitas kromosom dengan mencegah hilangnya informasi genetik.

Struktur kromosom ini memastikan bahwa materi genetik dapat dibagi secara merata saat sel membelah, baik dalam pembelahan mitosis maupun meiosis.

### d. Bentuk dan Ukuran Kromosom

Kromosom memiliki variasi dalam bentuk dan ukurannya, tergantung pada spesies dan jenis sel. Secara umum, kromosom dapat dibagi berdasarkan letak sentromernya menjadi beberapa tipe bentuk, antara lain:



Kromosom berdasarkan letak sentromer - synaoo.com

- ▷ Metasentrik, di mana sentromer terletak di tengah kromosom, sehingga kedua lengan kromosom memiliki panjang yang sama.
- ▷ Submetasentrik, dengan sentromer yang berada agak jauh dari tengah, sehingga menghasilkan lengan kromosom yang tidak sama panjang.
- ▷ Akrosentrik, ketika sentromer berada dekat dengan salah satu ujung kromosom, membuat salah satu lengan sangat pendek.
- ▷ Telosentrik, di mana sentromer berada di ujung kromosom, membuatnya memiliki satu lengan yang sangat panjang.

#### e. Jumlah Kromosom

Jumlah kromosom bervariasi pada setiap spesies makhluk hidup. Pada manusia, terdapat 46 kromosom yang tersusun dalam 23 pasang. Dari 23 pasang ini, 22 pasang adalah autosom, sedangkan satu pasang sisanya adalah gonosom atau kromosom seks. Jumlah kromosom yang tetap ini sangat penting untuk kestabilan genetik. Jika terjadi perubahan jumlah kromosom, seperti penambahan atau pengurangan kromosom, akan terjadi gangguan genetik yang dapat mempengaruhi kesehatan dan perkembangan individu. Contoh kasus adalah sindrom Down, yang disebabkan oleh adanya kromosom tambahan pada pasangan kromosom ke-21 (trisomi 21). Jumlah kromosom yang abnormal dapat terjadi karena kesalahan selama pembelahan sel, baik dalam meiosis maupun mitosis. Pada beberapa spesies, variasi jumlah kromosom dapat terjadi secara alami dan memainkan peran dalam evolusi, namun pada manusia, perubahan ini umumnya dikaitkan dengan gangguan genetik.

### Gen dan Alel

Gen dan alel adalah komponen dasar dalam pewarisan sifat yang menentukan karakteristik makhluk hidup. Mereka memainkan peran penting dalam mengatur segala aspek biologi, mulai dari ciri-ciri fisik seperti warna mata dan bentuk rambut, hingga proses metabolisme dan respons terhadap lingkungan. Pemahaman tentang gen dan alel menjadi dasar dalam mempelajari genetika dan pewarisan sifat.

#### a. Gen

Gen adalah unit dasar pewarisan sifat yang terletak di dalam kromosom. Setiap gen terdiri dari urutan DNA yang mengkodekan informasi penting untuk sintesis protein atau molekul lainnya yang memiliki fungsi biologis dalam tubuh. Protein yang dihasilkan oleh gen inilah yang pada akhirnya mempengaruhi sifat-sifat individu, seperti warna mata, bentuk hidung, hingga kemampuan enzim dalam mengolah zat makanan. Setiap gen memiliki posisi tertentu pada kromosom yang disebut lokus. Gen tidak hanya menentukan sifat fisik, tetapi juga mengontrol banyak proses biokimia di dalam sel, seperti pertumbuhan, diferensiasi, dan respon terhadap rangsangan eksternal. Selain itu, gen juga bertanggung jawab dalam menjaga integritas dan kontinuitas kehidupan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Pada makhluk hidup yang berkembang biak secara seksual, gen diwariskan dalam dua salinan—satu dari ayah dan satu dari ibu. Kedua salinan ini bisa identik atau berbeda, tergantung dari variasi genetik yang dimiliki oleh orang tua.

#### b. Alel

Alel adalah bentuk alternatif dari suatu gen yang berada pada lokus yang sama di kromosom homolog. Setiap individu memiliki dua alel untuk setiap gen—satu diwariskan dari ibu dan satu lagi dari ayah. Alel dapat mempengaruhi bagaimana suatu sifat atau karakteristik muncul pada individu tersebut.

Sebagai contoh, gen yang mengatur warna mata pada manusia dapat memiliki alel untuk mata coklat dan alel untuk mata biru. Alel-alel ini akan saling berinteraksi untuk menentukan warna mata yang akan muncul pada individu. Jika seseorang mewarisi alel untuk mata cokelat dari salah satu orang tua dan

alel untuk mata biru dari orang tua yang lain, ekspresi dari sifat mata cokelat akan lebih dominan karena sifat ini dikendalikan oleh alel yang dominan.

Berdasarkan cara alel berinteraksi, terdapat dua jenis alel utama:

- ▷ **Alel Dominan:** Alel yang cenderung menutupi atau mendominasi efek alel lainnya. Sifat yang dikodekan oleh alel dominan akan muncul jika alel tersebut hadir, bahkan jika hanya ada satu salinan (heterozigot). Alel dominan biasanya dilambangkan dengan huruf kapital, misalnya alel A.
- ▷ **Alel Resesif:** Alel yang hanya mengekspresikan sifatnya jika tidak ada alel dominan yang hadir. Dengan kata lain, alel resesif hanya muncul dalam keadaan homozigot (memiliki dua salinan alel yang sama). Alel resesif biasanya dilambangkan dengan huruf kecil, misalnya alel a.

Interaksi antara alel-alel ini membentuk dasar dari pola pewarisan Mendel, di mana sifat-sifat ditentukan oleh kombinasi alel yang diwariskan dari kedua orang tua

#### c. Gen Aktif dan Gen Pasif

Gen aktif adalah gen yang sedang menjalankan fungsinya, biasanya dengan mengkodekan sintesis protein atau RNA yang diperlukan oleh tubuh. Sedangkan gen pasif adalah gen yang tidak diekspresikan pada suatu waktu tertentu atau dalam jaringan tertentu. Gen-gen ini mungkin tetap inaktif hingga ada kondisi yang memicu mereka untuk aktif, atau mungkin mereka tidak pernah diaktifkan sama sekali selama hidup individu tersebut. Mekanisme pengaturan aktivitas gen ini dikenal sebagai regulasi genetik dan melibatkan sejumlah proses, termasuk metilasi DNA dan modifikasi histon. Perbedaan gen aktif dan gen pasif dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel perbedaan gen aktif dan gen pasif**

Aspek	Gen Aktif	Gen Pasif
<b>Definisi</b>	Gen yang diekspresikan dan menghasilkan protein	Gen yang tidak diekspresikan, tidak menghasilkan protein
<b>Fungsi</b>	Mengatur berbagai aktivitas seluler seperti metabolisme, pertumbuhan, dan respons lingkungan	Tidak berfungsi atau disembunyikan dalam kondisi tertentu
<b>Ekspresi</b>	Melalui proses transkripsi dan translasi	Tidak menjalani proses transkripsi dan translasi
<b>Waktu dan Kondisi Aktivasi</b>	Bisa aktif terus-menerus atau diaktifkan pada waktu tertentu sesuai kebutuhan	Hanya aktif di kondisi atau tahap perkembangan tertentu, atau tetap tidak aktif seumur hidup
<b>Pengaruh Lingkungan</b>	Dapat dipengaruhi oleh lingkungan seperti cahaya, suhu, atau nutrisi	Tidak terpengaruh oleh lingkungan selama tidak diaktifkan
<b>Pengaturan Aktivitas</b>	Aktivitas diatur oleh kebutuhan sel, hormon, dan faktor luar seperti lingkungan	Aktivitas diatur oleh mekanisme epigenetik, seperti metilasi DNA atau modifikasi histon
<b>Contoh</b>	Gen yang mengatur siklus sel, produksi insulin, atau respons terhadap stres	Gen yang aktif selama fase embrionik, atau gen yang mengatur perubahan pigmen kulit pada musim tertentu

Pengaturan antara gen aktif dan pasif sangat penting untuk perkembangan, pertumbuhan, dan adaptasi makhluk hidup. Ketidakseimbangan dalam regulasi gen ini dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, seperti kanker, di mana gen yang seharusnya tidak aktif justru menjadi aktif, atau gen yang seharusnya aktif gagal berekspresi.

## DNA

DNA (asam deoksiribonukleat) adalah molekul kompleks yang berperan sebagai penyimpan informasi genetik pada semua organisme hidup dan banyak virus. DNA mengandung instruksi yang diperlukan untuk pertumbuhan, perkembangan, fungsi, dan reproduksi setiap sel dan organisme. Molekul ini terdiri dari dua untaian yang melilit satu sama lain membentuk struktur yang dikenal sebagai heliks ganda. Untaian DNA ini tersusun dari nukleotida, yang masing-masing terdiri dari gula deoksiribosa, gugus fosfat, dan salah satu dari empat basa nitrogen: adenina (A), timina (T), guanina (G), dan sitosina (C). DNA terdapat di dalam inti sel makhluk eukariotik dan dalam sitoplasma pada organisme prokariotik. Di dalam sel, DNA terorganisir dalam bentuk kromosom yang membawa gen-gen yang mengkode informasi genetik untuk sintesis protein dan pengaturan berbagai proses biologis.



### a. Struktur DNA

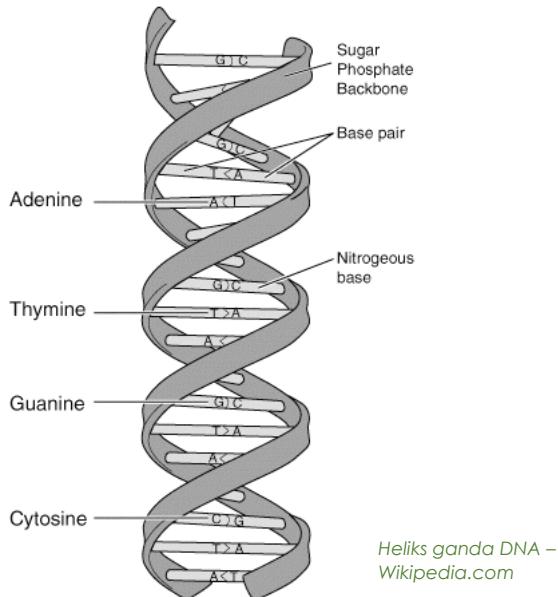
Struktur DNA pertama kali ditemukan oleh James Watson dan Francis Crick pada tahun 1953, dengan bantuan data difraksi sinar-X dari Rosalind Franklin. DNA memiliki struktur heliks ganda, di mana dua rantai nukleotida saling berpilin. Setiap nukleotida pada untaian DNA terdiri dari tiga komponen utama:

- ▷ **Gula deoksiribosa:** Molekul gula lima karbon yang membentuk tulang punggung DNA.
- ▷ **Gugus fosfat:** Menghubungkan gula deoksiribosa dari satu nukleotida ke nukleotida lainnya, membentuk ikatan fosfodiester.
- ▷ **Basa nitrogen:** Terdapat empat basa nitrogen pada DNA: adenina (A), timina (T), guanina (G), dan sitosina (C). Basa-basa ini membentuk pasangan melalui ikatan hidrogen: adenina berpasangan dengan timina, dan guanina berpasangan dengan sitosina. Pasangan basa ini adalah dasar dari komplementaritas untaian DNA.

Dalam struktur heliks ganda DNA, dua untaian saling berlawanan arah (antiparalel), artinya untaian satu berjalan dari arah 5' ke 3', sementara yang lainnya dari 3' ke 5'. Ini penting untuk proses replikasi DNA dan sintesis protein.

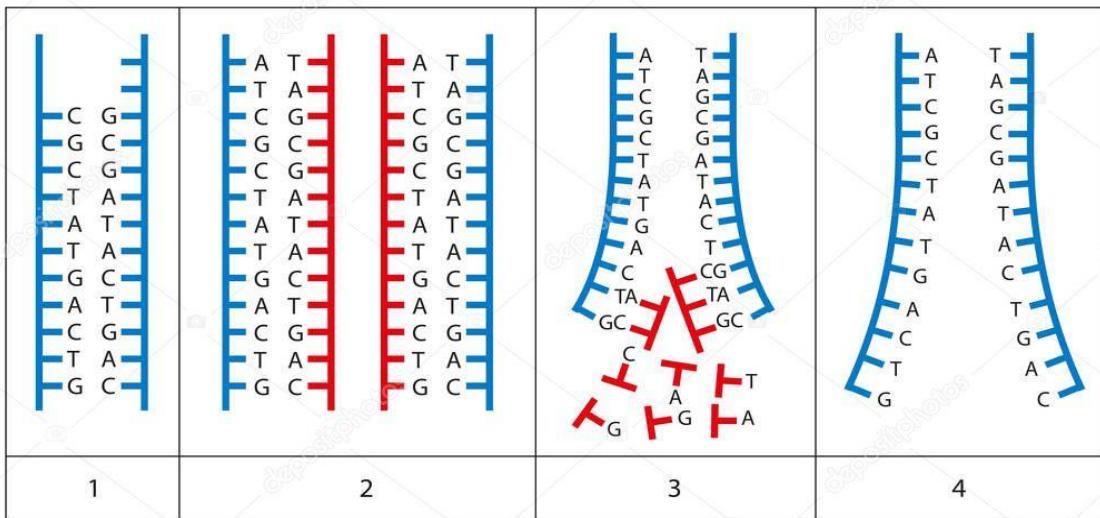
### b. Replikasi DNA

Salah satu fungsi utama DNA adalah kemampuannya untuk melakukan replikasi, yaitu proses penggandaan dirinya sebelum sel membelah. Replikasi DNA terjadi secara semikonservatif, yang berarti setiap molekul DNA baru terdiri dari satu untaian lama (parental) dan satu untaian baru yang disintesis. Replikasi DNA sangat penting untuk memastikan bahwa setiap sel anak yang dihasilkan dari pembelahan sel memiliki informasi genetik yang lengkap dan identik dengan sel induknya. Proses ini dimulai pada titik tertentu pada molekul DNA yang disebut origin of replication dan melibatkan berbagai enzim serta protein yang bekerja sama untuk membuka heliks ganda dan mensintesis untaian baru.



#### ▷ Model Replikasi DNA

Sebelum model replikasi DNA semikonservatif diterima secara luas, beberapa model replikasi diusulkan untuk menjelaskan bagaimana DNA menggandakan dirinya. Berikut adalah tiga model yang pernah diusulkan:



Model replikasi DNA dengan pasangan basa nitrogen – depositphotos.com

- **Model Konservatif**

Dalam model ini, diasumsikan bahwa dua untaian DNA induk tetap bersatu setelah replikasi, dan dua untaian DNA baru terbentuk secara keseluruhan. Namun, model ini dianggap tidak tepat karena tidak sesuai dengan hasil eksperimen.

- **Model Semikonservatif**

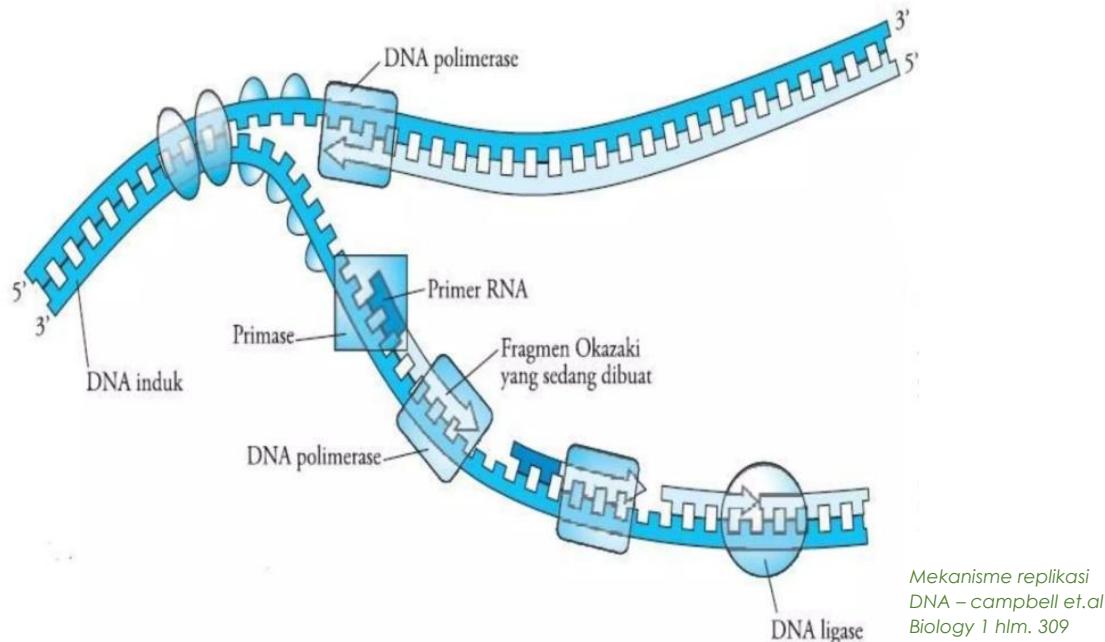
Model ini menunjukkan bahwa setiap untaian DNA induk berfungsi sebagai cetakan untuk pembentukan untaian baru. Akibatnya, setiap molekul DNA yang baru terbentuk akan mengandung satu untaian dari DNA induk dan satu untaian baru. Eksperimen yang dilakukan oleh Meselson dan Stahl pada tahun 1958 mendukung model ini, dan model inilah yang kini diterima sebagai mekanisme replikasi DNA yang sebenarnya.

- **Model Dispersif**

Dalam model ini, disarankan bahwa molekul DNA baru terdiri dari potongan-potongan dari DNA induk yang tersebar di sepanjang untaian. Dalam setiap molekul DNA yang baru, akan terdapat segmen dari untaian lama dan baru yang bercampur. Namun, model ini juga tidak didukung oleh eksperimen dan telah ditinggalkan.

▷ **Mekanisme Replikasi DNA**

Replikasi DNA adalah proses yang kompleks dan melibatkan berbagai enzim serta protein. Tahapan utama dalam mekanisme replikasi DNA adalah sebagai berikut:



- **Helikase**

Enzim ini bertanggung jawab untuk membuka heliks ganda DNA dengan memutus ikatan hidrogen antara basa nitrogen, sehingga dua untaian DNA dapat terpisah. Pembukaan ini menciptakan struktur yang disebut fork replikasi.

- **RNA Primase**

Enzim ini berperan dalam sintesis primer RNA, yaitu segmen pendek RNA yang dibutuhkan sebagai titik awal bagi DNA polimerase untuk memulai sintesis untaian baru. Primer ini melekat pada template DNA dan menyediakan ujung 3'-OH yang diperlukan bagi DNA polimerase untuk bekerja.

- **DNA Polimerase**

Enzim DNA polimerase adalah komponen kunci dalam proses replikasi DNA. Setelah primer RNA disintesis, DNA polimerase mulai menambahkan nukleotida baru ke ujung 3' dari primer RNA, menggunakan untaian template sebagai panduan untuk menentukan urutan nukleotida baru. DNA polimerase bekerja dengan sangat cepat dan efisien, memperpanjang untaian DNA baru sepanjang arah 5' ke 3'. Pada untaian leading strand (untaian yang disintesis terus-menerus), DNA polimerase dapat bekerja secara kontinu. Namun, pada untaian lagging strand (untaian yang disintesis secara diskontinu), DNA polimerase hanya dapat bekerja dalam segmen-segmen pendek yang disebut fragmen Okazaki.

- **DNA Ligase**

Setelah semua fragmen Okazaki disintesis pada untaian lagging strand, enzim DNA ligase berperan untuk menghubungkan fragmen-fragmen ini, membentuk untaian DNA yang lengkap dan kontinu. DNA ligase menyatukan ujung-ujung fragmen Okazaki dengan membentuk ikatan fosfodiester di antara nukleotida, sehingga proses replikasi DNA selesai dengan sempurna.

Selain enzim-enzim utama ini, terdapat juga protein lain yang berperan penting dalam stabilisasi dan pengaturan replikasi DNA, seperti protein pengikat untaian tunggal (SSB) yang menjaga agar untaian DNA yang terbuka tidak saling berikatan kembali, serta topoisomerase yang membantu mencegah supercoiling atau lilitan berlebihan pada DNA saat proses pembukaan berlangsung. Proses replikasi DNA ini sangat terorganisir dan akurat, meskipun beberapa kesalahan dapat terjadi selama proses ini. Untungnya, terdapat mekanisme perbaikan yang dapat memperbaiki kesalahan kecil yang terjadi selama replikasi, sehingga mutasi yang dapat menyebabkan gangguan genetik bisa diminimalkan

## RNA

RNA (asam ribonukleat) adalah molekul yang sangat penting dalam berbagai proses biologi, terutama dalam sintesis protein. RNA berfungsi sebagai perantara antara DNA dan protein, yang membawa informasi genetik dari DNA untuk diterjemahkan menjadi protein. Meskipun mirip dengan DNA, RNA memiliki perbedaan mendasar, salah satunya adalah gula yang digunakan dalam strukturnya, yaitu ribosa (bukan deoksiribosa), serta penggunaan urasil (U) sebagai pengganti timina (T). RNA umumnya berperan dalam proses transkripsi dan translasi selama sintesis protein. Ada beberapa jenis RNA yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam mengatur ekspresi gen dan pengkodean protein. Berikut ini adalah beberapa jenis utama RNA yang terlibat dalam sintesis protein.

### Jenis-jenis RNA

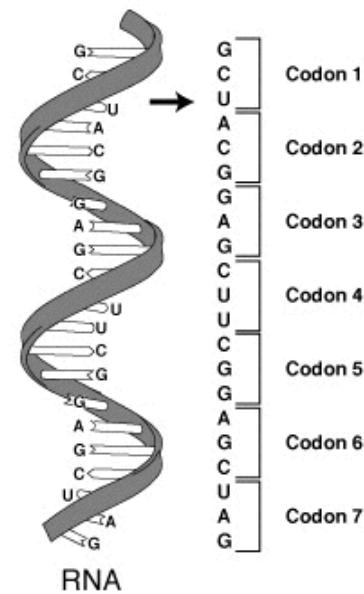
Terdapat beberapa jenis RNA yang berperan dalam sintesis protein dan fungsi seluler lainnya. Jenis-jenis RNA yang paling utama dan berperan penting dalam ekspresi gen adalah mRNA (messenger RNA), tRNA (transfer RNA), dan rRNA (ribosomal RNA).

#### a. mRNA (Messenger RNA)

mRNA atau messenger RNA adalah jenis RNA yang berperan sebagai pembawa pesan genetik dari DNA di dalam inti sel ke ribosom, tempat protein disintesis. Dalam proses transkripsi, mRNA disintesis dari cetakan DNA dan mengandung urutan kodon, yang merupakan rangkaian triplet nukleotida yang mengkode asam amino tertentu.

Setelah disintesis di inti sel, mRNA meninggalkan inti melalui pori-pori nukleus dan memasuki sitoplasma, di mana ia diterjemahkan oleh ribosom menjadi rantai polipeptida atau protein. mRNA menentukan urutan asam amino dalam protein yang akan dihasilkan, sehingga memastikan bahwa protein yang dihasilkan sesuai dengan instruksi yang terdapat dalam DNA.

**Contoh proses:** Jika segmen DNA mengandung urutan basa ATG, urutan ini akan ditranskripsikan menjadi urutan mRNA AUG, yang berfungsi sebagai kodon awal untuk memulai proses translasi dan mengkodekan asam amino metionin.



Ribonucleic acid

Ilustrasi untaian tunggal RNA - commons.wikipedia.org/Sponk

### b. tRNA (Transfer RNA)

tRNA atau transfer RNA berfungsi untuk membawa asam amino ke ribosom selama proses translasi, yaitu tahap di mana protein disintesis berdasarkan informasi yang dibawa oleh mRNA. tRNA memiliki struktur khusus berbentuk daun semanggi, dengan bagian yang disebut antikodon di salah satu ujungnya yang berfungsi untuk mengenali dan berikatan dengan kodon spesifik pada mRNA. Di ujung lainnya, tRNA membawa asam amino yang sesuai dengan kodon tersebut.

Setiap tRNA hanya membawa satu jenis asam amino tertentu, yang cocok dengan kodon yang terikat pada mRNA. Proses ini sangat penting untuk memastikan bahwa urutan asam amino dalam protein baru sesuai dengan urutan kodon yang ada di mRNA. Sebagai contoh, jika kodon mRNA adalah UUU, tRNA dengan antikodon AAA akan membawa asam amino fenilalanin.

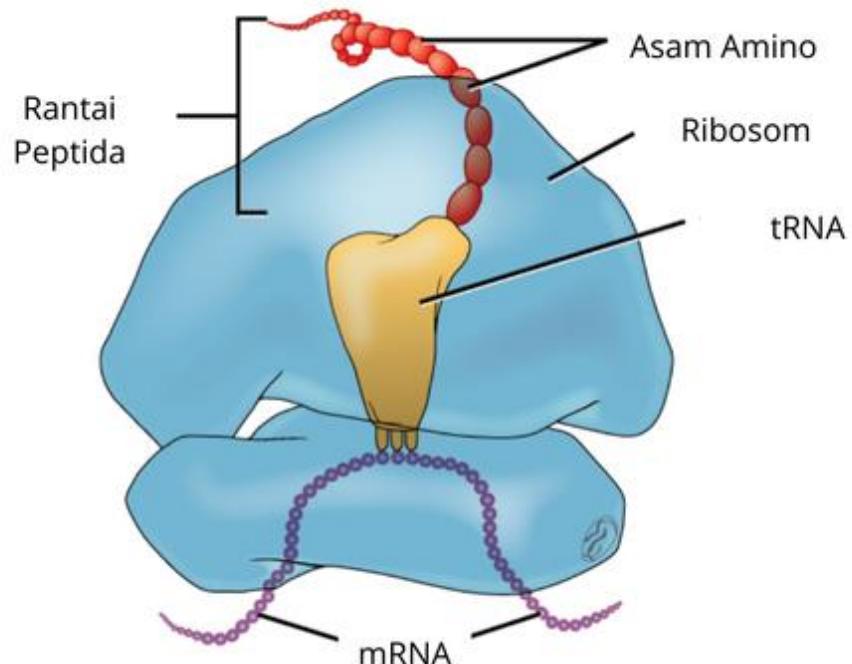
Fungsi tRNA ini sangat krusial dalam memastikan bahwa setiap asam amino yang tepat ditambahkan pada tempat yang sesuai di dalam rantai polipeptida yang sedang dibentuk, sehingga protein yang dihasilkan memiliki struktur dan fungsi yang benar.

### c. rRNA (Ribosom RNA)

rRNA atau ribosomal RNA adalah komponen utama dari ribosom, yang merupakan "mesin" seluler tempat berlangsungnya sintesis protein. Ribosom terdiri dari dua subunit, besar dan kecil, yang keduanya tersusun atas rRNA dan protein. rRNA tidak hanya berfungsi sebagai rangka dalam ribosom, tetapi juga memainkan peran katalitik dalam proses translasi.

rRNA bertindak sebagai katalis yang membantu mengikat tRNA dan mRNA di ribosom selama proses translasi. Ini memungkinkan terjadinya pembacaan kodon pada mRNA dan membantu proses pembentukan ikatan peptida antara asam amino, yang akhirnya membentuk rantai polipeptida. Tanpa rRNA, ribosom tidak dapat menjalankan fungsinya untuk menyusun asam amino menjadi protein.

Ribosom menggunakan rRNA untuk membaca kodon mRNA, menyusun urutan asam amino, dan menggerakkan proses translasi hingga terbentuk protein fungsional. Dalam sel prokariotik maupun eukariotik, rRNA merupakan elemen yang sangat konservatif, yang berarti strukturnya hampir sama di berbagai spesies, menunjukkan betapa pentingnya peran molekul ini dalam kehidupan.



tRNA, mRNA, dan ribosom dalam sintesis protein – Openstax.com

## Perbedaan DNA dan RNA

DNA dan RNA merupakan asam nukleat di dalam sel, berikut merupakan perbedaannya dapat dilihat pada Tabel berikut:

**Tabel perbedaan DNA dan RNA**

Aspek	DNA (deoxyribonucleic Acid)	RNA (Ribonucleic Acid)
<b>Struktur</b>	Heliks ganda (double helix)	Untaian enetic (single-stranded)
<b>Gula</b>	Deoksiribosa	Ribosa
<b>Basa Nitrogen</b>	Adenina (A), Timina (T), Guanina (G), Sitosina (C)	Adenina (A), Urasil (U), Guanina (G), Sitosina (C)
<b>Lokasi</b>	Sebagian besar berada di inti sel ( enetic)	Terdapat di sitoplasma, enetic, dan ribosom
<b>Fungsi Utama</b>	Penyimpan dan penyedia informasi genetik	Membawa informasi enetic dan berperan dalam sintesis protein
<b>Stabilitas</b>	Lebih stabil karena adanya deoksiribosa	Kurang stabil dibandingkan DNA karena ribosa
<b>Replikasi</b>	Dapat mereplikasi dirinya sendiri	Tidak dapat mereplikasi; disintesis dari DNA (transkripsi)
<b>Jenis</b>	Hanya ada satu jenis DNA	Terdapat beberapa jenis: mRNA, tRNA, rRNA, dan lainnya
<b>Pasangan Basa</b>	A berpasangan dengan T, G berpasangan dengan C	A berpasangan dengan U, G berpasangan dengan C

## Sintesis Protein dan Pembentukan Sifat

Sintesis protein adalah proses penting yang menghubungkan informasi genetik yang terdapat dalam DNA dengan pembentukan sifat-sifat pada makhluk hidup. Protein memainkan peran vital dalam hampir semua proses biologis, termasuk fungsi enzimatik, pengaturan hormon, transportasi molekul, dan struktur sel. Proses sintesis protein terjadi dalam dua tahap utama: transkripsi dan translasi, yang melibatkan molekul-molekul penting seperti DNA, RNA, dan ribosom.

### Mekanisme Sintesis Protein

Mekanisme sintesis protein terdiri dari dua proses utama: transkripsi, di mana informasi genetik dalam DNA ditranskripsi menjadi RNA, dan translasi, di mana mRNA diterjemahkan menjadi rantai polipeptida (protein).

#### a. Transkripsi

Transkripsi adalah tahap pertama dalam sintesis protein, di mana segmen DNA yang mengandung gen diubah menjadi mRNA (messenger RNA).



### Biologipedia

#### DNA: Si Benang Super Panjang dalam Ruang Super Sempit

Jika seluruh DNA dalam satu sel tubuh manusia direntangkan, panjangnya bisa mencapai 2 meter! Padahal, diameter inti sel tempat DNA itu berada hanya sekitar 6 mikrometer—jauh lebih kecil dari sehelai rambut!

Bagaimana mungkin? DNA menggulung sangat rapat membentuk struktur kromosom berkat bantuan protein khusus bernama histon, seperti benang yang dililit rapi pada kumparan kecil.

Jadi, bisa dibayangkan betapa canggihnya tubuh kita dalam menyimpan jutaan informasi genetik dalam ruang yang super kecil?



Proses ini terjadi di dalam nukleus pada sel eukariotik, atau di sitoplasma pada sel prokariotik, dan melibatkan enzim RNA polimerase.

▷ **Inisiasi**

Proses transkripsi dimulai pada daerah tertentu dari DNA yang disebut promotor, yang merupakan tempat RNA polimerase berikatan untuk memulai transkripsi. Pada tahap inisiasi, enzim RNA polimerase membuka heliks ganda DNA untuk mengakses untaian template yang akan digunakan untuk membentuk mRNA. Ini adalah langkah penting untuk memastikan bahwa hanya bagian tertentu dari DNA yang ditranskripsi.

▷ **Elongasi**

Setelah tahap inisiasi, RNA polimerase mulai bergerak sepanjang untaian DNA template, menyusun molekul mRNA dengan menambahkan nukleotida yang berpasangan dengan DNA template (Adenina dengan Urasil, dan Sitosina dengan Guanina). Proses ini berlangsung dari arah 5' ke 3', dengan setiap nukleotida baru ditambahkan pada ujung 3' mRNA yang sedang tumbuh. Untaian mRNA yang dihasilkan akan menjadi salinan komplementer dari DNA template.

▷ **Terminasi**

Transkripsi berakhir ketika RNA polimerase mencapai sinyal terminasi, yaitu urutan DNA tertentu yang memberi tahu enzim untuk berhenti menyalin. Setelah mencapai terminasi, RNA polimerase melepaskan untaian mRNA yang baru terbentuk, dan DNA kembali ke bentuk heliks gandanya. mRNA yang dihasilkan ini membawa informasi genetik ke ribosom untuk tahap selanjutnya, yaitu translasi.

**b. Translasi**

Proses translasi dimulai dengan inisiasi, di mana ribosom kecil mengikat mRNA pada kodon inisiasi, biasanya AUG, yang mengkodekan asam amino metionin. Molekul tRNA inisiator yang membawa metionin kemudian berikatan dengan kodon inisiasi melalui antikodon yang komplementer. Setelah tRNA inisiator terikat pada mRNA, subunit besar ribosom bergabung untuk membentuk kompleks ribosom lengkap, dan proses translasi pun siap untuk dimulai. Translasi meliputi tiga tahap, yaitu sebagai berikut:

▷ **Inisiasi Translasi**

Proses translasi dimulai dengan inisiasi, di mana ribosom kecil mengikat mRNA pada kodon inisiasi, biasanya AUG, yang mengkodekan asam amino metionin. Molekul tRNA inisiator yang membawa metionin kemudian berikatan dengan kodon inisiasi melalui antikodon yang komplementer. Setelah tRNA inisiator terikat pada mRNA, subunit besar ribosom bergabung untuk membentuk kompleks ribosom lengkap, dan proses translasi pun siap untuk dimulai.

▷ **Elongasi Translasi**

Setelah inisiasi, translasi berlanjut ke tahap elongasi, di mana asam amino ditambahkan satu per satu ke rantai polipeptida yang sedang dibentuk. Elongasi translasi dibagi menjadi tiga tahap, yaitu sebagai berikut:

• **Pengenalan Kodon**

Ribosom membaca kodon mRNA secara berurutan, dan tRNA yang sesuai dengan antikodon komplementer membawa asam amino yang tepat ke ribosom. Setiap tRNA membawa satu asam amino yang sesuai dengan kodon pada mRNA.

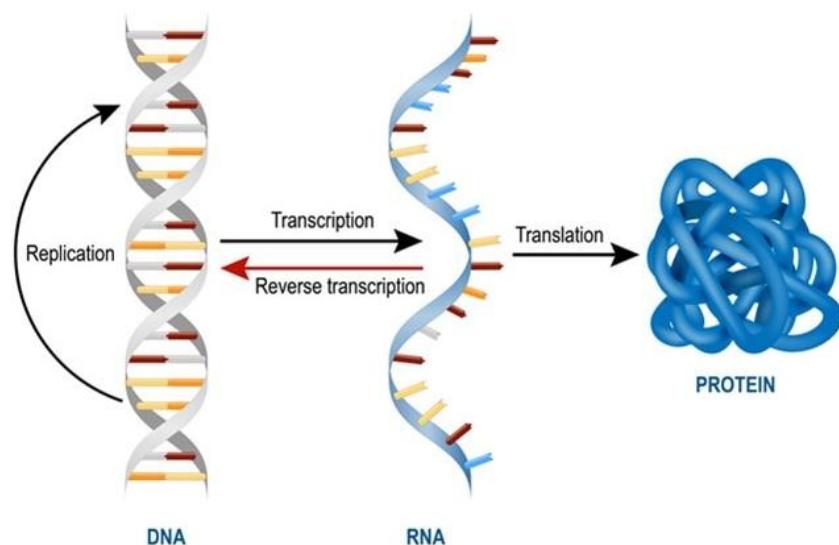
- **Pembentukan Ikatan Peptida**

Ribosom kemudian membentuk ikatan peptida antara asam amino yang dibawa oleh tRNA. Proses ini menghubungkan asam amino menjadi rantai polipeptida yang semakin panjang. Enzim peptidil transferase, yang terdapat di ribosom, membantu katalis pembentukan ikatan peptida.

- **Translokasi**

Setelah pembentukan ikatan peptida, ribosom bergerak sepanjang mRNA menuju kodon berikutnya, dan tRNA yang sebelumnya melepaskan asam aminonya keluar dari ribosom. Proses ini dikenal sebagai translokasi, di mana ribosom berpindah ke kodon berikutnya, dan proses elongasi berlanjut hingga seluruh kodon mRNA dibaca.

Transcription and Translation



Ilustrasi replikasi, transkripsi, dan translasi – Shutterstock.com.1040

▷ **Terminasi Translasi**

	U	C	A	G	
U	UUU Phenylalanine UUC UUA UUG	UCU Serine UCC UCA UCG	UAU Tyrosine UAC UAA STOP UAG	UGU Cysteine UGC UGA STOP UGG Tryptophan	U C A G
C	CUU CUC CUA CUG	CCU Proline CCC CCA CCG	CAU Histidine CAC CAA CAG	CGU Arginine CGC CGA CGG	U C A G
A	AUU Isoleucine AUC AUA AUG START	ACU Threonine ACC ACA ACG	AAU Asparagine AAC AAA AAG	AGU Serine AGC AGA Arginine AGG	U C A G
G	GUU Valine GUC GUA GUG	GCU Alanine GCC GCA GCG	GAU Aspartic acid GAC GAA GAG	GGU Glycine GGC GGA GGG	U C A G

Kode genetik untuk menentukan asam amino sesuai kodon – shutterstock.com/Artemide

Proses translasi berakhir ketika ribosom mencapai kodon terminasi pada mRNA, seperti UAA, UAG, atau UGA, yang tidak mengkodekan asam amino apapun. Kodon ini memberi sinyal kepada ribosom untuk menghentikan proses translasi. Faktor pelepasan (release factor) kemudian masuk ke ribosom, menyebabkan rantai polipeptida yang baru terbentuk dilepaskan dari tRNA terakhir.

Setelah terminasi, ribosom melepaskan mRNA dan memisahkan subunit besarnya. Rantai polipeptida yang dihasilkan akan mengalami pelipatan dan modifikasi pasca-translasi untuk menjadi protein fungsional yang memiliki struktur tiga dimensi yang spesifik.

### Perbedaan Sintesis Protein pada Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik

Proses sintesis protein pada sel prokariotik dan sel eukariotik pada dasarnya mengikuti langkah-langkah yang sama, yaitu transkripsi dan translasi. Namun, terdapat beberapa perbedaan penting dalam cara kedua jenis sel ini menjalankan sintesis protein, terutama terkait lokasi, regulasi, dan kompleksitas proses tersebut. Perbedaan ini disebabkan oleh variasi struktural antara sel prokariotik yang lebih sederhana dan sel eukariotik yang lebih kompleks.

Berikut merupakan tabel perbedaan sintesis protein pada sel prokariotik dan eukariotik dapat dilihat dibawah ini:

**Tabel perbedaan sintesis protein pada sel prokariotik dan eukariotik**

Aspek	Sel Prokariotik	Sel Eukariotik
<b>Lokasi Transkripsi dan Translasi</b>	Terjadi di sitoplasma. Transkripsi dan translasi dapat berlangsung simultan.	Transkripsi terjadi di inti sel, translasi di sitoplasma. Tidak simultan.
<b>Pemrosesan mRNA</b>	Tidak ada pemrosesan mRNA. mRNA langsung siap diterjemahkan oleh ribosom.	mRNA harus diproses terlebih dahulu: penambahan topi 5', ekor poli-A, dan splicing untuk menghilangkan intron.
<b>Kecepatan Sintesis Protein</b>	Sintesis protein terjadi dengan cepat. Ribosom lebih sederhana (70S).	Sintesis protein lebih lambat dan kompleks. Ribosom lebih besar dan kompleks (80S).
<b>Struktur Ribosom</b>	Terdiri dari subunit 30S dan 50S (membentuk ribosom 70S).	Terdiri dari subunit 40S dan 60S (membentuk ribosom 80S).
<b>Regulasi Sintesis Protein</b>	Regulasi terutama terjadi di transkripsi, dengan mekanisme sederhana seperti operon.	Regulasi terjadi di berbagai tahap: transkripsi, pemrosesan mRNA, dan translasi. Lebih kompleks dan terkontrol ketat.
<b>Stabilitas mRNA</b>	mRNA tidak stabil, cepat terdegradasi, dan berumur pendek.	mRNA lebih stabil, karena adanya topi 5' dan ekor poli-A, sehingga dapat bertahan lebih lama.
<b>Pemisahan Ruang</b>	Tidak ada pemisahan ruang antara transkripsi dan translasi.	Transkripsi dan translasi dipisahkan secara ruang dan waktu (inti sel dan sitoplasma).

### Contoh Soal

Mengapa DNA disebut sebagai pondasi kehidupan bagi makhluk hidup?

#### Jawaban:

DNA disebut sebagai pondasi kehidupan karena menyimpan seluruh informasi genetik yang dibutuhkan makhluk hidup. Informasi ini menentukan bagaimana tubuh tumbuh, berkembang, dan mewarisi sifat.

#### Pembahasan:

DNA mengandung gen yang mengkode protein, yaitu molekul penting yang mengatur struktur dan fungsi tubuh. Tanpa DNA, proses biologis seperti pertumbuhan dan pewarisan sifat tidak akan terjadi dengan tepat.



## 2. Mengurangi Pola-pola Hereditas: Rahasia di Balik Silsilah

Pola hereditas mengacu pada cara sifat-sifat atau karakter diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya melalui gen. Proses pewarisan ini mengikuti pola-pola tertentu yang didasarkan pada kombinasi gen dari orang tua. Dalam memahami pola hereditas, ada beberapa istilah penting yang harus dipahami, termasuk parental, gamet, filial, genotipe, fenotipe, dan karakter. Setiap konsep ini membantu menjelaskan bagaimana informasi genetik dari orang tua diturunkan kepada keturunannya dan mempengaruhi sifat-sifat yang terlihat.

### a. Parental

**Definisi:** Parental atau generasi orang tua, sering kali disingkat sebagai P, adalah generasi pertama yang memulai proses persilangan dalam studi genetika. Parental mengacu pada dua individu yang disilangkan atau kawin untuk mempelajari pola pewarisan sifat pada keturunannya. Parental membawa kombinasi genetik tertentu yang akan diwariskan ke generasi berikutnya melalui gamet mereka.

**Contoh:** Pada percobaan Gregor Mendel, parental adalah tanaman kacang polong murni yang memiliki sifat yang berbeda, misalnya tanaman berbunga ungu dan tanaman berbunga putih. Persilangan antara parental ini menjadi dasar bagi pemahaman pola-pola hereditas.

### b. Gamet

**Definisi:** Gamet adalah sel reproduksi yang mengandung setengah jumlah kromosom dibandingkan dengan sel tubuh biasa. Pada manusia dan banyak organisme lainnya, gamet adalah sel telur pada perempuan dan sperma pada laki-laki. Gamet hanya membawa satu set kromosom (haploid) yang mengandung salinan gen dari orang tua.

**Contoh:** Selama proses fertilisasi, gamet jantan dan betina bergabung, mengembalikan jumlah kromosom penuh dalam sel yang dihasilkan, yang disebut zigot. Gamet membawa informasi genetik dalam bentuk alel, yang akan menentukan genotipe dan fenotipe dari keturunan yang dihasilkan.

### c. Filial

**Definisi:** Filial atau sering disingkat sebagai F, adalah generasi keturunan dari parental. Generasi pertama keturunan disebut F1 (filial pertama), sedangkan keturunan dari F1 disebut F2 (filial kedua), dan seterusnya. Dalam eksperimen pewarisan sifat, istilah filial digunakan untuk melacak bagaimana sifat-sifat tertentu diwariskan dari generasi ke generasi.

**Contoh:** Dalam percobaan Mendel, F1 dihasilkan dari persilangan dua parental (P) yang memiliki sifat berbeda. Semua keturunan di F1 biasanya menunjukkan satu sifat dominan, sedangkan di F2, sifat resesif bisa muncul kembali karena adanya kombinasi gen yang berbeda dari kedua orang tua F.

### d. Genotipe

**Definisi:** Genotipe mengacu pada susunan genetik atau komposisi alel individu. Genotipe menentukan sifat-sifat yang diwariskan oleh keturunan, tetapi tidak selalu tampak secara langsung karena beberapa alel bisa bersifat resesif atau tidak terekspresikan secara fenotipik.

**Contoh:** Jika seseorang memiliki alel dominan untuk warna mata coklat (B) dan alel resesif untuk warna mata biru (b), genotipenya akan Bb. Meskipun seseorang memiliki gen untuk mata biru, mata mereka akan berwarna coklat karena alel dominan (B) lebih kuat daripada alel resesif (b). Genotipe memberikan dasar bagi fenotipe, tetapi genotipe itu sendiri tidak selalu tampak.

#### e. Fenotipe

**Definisi:** Fenotipe adalah penampilan fisik atau ciri-ciri yang dapat diamati pada individu sebagai hasil dari ekspresi genotipe. Fenotipe bisa meliputi sifat-sifat seperti warna mata, tinggi badan, bentuk daun pada tumbuhan, atau jenis bulu pada hewan. Berbeda dengan genotipe, fenotipe dipengaruhi oleh faktor genetik dan bisa juga dipengaruhi oleh lingkungan.

**Contoh:** Jika seseorang memiliki genotipe  $Bb$  (dominan untuk warna mata coklat), maka fenotipe mereka akan menunjukkan warna mata coklat. Fenotipe ini merupakan ekspresi dari genotipe yang diwariskan dari orang tua, tetapi juga bisa dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti nutrisi atau iklim.

#### f. Karakter

**Definisi:** Karakter dalam konteks genetika mengacu pada sifat-sifat spesifik yang dapat diwariskan oleh keturunan. Setiap karakter biasanya ditentukan oleh gen atau sekumpulan gen tertentu.

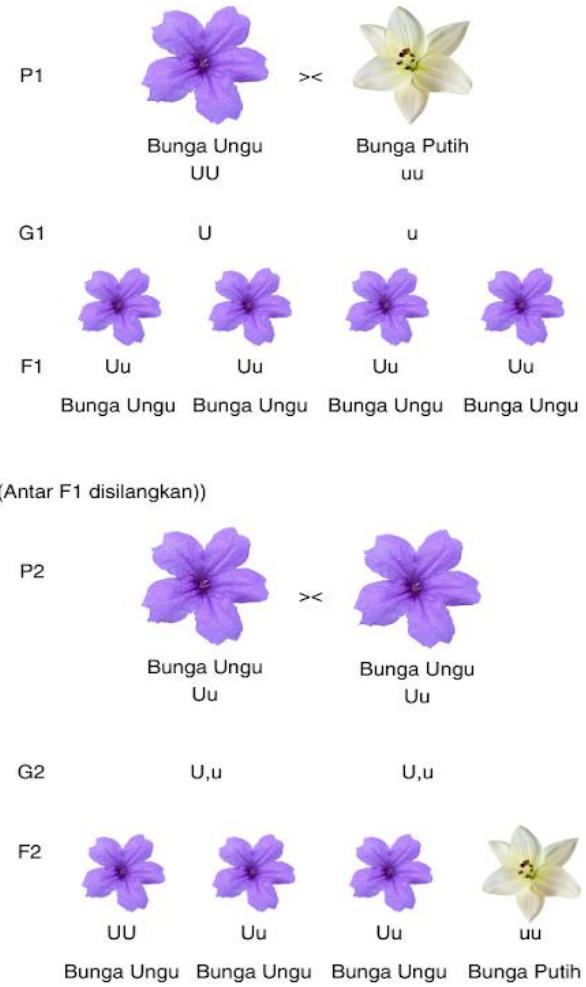
**Contoh:** karakter dalam manusia bisa berupa warna kulit, tinggi badan, atau golongan darah, sedangkan pada tumbuhan bisa berupa tinggi tanaman, warna bunga, atau bentuk daun.

### Hukum Pewarisan Sifat

Hukum pewarisan sifat yang dikemukakan oleh Gregor Mendel pada pertengahan abad ke-19 merupakan dasar dari genetika modern. Melalui percobaannya dengan tanaman kacang polong, Mendel mampu menjelaskan bagaimana sifat-sifat tertentu diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Hasil penelitiannya dituangkan dalam dua hukum utama yang dikenal sebagai Hukum Mendel I (Hukum Segregasi) dan Hukum Mendel II (Hukum Asortasi Bebas).

#### a. Hukum Mendel I (Hukum Segregasi)

Hukum Segregasi menyatakan bahwa pada saat pembentukan gamet (sperma dan sel telur), pasangan alel yang menentukan sifat tertentu akan dipisahkan atau disegregasikan secara acak ke dalam gamet. Ini berarti bahwa setiap gamet hanya akan membawa satu alel dari pasangan tersebut. Hukum ini menjelaskan mengapa keturunan menerima salah satu alel dari ayah dan salah satu alel dari ibu. Dalam percobaan Mendel, ia menyilangkan tanaman kacang polong dengan bunga ungu dan tanaman dengan bunga putih. Pada generasi F1 (keturunan pertama), semua tanaman berbunga ungu, tetapi pada generasi F2 (keturunan kedua), sekitar 75% tanaman berbunga ungu dan 25% berbunga putih. Dari sini, Mendel menyimpulkan bahwa alel untuk bunga ungu bersifat dominan, sedangkan alel untuk bunga putih bersifat resesif. Perhatikan diagram persilangan monohibrid sebagai berikut:



Rasio Genotipe F2 =  $UU : Uu : uu | 1 : 2 : 1$   
Rasio Fenotipe F2 = Bunga Ungu : Bunga Putih | 75% : 25% | 3 : 1

Peristiwa persilangan monohibrid dapat dijelaskan sebagai berikut:

- ▷ Dalam persilangan monohibrid, sifat dominan akan selalu menutupi sifat resesif pada generasi  $F_1$ , sehingga seluruh keturunan  $F_1$  menampilkan fenotipe dominan.
- ▷ Pada generasi  $F_2$ , sifat resesif bisa muncul kembali dalam rasio 3:1, sesuai dengan prediksi Hukum Segregasi Mendel, di mana alel resesif hanya terekspresi jika kedua alel adalah resesif (homozigot resesif).

**b. Hukum Mendel II (Hukum Asortasi Berpasangan Bebas)**

Hukum Mendel II, atau yang dikenal sebagai Hukum Asortasi Bebas, menyatakan bahwa selama pembentukan gamet, gen-gen yang mengendalikan sifat-sifat yang berbeda akan diwariskan secara independen satu sama lain, asalkan gen-gen tersebut terletak pada kromosom yang berbeda atau berjauhan pada kromosom yang sama. Ini berarti bahwa pewarisan satu sifat tidak mempengaruhi pewarisan sifat lainnya, sehingga kombinasi baru dari sifat-sifat dapat muncul pada keturunan.

Mendel menyimpulkan hukum ini dari eksperimen persilangan dihibrid, yaitu persilangan antara dua individu yang memiliki dua sifat beda. Melalui persilangan ini, Mendel dapat melihat bagaimana dua sifat diwariskan secara bersamaan dan menemukan bahwa gen-gen yang mengontrol sifat tersebut bersegregasi secara bebas satu sama lain.

Misalkan kita mengambil contoh persilangan tanaman kacang polong yang memiliki dua sifat berbeda:

- ▷ Bentuk biji: bulat (dominan, B) dan keriput (reesesif, b).
- ▷ Warna biji: kuning (dominan, Y) dan hijau (reesesif, y).

Pada generasi  $P_1$  (parental), disilangkan dua tanaman dengan genotipe sebagai berikut:

- ▷ Tanaman 1 (Bulat-Kuning): BBYY
- ▷ Tanaman 2 (Keriput-Hijau): bbyy

Generasi  $F_1$  yang dihasilkan dari persilangan ini akan memiliki genotipe  $BbYy$  dan menampilkan fenotipe bulat-kuning, karena kedua sifat dominan, B dan Y, menutupi sifat resesif, b dan y. Untuk memahami Hukum Asortasi Bebas, kita harus melihat persilangan antara dua individu  $F_1$  dengan genotipe  $BbYy$ . Selama pembentukan gamet, gen B/b dan Y/y bersegregasi secara independen, sehingga kombinasi gamet yang dihasilkan oleh individu  $F_1$  dapat berupa:

- ▷ BY, By, bY, dan by

Ketika dua individu  $F_1$  ( $BbYy \times BbYy$ ) disilangkan, kombinasi alel ini akan menghasilkan 16 kombinasi genotipe yang berbeda pada generasi  $F_2$ . Tabel di bawah ini menunjukkan hasil persilangan di tingkat  $F_2$ :

Perhatikan tabel persilangan dihibrid berikut:  $F_2$  ( $BbYy \times BbYy$ )

**Tabel persilangan dihibrid**

$\text{♀/♂}$	$\text{♂ BY}$	$\text{♂ By}$	$\text{♂ bY}$	$\text{c. } \text{♂ by}$
$\text{♀ BY}$	BBYY	BBYy	BbYY	BbYy
$\text{♀ By}$	BBYy	BByy	BbYy	Bbyy
$\text{♀ bY}$	BbYY	BbYy	bbYY	bbYy
$\text{♀ by}$	BbYy	Bbyy	bbYy	bbyy

Pada generasi  $F_2$ , hasil dari persilangan ini akan mengikuti rasio fenotipe 9:3:3:1, yang menunjukkan bahwa gen untuk bentuk biji dan warna biji diwariskan secara independen:

- ▷ 9 bagian tanaman dengan biji bulat-kuning (kombinasi dominan B-Y-).
- ▷ 3 bagian tanaman dengan biji bulat-hijau (kombinasi dominan B-yy).
- ▷ 3 bagian tanaman dengan biji keriput-kuning (kombinasi bbY-).
- ▷ 1 bagian tanaman dengan biji keriput-hijau (kombinasi homozigot resesif bbyy).

Hukum Asortasi Bebas menjelaskan bahwa selama meiosis (proses pembentukan gamet), segregasi alel yang mengontrol satu sifat tidak dipengaruhi oleh segregasi alel yang mengontrol sifat lainnya, asalkan gen-gen tersebut berada pada kromosom yang berbeda. Akibatnya, alel untuk bentuk biji (B/b) dan warna biji (Y/y) akan masuk ke gamet secara acak dan independen. Inilah yang menyebabkan variasi genetik dalam kombinasi sifat pada keturunan.

Dalam contoh di atas:

- ▷ Alel B (bulat) bisa berpasangan dengan alel Y (kuning), atau bisa berpasangan dengan alel y (hijau).
- ▷ Alel b (keriput) juga bisa berpasangan dengan alel Y atau y, terlepas dari apakah alel tersebut dominan atau resesif untuk sifat lainnya.

## Testcross, Backcross, dan Persilangan Resiprok

Dalam studi genetika, terdapat beberapa teknik persilangan yang digunakan untuk menguji pewarisan sifat, mendeteksi genotipe, atau mengeksplorasi interaksi antara alel. Tiga metode penting dalam genetika klasik adalah uji silang (testcross), silang balik (backcross), dan persilangan resiprokal. Masing-masing metode ini memiliki tujuan khusus dalam memahami pola pewarisan dan interaksi genetik antara parental dan keturunannya.

### a. Uji silang (Testcross)

**Definisi:** Uji silang atau testcross adalah metode yang digunakan untuk menentukan genotipe individu dengan fenotipe dominan tetapi genotipenya tidak diketahui (bisa homozigot dominan atau heterozigot). Untuk melakukan uji silang, individu tersebut disilangkan dengan individu lain yang memiliki genotipe homozigot resesif.

**Tujuan:** Uji silang bertujuan untuk mengidentifikasi apakah individu yang berfenotipe dominan adalah homozigot dominan (AA) atau heterozigot (Aa).

**Cara Kerja:** Individu dengan fenotipe dominan (yang bisa memiliki genotipe AA atau Aa) disilangkan dengan individu homozigot resesif (aa).

**Contoh Uji Silang:** Misalkan kita memiliki tanaman berbunga ungu (dominannya adalah ungu, A) dan kita ingin mengetahui apakah tanaman tersebut homozigot dominan (AA) atau heterozigot (Aa). Kita akan melakukan uji silang dengan tanaman berbunga putih (reesesif, aa).

- ▷ Jika tanaman ungu yang diuji adalah homozigot dominan (AA), maka semua keturunannya akan berbunga ungu (100% ungu, genotipe Aa).
- ▷ Jika tanaman ungu tersebut heterozigot (Aa), maka kita akan mendapatkan keturunan dengan rasio 50% ungu (Aa) dan 50% putih (aa).

### **Hasil Uji Silang:**

- ▷ 100% keturunan berfenotipe ungu → individu yang diuji adalah homozigot dominan (AA).
- ▷ 50% ungu, 50% putih → individu yang diuji adalah heterozigot (Aa).

### **b. Uji Silang Balik (Backcross)**

**Definisi:** Backcross atau silang balik adalah persilangan antara keturunan  $F_1$  dengan salah satu induk dari generasi parental. Tujuan dari backcross adalah untuk meningkatkan atau mempertahankan sifat-sifat parental tertentu dalam keturunan berikutnya, atau untuk lebih jelas mengungkapkan genotipe individu yang diuji.

**Tujuan:** Backcross digunakan untuk memperkuat karakteristik genetik yang diinginkan dari salah satu induk pada keturunan selanjutnya, atau untuk memudahkan deteksi genotipe keturunan  $F_1$ .

**Cara Kerja:** Backcross dilakukan dengan menyilangkan individu  $F_1$  (yang merupakan hasil dari persilangan parental) dengan salah satu individu dari generasi parental ( $P_1$ ).

#### **Jenis Backcross:**

- ▷ Backcross ke induk homozigot dominan: Jika individu  $F_1$  disilangkan dengan induk homozigot dominan, hasilnya akan menunjukkan apakah individu  $F_1$  memiliki genotipe heterozigot atau homozigot dominan.
- ▷ Backcross ke induk homozigot resesif: Jika individu  $F_1$  disilangkan dengan induk homozigot resesif, ini akan mengungkapkan apakah  $F_1$  memiliki alel dominan atau tidak.

**Contoh Backcross:** Misalnya, tanaman berbunga ungu ( $F_1$  dengan genotipe Aa) disilangkan kembali dengan induk yang berbunga putih (aa). Hasil persilangan ini akan menghasilkan keturunan dengan rasio fenotipe yang menunjukkan kehadiran atau tidaknya alel dominan.

- ▷ 50% ungu (Aa) dan 50% putih (aa).

Backcross ini membantu untuk mengeksplorasi lebih lanjut genotipe dari individu  $F_1$  dan mengungkap bagaimana sifat dominan dan resesif diturunkan ke generasi berikutnya.

### **c. Persilangan Resiprok**

**Definisi:** Persilangan resiprokal adalah jenis persilangan di mana dua individu disilangkan dua kali, tetapi dengan pertukaran peran parental pada setiap percobaan. Artinya, dalam satu persilangan, satu individu bertindak sebagai induk jantan dan yang lain sebagai induk betina. Kemudian, peran tersebut dibalik pada persilangan berikutnya. Persilangan resiprokal sering digunakan untuk menguji apakah pewarisan sifat tertentu dipengaruhi oleh jenis kelamin dari orang tua.

**Tujuan:** Persilangan resiprokal digunakan untuk menentukan apakah suatu sifat diwariskan secara autosom (kromosom tubuh) atau seks-linked (terkait dengan kromosom seks). Jika hasil kedua persilangan memberikan hasil yang berbeda, ini menandakan adanya pengaruh kromosom seks dalam pewarisan sifat.

**Cara Kerja:** Individu dengan fenotipe dominan (yang bisa memiliki genotipe AA atau Aa) disilangkan dengan individu homozigot resesif (aa).

**Contoh Uji Silang:** Misalkan kita memiliki tanaman berbunga ungu (dominannya adalah ungu, A) dan kita ingin mengetahui apakah tanaman tersebut homozigot dominan (AA) atau heterozigot (Aa). Kita akan melakukan uji silang dengan tanaman berbunga putih (reesif, aa).

- ▷ Jika tanaman ungu yang diuji adalah homozigot dominan (AA), maka semua keturunannya akan berbunga ungu (100% ungu, genotipe Aa).

- ▷ Jika tanaman ungu tersebut heterozigot (Aa), maka kita akan mendapatkan keturunan dengan rasio 50% ungu (Aa) dan 50% putih (aa).

#### **Hasil Uji Silang:**

- ▷ 100% keturunan berfenotipe ungu → individu yang diuji adalah homozigot dominan (AA).
- ▷ 50% ungu, 50% putih → individu yang diuji adalah heterozigot (Aa).

## **Menghitung Macam Gamet, Fenotipe, dan Genotipe**

Dalam persilangan genetik, perhitungan jumlah macam gamet, fenotipe, dan genotipe sangat penting untuk memahami pola pewarisan sifat dan variasi yang terjadi pada keturunan. Dengan mengetahui cara menghitung gamet serta memprediksi hasil keturunan, kita dapat memahami lebih dalam bagaimana alel-alel dari induk bersegregasi dan berinteraksi untuk menghasilkan keturunan dengan sifat yang berbeda.

### **a. Menghitung Jumlah Macam Gamet**

Jumlah macam gamet yang dihasilkan oleh suatu individu dapat dihitung berdasarkan jumlah lokus yang bersifat heterozigot. Untuk menghitung jumlah gamet, digunakan rumus sederhana.

**Rumus:** Misalkan Jumlah macam gamet =  $2^n$ , di mana n adalah jumlah pasangan alel yang bersifat heterozigot (Aa, Bb, dan sebagainya).

#### **Contoh:**

- ▷ Jika suatu individu memiliki genotipe AaBb, terdapat 2 lokus heterozigot (A/a dan B/b), sehingga jumlah macam gamet yang dihasilkan adalah:  $2^n = 2^2 = 4$

Gamet yang dihasilkan: AB, Ab, aB, ab.

- ▷ Jika genotipe adalah AaBbCc, dengan 3 lokus heterozigot, jumlah macam gametnya adalah:  $2^n = 2^3 = 8$

Gamet yang dihasilkan: ABC, ABC, AbC, Abc, aBC, aBc, abC, abc.

### **b. Menghitung Genotipe dan Fenotipe Hasil Keturunan**

Menghitung Genotipe dan Fenotipe Hasil Keturunan melibatkan pemahaman tentang pola pewarisan sifat berdasarkan persilangan genetik. Genotipe adalah kombinasi alel yang dimiliki oleh suatu individu untuk suatu sifat, sementara fenotipe adalah ekspresi fisik atau karakteristik yang dihasilkan oleh genotipe tersebut. Untuk menghitung genotipe dan fenotipe hasil keturunan, kita dapat menggunakan Punnett square (kotak Punnett) sebagai alat bantu:

Genotipe dihitung dengan menuliskan kombinasi alel yang mungkin diwariskan dari kedua orang tua. Misalnya, dalam persilangan antara dua individu heterozigot Aa x Aa, hasilnya adalah kombinasi genotipe AA, Aa, dan aa.

Fenotipe dihitung dengan melihat bagaimana kombinasi genotipe tersebut mengekspresikan sifat. Jika alel A dominan terhadap alel a, maka genotipe AA dan Aa akan menghasilkan fenotipe yang sama, misalnya warna bunga merah, sementara genotipe aa menghasilkan fenotipe yang berbeda, misalnya warna bunga putih.

- ▷ Menghitung Fenotipe Hasil Keturunan dengan Diagram Anak Garpu (Cabang/Bracket).

Diagram anak garpu (atau diagram cabang) adalah cara yang digunakan untuk menghitung fenotipe hasil keturunan dari persilangan genetik, terutama jika melibatkan lebih dari satu sifat. Diagram ini memisahkan setiap sifat yang diamati, sehingga memudahkan dalam menghitung hasil fenotipe dari masing-masing sifat dan kombinasi antar sifat.

- 1) Tuliskan masing-masing kemungkinan fenotipe dari setiap sifat (misalnya warna bunga, bentuk biji).
- 2) Gambarkan garis cabang dari setiap fenotipe dengan rasio yang sesuai, misalnya 3:1 untuk sifat dominan dan resesif.
- 3) Hitung hasil dari kombinasi fenotipe dengan mengalikan setiap cabang.

**Contoh:**

- Misalkan kita memiliki dua sifat, yaitu warna bunga dan bentuk biji:
    - Warna bunga: ungu (dominan, A) dan putih (reesif, a).
    - Bentuk biji: bulat (dominan, B) dan keriput (reesif, b).
  - Persilangan  $AaBb \times AaBb$  akan menghasilkan rasio fenotipe sebagai berikut:
    - Warna bunga: 3 ungu: 1 putih.
    - Bentuk biji: 3 bulat: 1 keriput.
  - Diagram anak garpu untuk fenotipe ini adalah:
    - Warna bunga:
      - 3 ungu
      - 1 putih
    - Bentuk biji:
      - 3 bulat
      - 1 keriput
  - Dengan mengalikan kombinasi cabang, kita mendapatkan fenotipe  $F_2$  dengan rasio:
    - 9 ungu-bulat
    - 3 ungu-keriput
    - 3 putih-bulat
    - 1 putih-keriput
- ▷ Hubungan antara Jumlah Sifat Beda dengan Jumlah Kemungkinan Genotipe dan Fenotipe pada  $F_2$ .

Jumlah kemungkinan genotipe dan fenotipe pada keturunan  $F_2$  tergantung pada jumlah sifat beda (jumlah pasangan alel) yang terlibat dalam persilangan. Untuk setiap pasangan alel, ada 3 kemungkinan genotipe (AA, Aa, aa) dan 2 kemungkinan fenotipe (dominan atau resesif).

- Rumus untuk menghitung jumlah genotipe:  

$$\text{Jumlah genotipe} = 3^n = 3^3 = 9$$

Di mana n adalah jumlah pasangan alel yang heterozigot.
- Rumus untuk menghitung jumlah fenotipe:  

$$\text{Jumlah fenotipe} = 2^n = 2^3 = 8$$

di mana n adalah jumlah sifat beda.
- Contoh:
  - Jika terdapat 1 sifat beda (misalnya Aa), maka:

- Jumlah genotipe:  $3^1 = 3$  (AA, Aa, aa).
- Jumlah fenotipe:  $2^1 = 2$  (dominan dan resesif).
- Jika terdapat 2 sifat beda (misalnya AaBb), maka:
  - Jumlah genotipe:  $3^2 = 9$ .
  - Jumlah fenotipe:  $2^2 = 4$  (9:3:3:1).
- Jika terdapat 3 sifat beda (misalnya AaBbCc), maka:
  - Jumlah genotipe:  $3^3 = 27$ .
  - Jumlah fenotipe:  $2^3 = 8$ .

Ini menunjukkan bahwa semakin banyak sifat beda yang terlibat dalam persilangan, semakin kompleks hasil genotipe dan fenotipe pada generasi keturunan  $F_2$ .

#### c. Menentukan Genotipe Induk

Menentukan genotipe induk dalam suatu persilangan dapat dilakukan melalui beberapa cara, terutama dengan menggunakan uji silang (testcross) atau dengan mengamati rasio fenotipe pada keturunan. Jika genotipe induk tidak diketahui, seperti apakah induk tersebut homozigot dominan atau heterozigot, uji silang dapat membantu untuk menentukan genotipe secara lebih jelas.

##### Contoh Uji Silang:

- Individu dengan fenotipe dominan tetapi genotipe tidak pasti (misalnya berbunga ungu) disilangkan dengan individu homozigot resesif (berbunga putih).
- Jika semua keturunan berfenotipe dominan, induk kemungkinan homozigot dominan (AA).
- Jika keturunan menunjukkan rasio 1:1 (50% dominan, 50% resesif), induk kemungkinan heterozigot (Aa).

Menentukan genotipe induk sangat penting dalam memahami pola pewarisan dan memprediksi kemungkinan kombinasi alel y.

## Penyimpangan Hukum Mendel Tulang

Meskipun hukum-hukum Mendel memberikan dasar yang kuat untuk memahami pola pewarisan sifat, ada situasi di mana hasil persilangan tidak sepenuhnya mengikuti prediksi dari Hukum Mendel I (Segregasi) dan Hukum Mendel II (Asortasi Bebas). Salah satu situasi ini dikenal sebagai penyimpangan semu hukum Mendel, yang terjadi ketika alel-alel berinteraksi dengan cara yang lebih kompleks daripada pola dominan dan resesif sederhana.

Dalam kasus penyimpangan semu hukum Mendel, interaksi antaralel bisa terjadi dalam bentuk kodominansi, dominansi tidak sempurna, alel ganda, dan lain-lain.

#### a. Interaksi Antaralel

##### ▷ Kodominasi

Kodominansi adalah bentuk interaksi antaralel dimana kedua alel dalam pasangan heterozigot sama-sama terekspresi, sehingga menghasilkan fenotipe yang mencerminkan kedua alel tersebut.

Tidak ada alel yang bersifat dominan atau resesif, dan masing-masing alel menunjukkan efeknya secara penuh dan independen.

Salah satu contoh paling terkenal dari kodominansi adalah pada golongan darah sistem ABO pada manusia. Pada sistem ini, terdapat tiga alel:  $I^A$ ,  $I^B$ , dan  $i$ . Alel  $I^A$  dan  $I^B$  bersifat kodominan, sedangkan alel  $i$  bersifat resesif. Kodominansi terjadi ketika individu memiliki genotipe  $I^A I^B$ , di mana kedua alel  $I^A$  dan  $I^B$  terekspresi secara bersamaan, menghasilkan golongan darah AB. Dalam kasus ini, baik alel A maupun alel B menunjukkan pengaruhnya pada fenotipe.

Golongan darah sistem ABO:

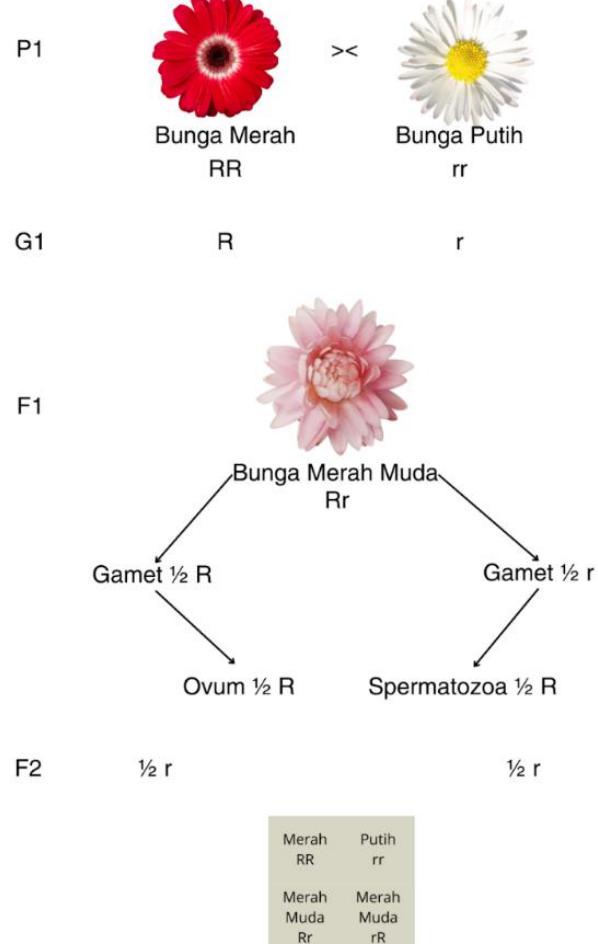
$I^A I^A \rightarrow$  Golongan darah A.

$I^B I^B \rightarrow$  Golongan darah B.

$I^A I^B \rightarrow$  Golongan darah AB (kodominan, kedua alel terekspresi).

ii  $\rightarrow$  Golongan darah O.

Dalam genotipe  $I^A I^B$ , kedua alel terekspresi secara bersamaan, sehingga individu tersebut memiliki golongan darah AB, yang menunjukkan karakteristik dari kedua alel tanpa ada yang mendominasi satu sama lain. Ini adalah perbedaan mendasar dari pola dominansi biasa, di mana hanya alel dominan yang terlihat



Gambar hanya ilustrasi

#### ▷ Dominansi Tidak Sempurna

Pada dominansi tidak sempurna, rasio fenotipe berbeda dari persilangan Mendel klasik. Dalam persilangan dua individu heterozigot (misalnya,  $Rr \times Rr$ ), kita tidak melihat rasio 3:1 seperti dalam persilangan dominan-rezesif. Sebaliknya, hasilnya adalah rasio 1:2:1 baik untuk genotipe maupun fenotipe. Dominansi tidak sempurna terjadi pada bunga snapdragon. Perhatikan ilustrasi berikut:

Dalam dominansi tidak sempurna, hasil persilangan heterozigot selalu memberikan fenotipe yang berbeda dari kedua parent, mencerminkan campuran dari sifat-sifat dominan dan resesif.

#### ▷ Alel Ganda

Alel ganda (multiple alleles) adalah situasi di mana lebih dari dua alel berbeda dapat ditemukan pada satu lokus genetik. Dalam kasus ini, suatu gen memiliki lebih dari dua bentuk alel yang tersedia di dalam populasi, meskipun setiap individu hanya dapat memiliki dua alel untuk gen tersebut (karena kromosomnya berpasangan). Fenomena alel ganda menambah kompleksitas pada pola pewarisan sifat, dan memungkinkan variasi fenotipe yang lebih besar dalam populasi.

Alel ganda banyak ditemukan dalam pewarisan sifat-sifat tertentu, seperti golongan darah dan warna bulu pada hewan. Pada manusia, contoh yang terkenal adalah sistem golongan darah ABO, yang dikendalikan oleh lebih dari dua alel di dalam populasi.

- **Golongan Darah Sistem ABO Manusia**

Golongan darah manusia dalam sistem ABO dikendalikan oleh tiga alel yang berbeda pada satu lokus genetik. Ketiga alel ini adalah:

- $I^A$ : Mengkode antigen A.
- $I^B$ : Mengkode antigen B.
- $i$ : Alel resesif yang tidak mengkode antigen.

Meskipun ada tiga alel ( $I^A$ ,  $I^B$ ,  $i$ ) yang tersedia di dalam populasi, setiap individu hanya dapat memiliki dua alel untuk gen golongan darah ini. Kombinasi alel-alel ini menghasilkan empat golongan darah yang berbeda:

- $I^A I^A$  atau  $I^A i$  → Golongan darah A (antigen A).
- $I^B I^B$  atau  $I^B i$  → Golongan darah B (antigen B).
- $I^A I^B$  → Golongan darah AB (antigen A dan B, kodominan).
- $i i$  → Golongan darah O (tidak ada antigen).

Sistem ABO adalah contoh jelas dari alel ganda, karena lebih dari dua alel tersedia di dalam populasi, tetapi setiap individu hanya memiliki dua dari tiga alel tersebut.

- **Alel Ganda pada Warna Bulu Kelinci**

Golongan Contoh lain dari alel ganda ditemukan pada pewarisan warna bulu kelinci. Pada kelinci, terdapat empat alel berbeda yang mengendalikan warna bulu, dan hubungan antaralel ini menunjukkan dominansi bertingkat. Alel-alel ini termasuk:

- $C$  (warna abu-abu penuh, dominan terhadap yang lain).
- $c^{sh}$  (warna himalaya, dominan terhadap alel albino, tetapi resesif terhadap C).
- $c^{chd}$  (warna chinchilla, resesif terhadap abu-abu penuh).
- $c$  (albino, resesif terhadap semua alel lainnya).

Kombinasi dari alel-alel ini menghasilkan berbagai warna bulu yang berbeda. Misalnya, persilangan antara dua kelinci heterozigot bisa menghasilkan keturunan dengan berbagai kombinasi warna berdasarkan hierarki dominansi di antara alel-alel tersebut.

- **Alel Ganda pada Warna Mata Lalat Buah**

Pada lalat buah, warna mata normalnya adalah merah. Namun, mutasi genetik dapat menyebabkan warna mata yang berbeda, seperti putih, aprikot, mahoni, dan eosin. Gen yang mengendalikan warna mata ini dikenal sebagai gen white ( $w$ ), yang memiliki berbagai alel dengan tingkat dominansi yang berbeda.

Urutan dominansi alel untuk warna mata lalat buah (*Drosophila melanogaster*) melibatkan lebih banyak alel yang mempengaruhi berbagai warna mata. Warna mata normal pada lalat buah adalah merah, tetapi mutasi genetik menghasilkan berbagai alel yang mengubah warna mata. Urutan dominansi ini menunjukkan hierarki antara alel, di mana alel yang lebih dominan akan menutupi alel yang lebih resesif dalam kombinasi heterozigot.

Berikut adalah urutan dominansi alel yang lebih lengkap untuk warna mata lalat buah:

- $w^+$  (wild type, mata merah): Alel normal yang menghasilkan mata merah penuh. Ini adalah alel paling dominan.
- $w^{am}$  (aprikot mahoni): Menghasilkan warna mata aprikot lebih gelap, sedikit lebih dominan daripada aprikot standar.

- wa (aprikot): Menghasilkan warna mata aprikot, yang lebih dominan daripada warna-warna lainnya kecuali wild type.
- we (eosin): Menghasilkan warna mata eosin, yang lebih cerah dibandingkan aprikot tetapi masih resesif terhadap  $w^+$ .
- ww (mottled white, putih bercak): Mata lalat berwarna putih bercak, di mana pigmen putih bercampur dengan sedikit pigmen warna.
- wm (mahoni): Menghasilkan warna mata mahoni yang lebih gelap, resesif terhadap aprikot dan eosin, tetapi lebih dominan dibandingkan putih.
- ws (sepia): Menghasilkan mata berwarna sepia (coklat gelap). Sepia lebih resesif daripada eosin dan aprikot, tetapi masih lebih dominan dibandingkan putih.
- w (putih): Menghasilkan warna mata putih, yang merupakan alel paling resesif. Kombinasi dari alel-alel ini menghasilkan berbagai warna bulu yang berbeda. Misalnya, persilangan antara dua kelinci heterozigot bisa menghasilkan keturunan dengan berbagai kombinasi warna berdasarkan hierarki dominansi di antara alel-alel tersebut.

▷ **Alel Letal**

Alel letal adalah alel yang, dalam kondisi tertentu, menyebabkan kematian individu yang mewarisinya. Alel letal biasanya muncul karena mutasi yang mempengaruhi gen penting untuk kelangsungan hidup. Jika suatu individu memiliki kombinasi genotipe yang mengandung alel letal dalam bentuk homozigot (dua salinan dari alel tersebut), hal ini dapat mengakibatkan kegagalan fungsi penting dalam tubuh, yang pada akhirnya menyebabkan kematian, biasanya sebelum individu tersebut mencapai tahap dewasa atau reproduktif.

Alel letal dapat bersifat dominan atau resesif, tergantung pada bagaimana alel tersebut diekspresikan dan mempengaruhi kelangsungan hidup. Ada juga beberapa kasus di mana alel letal bersifat subletal, yang berarti bahwa alel tersebut tidak selalu menyebabkan kematian tetapi mengurangi harapan hidup atau kebugaran individu.

• **Alel Letal Dominan**

Alel letal dominan adalah alel yang menyebabkan kematian individu yang memiliki, bahkan jika hanya satu salinan dari alel tersebut ada dalam genotipe (heterozigot). Alel letal dominan mematikan, baik dalam kondisi heterozigot (satu salinan alel letal dan satu salinan alel normal) maupun homozigot (dua salinan alel letal), meskipun efek letal pada heterozigot sering kali terjadi setelah individu mencapai usia reproduksi. Ini memungkinkan alel letal dominan tetap berada dalam populasi karena individu yang terkena dapat bertahan hingga mereka memiliki keturunan.

• **Alel Letal Resesif**

Alel letal resesif adalah alel yang menyebabkan kematian individu hanya ketika berada dalam bentuk homozigot resesif (dua salinan dari alel letal tersebut). Individu dengan satu salinan alel letal resesif (heterozigot) biasanya sehat dan tidak menunjukkan gejala, tetapi mereka dapat menjadi pembawa alel tersebut. Ketika dua pembawa heterozigot disilangkan, ada kemungkinan bahwa beberapa keturunannya akan menerima kedua salinan alel letal resesif, yang mengakibatkan kematian pada tahap embrio, bayi, atau masa awal kehidupan.

Alel letal resesif biasanya tersembunyi di dalam populasi karena hanya terekspresikan pada individu yang homozigot resesif. Oleh karena itu, alel ini dapat tetap berada di dalam

populasi untuk waktu yang lama tanpa menyebabkan masalah yang jelas pada pembawa heterozigot.

- **Alel Sub-lethal**

Alel letal resesif adalah alel yang menyebabkan penurunan kebugaran atau harapan hidup, tetapi tidak selalu menyebabkan kematian. Individu yang mewarisi alel subletal mungkin tidak langsung meninggal, tetapi mereka sering mengalami masalah kesehatan yang serius atau keterbatasan dalam pertumbuhan, perkembangan, atau kemampuan reproduksi. Alel subletal sering kali membuat individu yang terkena lebih rentan terhadap penyakit atau mengurangi kualitas hidup mereka secara signifikan.

Alel subletal dapat bersifat dominan, resesif, atau memiliki efek yang tergantung pada faktor lingkungan atau kondisi lainnya. Dalam kasus alel subletal, individu yang mewarisinya mungkin bertahan hidup hingga dewasa, tetapi sering kali tidak hidup selama individu normal atau mengalami gangguan dalam fungsionalitas tubuh mereka. Sindrom Turner adalah contoh dari alel subletal pada manusia. Ini adalah kelainan genetik yang terjadi pada individu perempuan yang hanya memiliki satu kromosom X (karier XO), bukannya dua kromosom seks (XX). Meskipun tidak menyebabkan kematian segera, sindrom Turner sangat memengaruhi perkembangan fisik dan reproduksi individu yang terkena.

## b. Interaksi Genetik

Interaksi genetik terjadi ketika dua atau lebih gen berbeda bekerja bersama untuk mempengaruhi satu atau lebih karakteristik pada individu. Dalam beberapa kasus, interaksi ini dapat menyebabkan penyimpangan dari pola pewarisan Mendelian sederhana, di mana interaksi antara gen-gen tersebut mengubah rasio fenotipe yang dihasilkan. Interaksi genetik dapat melibatkan berbagai mekanisme seperti atavisme, epistasis, polimeri, kriptomeri, dan komplementer, yang mempengaruhi ekspresi sifat pada keturunan.

### ▷ Atavisme

Atavisme adalah fenomena di mana suatu sifat yang sebelumnya hilang atau tidak terekspresi dalam beberapa generasi tiba-tiba muncul kembali pada keturunan berikutnya. Ini sering terjadi ketika gen yang mengontrol sifat tersebut tetap berada dalam genom tetapi tidak aktif, sampai kondisi yang tepat memungkinkan ekspresinya kembali. Atavisme terjadi pada bentuk jengger ayam ras, yang terdiri dari tunggal (single), walnut, biji (pea), dan mawar (rose).

Genotipe dan fenotipe pada karakter jengger ayam dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel genotipe dan fenotipe jengger ayam**

Genotipe	Fenotipe
R-P-	Walnut
R-pp	Rose
rrP-	Pea
rrpp	Single

Pada ayam, gen R (untuk jengger mawar) dan gen P (untuk jengger kacang) adalah dua gen utama yang mempengaruhi bentuk jengger:

- Gen R: Alel R dominan mengontrol pembentukan jengger mawar, sementara alel resesif r mengarah pada bentuk jengger tunggal.
- Gen P: Alel P dominan menghasilkan jengger kacang, sementara alel resesif p tidak mengubah bentuk jengger.

Setiap kombinasi genotipe menghasilkan fenotipe jengger yang berbeda, dan atavisme memungkinkan munculnya bentuk jengger yang lebih jarang atau menyerupai nenek moyang ayam.

▷ **Epistasis dan Hipotasis**

Epistasis adalah bentuk interaksi genetik di mana satu gen dapat menutupi atau menghambat ekspresi gen lain yang berada di lokus berbeda. Gen yang menutupi ekspresi gen lain disebut gen epistatik, sedangkan gen yang ekspresinya tertutupi disebut gen hipostatik. Interaksi ini dapat memodifikasi pola pewarisan Mendelian klasik dan mengubah rasio fenotipe yang muncul pada keturunan. Epistasis dapat bersifat dominan atau resesif, tergantung pada bagaimana gen epistatik bekerja terhadap gen hipostatik.

• **Epistasis Dominan**

Pada epistasis dominan, alel dominan dari gen epistatik menutupi ekspresi gen hipostatik, terlepas dari apapun genotipe yang dimiliki oleh gen hipostatik. Dalam kasus ini, jika gen epistatik memiliki satu alel dominan (A\_), maka gen hipostatik (misalnya, gen B) tidak akan diekspresikan, meskipun gen tersebut memiliki alel dominan.

Salah satu contoh terkenal epistasis dominan ditemukan pada warna buah labu. Dua gen, A dan B, mengontrol warna labu, dengan:

- A: Alel dominan yang menyebabkan warna putih.
- B: Gen yang menentukan apakah buah akan berwarna kuning atau hijau.

Dalam persilangan ini, alel A dominan akan menutupi ekspresi gen B:

- A\_B\_: Buah putih, karena alel dominan A menutupi ekspresi gen B.
- A\_bb: Buah putih (alel A tetap menutupi warna).
- aaB\_: Buah kuning (alel A tidak hadir, sehingga gen B bisa terekspresi).
- aabb: Buah hijau

Rasio fenotipe yang dihasilkan adalah 12:3:1, dengan 12 bagian buah putih (karena alel A dominan), 3 bagian buah kuning (tanpa alel A), dan 1 bagian buah hijau (tanpa alel A dan tanpa alel B).

• **Epistasis Resesif**

Pada epistasis resesif, dua alel resesif dari gen epistatik (misalnya, aa) menutupi ekspresi gen hipostatik, meskipun gen hipostatik mungkin memiliki alel dominan yang biasanya terekspresi. Dalam kondisi homozigot resesif, gen epistatik dapat menghentikan ekspresi dari gen hipostatik.

Contoh Epistasis Resesif:

Contoh klasik dari epistasis resesif adalah warna bulu pada anjing Labrador. Warna bulu Labrador ditentukan oleh dua gen: satu contoh terkenal epistasis dominan ditemukan pada warna buah labu. Dua gen, A dan B, mengontrol warna labu, dengan:

- Gen B: Mengontrol apakah bulu akan berwarna hitam (B) atau cokelat (b).

- Gen E: Mengontrol apakah pigmen akan disimpan di bulu atau tidak. Alel resesif e menutupi ekspresi warna bulu, menyebabkan bulu berwarna kuning jika genotipe ee hadir, terlepas dari alel B atau b.

Kombinasi genotipe ini menghasilkan tiga fenotipe berbeda:

- B\_E\_: Anjing dengan bulu hitam (karena alel B dan E hadir).
- bbE\_: Anjing dengan bulu cokelat (karena alel b dominan di atas E).
- \_ee: Anjing dengan bulu kuning (alel ee menutupi ekspresi warna hitam atau cokelat).

Rasio fenotipe yang dihasilkan dalam persilangan  $F_2$  adalah 9:3:4, dengan 9 anjing hitam (B\_E\_), 3 anjing cokelat (bbE\_), dan 4 anjing kuning (\_ee).

- **Epistasis Gen Dominan Rangkap**

Epistasis gen dominan rangkap terjadi ketika dua gen berbeda, masing-masing dengan alel dominan, dapat menyebabkan fenotipe yang sama. Dalam kasus ini, jika salah satu atau kedua gen memiliki alel dominan, fenotipe tertentu akan muncul, dan hanya genotipe dengan kedua gen yang bersifat resesif yang menampilkan fenotipe alternatif. Dengan kata lain, salah satu alel dominan dari salah satu gen sudah cukup untuk menutupi ekspresi gen yang lain.

Pada epistasis ini, hanya genotipe homozigot resesif dari kedua gen yang menghasilkan fenotipe alternatif. Contoh klasik adalah bentuk biji buah pada gandum. Dua gen dominan, A dan B, mengontrol bentuk biji bulat, sehingga kehadiran satu alel dominan dari salah satu gen (A\_ atau B\_) akan menghasilkan biji bulat. Hanya genotipe yang homozigot resesif untuk kedua gen (aabb) yang menghasilkan biji keriput.

- A\_B\_: Biji bulat (karena adanya alel dominan A dan B).
- A\_bb: Biji bulat (karena alel dominan A menutupi alel resesif pada gen B).
- aaB\_: Biji bulat (karena alel dominan B menutupi alel resesif pada gen A).
- aabb: Biji keriput (karena tidak adanya alel dominan di kedua gen).

Rasio fenotipe yang dihasilkan dalam persilangan  $F_2$  adalah 15:1, di mana 15 bagian dari keturunan akan menghasilkan biji bulat (karena salah satu alel dominan), dan hanya 1 bagian yang menghasilkan biji keriput (aabb).

- **Epistasis Gen Rangkap dengan Efek Kumulatif**

Epistasis gen rangkap dengan efek kumulatif (disebut juga duplicate gene action with cumulative effect) terjadi ketika dua gen yang berbeda memengaruhi fenotipe secara independen, tetapi kombinasi kedua gen menghasilkan efek yang lebih kuat atau kumulatif. Dalam jenis epistasis ini, efek dari dua gen ditambahkan untuk menghasilkan fenotipe yang lebih kuat atau berbeda daripada efek salah satu gen saja.

Jika salah satu gen dominan hadir, fenotipe tertentu akan muncul, tetapi jika kedua gen dominan hadir bersama, fenotipe yang dihasilkan akan berbeda atau lebih kuat.

Salah satu contoh bisa ditemukan pada warna biji jagung. Dua gen dominan, A dan B, mengontrol warna biji. Gen dominan A menyebabkan biji berwarna merah muda, dan gen dominan B juga menyebabkan warna merah muda. Namun, ketika kedua gen dominan (A dan B) hadir bersama, warnanya menjadi merah tua karena efek kumulatif dari kedua gen.

- A\_B\_: Biji merah tua (efek kumulatif dari kedua gen dominan).
- A\_bb: Biji merah muda (gen A bekerja sendirian).
- aaB\_: Biji merah muda (gen B bekerja sendirian).
- aabb: Biji putih (tidak ada alel dominan yang berperan).

Rasio fenotipe yang dihasilkan adalah 9:6:1, di mana 9 bagian biji berwarna merah tua (karena kehadiran kedua gen dominan), 6 bagian biji merah muda (karena hanya salah satu gen dominan), dan 1 bagian biji putih (aabb, tanpa alel dominan).

#### ▷ **Polimeri**

Polimeri adalah bentuk interaksi genetik di mana dua atau lebih gen berbeda memengaruhi satu sifat yang sama secara kumulatif. Setiap gen memberikan kontribusi parsial terhadap ekspresi fenotipe, dan semakin banyak alel dominan yang hadir, semakin kuat ekspresi sifat tersebut. Fenomena polimeri sering terlibat dalam pewarisan sifat-sifat kuantitatif atau kontinu, seperti tinggi badan, warna kulit, dan berat badan, yang tidak menunjukkan perbedaan fenotipe yang tegas seperti sifat-sifat Mendel yang mendominasi atau resesif.

Sifat-sifat yang dikendalikan oleh polimeri umumnya menghasilkan variasi fenotipe yang kontinu, bukan kategori fenotipe yang terbatas. Sebagai contoh, bukannya menghasilkan fenotipe tinggi atau pendek saja, polimeri dapat menghasilkan beragam tinggi badan di antara keturunan. perbedaan fenotipe yang tegas seperti sifat-sifat Mendel yang mendominasi atau resesif.

Tinggi badan pada manusia dikendalikan oleh banyak gen (poligenik). Setiap gen yang terlibat memiliki dua alel: alel dominan (A, B, C) yang memberikan kontribusi terhadap peningkatan tinggi, dan alel resesif (a, b, c) yang tidak memberikan kontribusi. Semakin banyak alel dominan yang dimiliki individu, semakin tinggi fenotipenya.

Jika kita mengasumsikan ada tiga gen yang mengendalikan tinggi badan (A, B, C):

**Tabel contoh genotipe pengendali tinggi badan**

<b>Genotipe</b>	<b>Jumlah Alel Dominan</b>	<b>Fenotipe (Tinggi Badan)</b>
AABBCC	6 alel dominan	Sangat tinggi
AABBCC	5 alel dominan	Tinggi
AaBbCc	3 alel dominan	Tinggi sedang
AabbCc	2 alel dominan	Agak pendek
aabbcc	0 alel dominan	Sangat pendek

Dalam contoh ini, jumlah alel dominan yang dimiliki seseorang menentukan tinggi badan, dengan semakin banyak alel dominan menghasilkan tinggi badan yang lebih tinggi. Fenotipe tinggi badan berada pada spektrum yang terus menerus, tergantung pada kombinasi gen yang dimiliki.

#### ▷ **Kriptomeri**

Kriptomeri adalah fenomena di mana gen tertentu hanya tampak atau terekspresi jika ada gen lain yang hadir untuk mengaktifkannya. Dengan kata lain, gen kriptomik tidak akan menunjukkan efeknya dalam fenotipe kecuali jika gen lain, yang bersifat komplementer, turut aktif. Kriptomeri adalah contoh dari interaksi genetik, di mana ekspresi suatu gen memerlukan kehadiran gen lain untuk memungkinkan ekspresi fenotipik penuh.

Fenomena ini sering terlihat pada pewarisan warna bunga atau sifat-sifat lain yang memerlukan kerja sama antara beberapa gen untuk terekspresi sepenuhnya.

Salah satu contoh klasik dari kriptomeri adalah warna bunga pada tanaman Linaria. Bunga ini bisa berwarna ungu atau putih, tergantung pada interaksi dua gen:

- Gen C diperlukan untuk memproduksi pigmen warna.
- Gen P menentukan apakah warna tersebut akan diekspresikan sebagai warna ungu.

Dalam kasus ini, jika salah satu gen tidak aktif (homozigot resesif), bunga tidak akan berwarna ungu, melainkan akan berwarna putih.

- $C_P_$ : Bunga berwarna ungu (karena kedua gen dominan hadir dan berfungsi penuh).
- $C_{pp}$ : Bunga berwarna putih (meskipun gen C hadir, gen P resesif dan tidak memungkinkan ekspresi warna).
- $ccP_$ : Bunga berwarna putih (gen C resesif, sehingga tidak ada pigmen warna yang diproduksi).
- $ccpp$ : Bunga berwarna putih (tidak ada pigmen dan tidak ada ekspresi warna).

Dalam hal ini, kedua gen, C dan P, harus hadir dalam bentuk dominan untuk menghasilkan warna ungu. Gen P hanya akan berfungsi jika gen C memungkinkan produksi pigmen. Inilah mengapa kriptomeri disebut sebagai "gen tersembunyi" — gen P hanya mengekspresikan efeknya jika gen C juga aktif.

Kriptomeri terjadi ketika ekspresi satu gen bergantung pada kehadiran gen lain yang bekerja dalam jalur biokimia atau jalur genetik yang sama. Mekanisme ini menunjukkan bahwa beberapa sifat yang tampak sederhana sebenarnya dikendalikan oleh beberapa gen yang berinteraksi satu sama lain. Ini juga menunjukkan bahwa gen-gen tersebut bisa saja tampak "tidak aktif" atau "tidak bermanfaat" sampai gen pendukungnya hadir untuk memicu ekspresi penuh. Kedua gen, C dan P, harus hadir dalam bentuk dominan untuk menghasilkan warna ungu. Gen P hanya akan berfungsi jika gen C memungkinkan produksi pigmen. Inilah mengapa kriptomeri disebut sebagai "gen tersembunyi" — gen P hanya mengekspresikan efeknya jika gen C juga aktif.

#### ▷ **Komplementer**

Komplementer adalah jenis interaksi genetik di mana dua atau lebih gen harus bekerja bersama untuk menghasilkan suatu fenotipe tertentu. Setiap gen yang terlibat dalam interaksi komplementer biasanya mengendalikan satu langkah penting dalam proses biokimia atau jalur metabolismik yang berhubungan dengan pembentukan sifat tertentu. Jika salah satu gen tidak aktif atau rusak, fenotipe tidak akan muncul secara lengkap, meskipun gen yang lain berfungsi normal.

Fenomena komplementer menunjukkan bahwa beberapa sifat kompleks tidak bisa diwujudkan hanya dengan satu gen, tetapi memerlukan kerja sama beberapa gen untuk mengekspresikan fenotipe. Fenotipe tersebut akan terekspresi hanya jika semua gen yang terlibat aktif dan bekerja dengan baik.

Salah satu contoh klasik dari interaksi gen komplementer adalah pada pewarisan warna bunga ungu pada tanaman kacang polong, yang dipelajari oleh Gregor Mendel. Warna bunga ungu dikendalikan oleh dua gen, yang keduanya harus hadir dalam bentuk dominan agar warna ungu bisa muncul.

- Gen C diperlukan untuk memproduksi pigmen warna.
- Gen P menentukan apakah warna tersebut akan diekspresikan sebagai warna ungu.

Jika salah satu gen ini tidak ada atau tidak aktif (resesif), warna bunga akan tetap putih, meskipun gen yang lain hadir.

- $C_P_$ : Bunga ungu (kedua gen aktif dan bekerja sama).
- $C_{pp}$ : Bunga putih (gen P resesif, tidak ada aktivasi warna).
- $ccP_$ : Bunga putih (gen C resesif, tidak ada pigmen).
- $ccpp$ : Bunga putih (tidak ada pigmen dan tidak ada aktivasi warna).

Dalam persilangan dua individu heterozigot ( $CcPp \times CcPp$ ), rasio fenotipe yang dihasilkan adalah 9:7, dengan 9 bagian bunga ungu ( $C_P_$ ) dan 7 bagian bunga putih (kombinasi resesif). Gen-gen komplementer sering kali bekerja dalam jalur biokimia yang sama, di mana masing-masing gen mengontrol suatu langkah penting dalam proses. Jika salah satu langkah dalam jalur ini tidak dilakukan karena kerusakan pada gen tertentu, fenotipe akhir tidak akan terekspresi. Dalam hal ini, gen-gen komplementer menunjukkan bahwa ekspresi fenotipe membutuhkan fungsi genetik penuh dari semua gen yang terlibat.

## Tautan Pindah Silang dan Gagal Berpisah

### a. Tautan (Linkage)

Tautan atau linkage mengacu pada cenderungan dua atau lebih gen yang terletak pada kromosom yang sama untuk diwariskan secara bersama-sama selama proses pembentukan gamet (meiosis). Gen-gen yang terletak dekat satu sama lain pada kromosom memiliki kemungkinan yang lebih kecil untuk dipisahkan oleh pindah silang (crossing-over) dan, akibatnya, diwariskan secara bersama. Hal ini menyebabkan penyimpangan dari hukum Mendel tentang segregasi bebas (independent assortment), yang menyatakan bahwa gen-gen berbeda akan diwariskan secara bebas satu sama lain.

#### ▷ Tautan Autosomal

Tautan autosomal melibatkan gen-gen yang terletak pada kromosom tubuh (autosom). Dalam tautan autosomal, gen-gen ini akan cenderung diwariskan bersama karena mereka berada pada kromosom yang sama. Berikut adalah contoh tautan autosomal beserta genotipe dan fenotipenya, menggunakan contoh klasik pada lalat buah (*Drosophila melanogaster*) untuk warna tubuh dan bentuk sayap:

Pada lalat buah (*Drosophila melanogaster*), dua sifat autosomal yang terletak pada kromosom yang sama adalah:

- **Warna Tubuh:**
  - Alel B untuk tubuh abu-abu (dominan).
  - Alel b untuk tubuh hitam (resesif)
- **Bentuk Sayap:**
  - Alel  $Vg$  untuk sayap normal (dominan).
  - Alel  $vg$  untuk sayap vestigial (sayap pendek dan tidak berfungsi, resesif).

Jika gen-gen ini tertaut pada kromosom autosom yang sama, mereka akan cenderung diwariskan bersama, menghasilkan kombinasi fenotipe yang lebih mirip dengan induk.

Misalkan kita memiliki dua lalat parental:

- Alel  $Vg$  untuk sayap normal (dominan).

- Alel *vg* untuk sayap vestigial (sayap pendek dan tidak berfungsi, resesif).

Persilangan antara dua lalat ini (*B Vg* // *b vg* × *b vg* // *b vg*) menghasilkan keturunan yang membawa gen-gen tertaut, sehingga fenotipe yang muncul lebih cenderung mengikuti kombinasi parental. Jika tidak ada pindah silang, hanya kombinasi fenotipe parental yang akan muncul.

Kombinasi parental:

- *B Vg* // *b vg* → tubuh abu-abu, sayap normal.
- *b vg* // *b vg* → tubuh hitam, sayap vestigial.

Namun, jika terjadi pindah silang, gen-gen tertaut dapat dipisahkan, dan keturunan yang memiliki kombinasi gen baru (rekombinan) dapat muncul. Fenotipe ini jarang karena tautan mengurangi kemungkinan pindah silang.

Kombinasi rekombinan (karena pindah silang):

- *B vg* // *b vg* → tubuh abu-abu, sayap vestigial.
- *b Vg* // *b vg* → tubuh hitam, sayap normal.

Dalam persilangan di mana gen-gen tertaut, rasio fenotipe yang dihasilkan biasanya menyimpang dari rasio Mendelian klasik 9:3:3:1 yang diharapkan dalam persilangan dihibrid. Misalnya, jika tidak ada pindah silang, fenotipe yang dihasilkan akan didominasi oleh kombinasi parental, sedangkan kombinasi rekombinan akan lebih sedikit.

Kombinasi parental:

- Tubuh abu-abu, sayap normal (*B Vg* // *b vg*): mayoritas keturunan.
- Tubuh hitam, sayap vestigial (*b vg* // *b vg*): mayoritas keturunan.

Kombinasi rekombinan (jika terjadi pindah silang):

- Tubuh abu-abu, sayap vestigial (*B vg* // *b vg*): minoritas keturunan.
- Tubuh hitam, sayap normal (*b Vg* // *b vg*): minoritas keturunan.

Rasio fenotipe yang dihasilkan lebih cenderung menjadi fenotipe parental dengan proporsi yang besar, misalnya 80% parental dan 20% rekombinan, tergantung pada seberapa dekat kedua gen tersebut berada di kromosom.

#### ▷ **Tautan Seks (Sex Linkage)**

Tautan seks (sex linkage) mengacu pada gen-gen yang terletak pada kromosom seks, khususnya kromosom X dan kromosom Y. Gen-gen yang terdapat pada kromosom seks cenderung menunjukkan pola pewarisan yang berbeda dari gen-gen yang terletak pada kromosom autosom (kromosom tubuh), karena mereka terikat dengan jenis kelamin individu.

Pada manusia dan banyak spesies lainnya, laki-laki memiliki kromosom seks XY, sedangkan perempuan memiliki kromosom seks XX. Karena laki-laki hanya memiliki satu kromosom X dan satu kromosom Y, mereka lebih rentan untuk menunjukkan sifat-sifat resesif yang tertaut pada kromosom X, karena tidak ada salinan gen kedua pada kromosom Y untuk menutupi alel yang resesif pada X.

Tautan Seks pada Lalat Buah (*Drosophila melanogaster*) adalah pewarisan sifat warna mata, yang tertaut pada kromosom X. Warna mata pada lalat buah adalah salah satu sifat klasik yang dipelajari oleh Thomas Hunt Morgan, yang menemukan bahwa gen yang mengendalikan warna mata berada di kromosom X.

Pada lalat buah, ada dua alel utama yang mengendalikan warna mata:

- Alel dominan ( $W^+$ ): Menghasilkan warna mata merah, yang merupakan warna mata normal (wild type).
- Alel resesif ( $w$ ): Menghasilkan warna mata putih.

Karena gen untuk warna mata terletak pada kromosom X, pola pewarisan sifat ini berbeda antara jantan (XY) dan betina (XX).

Mari kita lihat persilangan antara betina heterozigot ( $W^+w$ ) dengan jantan mata putih ( $wY$ ).

• **Genotipe Induk:**

- Betina:  $W^+w$  (mata merah, heterozigot).
- Jantan:  $wY$  (mata putih).

• **Gamet:**

- Betina ( $W^+w$ ) menghasilkan dua jenis gamet:  $W^+$  dan  $w$ .
- Jantan ( $wY$ ) menghasilkan dua jenis gamet:  $w$  dan  $Y$ .

**Tabel persilangan antara betina heterozigot dengan jantan mata putih**

$\text{♀/♂}$	$W^+ \text{ (betina)}$	$w \text{ (betina)}$
$w \text{ (jantan)}$	$W^+w$	$ww$
$Y \text{ (jantan)}$	$W^+Y$	$wY$

**Hasil Fenotipe:**

- $W^+w$  (Betina heterozigot, mata merah):  
Fenotipe: Betina mata merah, karena alel dominan  $W^+$  menutupi alel resesif  $w$ .
- $ww$  (Betina homozigot, mata putih):  
Fenotipe: Betina mata putih, karena kedua alel resesif  $w$  terekspresi.
- $W^+Y$  (Jantan, mata merah):  
Fenotipe: Jantan mata merah, karena ada alel dominan  $W^+$  pada kromosom X.
- $wY$  (Jantan, mata putih):  
Fenotipe: Jantan mata putih, karena tidak ada alel dominan pada kromosom X untuk menutupi alel resesif  $w$ .

**b. Pindah Silang (Crossing Over)**

Pindah silang (crossing-over) adalah proses genetik yang terjadi selama meiosis dimana kromosom homolog bertukar segmen DNA. Proses ini menghasilkan kombinasi genetik baru pada gamet (sel kelamin), yang memungkinkan terjadinya variasi genetik di antara keturunan. Pindah silang terjadi pada fase profase I meiosis saat kromosom homolog berpasangan dan saling bertukar bagian, menciptakan rekombinasi genetik. Pindah silang memiliki dampak penting pada pewarisan gen, terutama dalam kasus dimana gen-gen tertaut (terletak pada kromosom yang sama). Proses ini dapat memisahkan gen-gen yang tertaut, sehingga mereka tidak selalu diwariskan bersama. Akibatnya,

pindah silang menghasilkan kombinasi gen baru (rekombinan) yang tidak mirip dengan genotipe parental. Mekanisme pindah silang adalah sebagai berikut:

▷ **Pembentukan Kiasma**

mRNA Selama profase I meiosis, kromosom homolog (dua kromosom yang berasal dari orang tua yang berbeda) saling berpasangan melalui sinapsis, dan pada titik tertentu, mereka dapat saling bertukar segmen. Titik di mana pertukaran ini terjadi disebut kiasma (chiasma).

▷ **Pertukaran Segmen DNA**

Bagian dari kromatid dari satu kromosom homolog akan bertukar dengan bagian yang sesuai dari kromatid homolog lainnya. Ini menghasilkan kombinasi baru dari alel pada kromosom tersebut.

▷ **Gamen Rekombinan**

Setelah proses pindah silang selesai, gamet yang dihasilkan dari meiosis akan memiliki kombinasi genetik yang berbeda dari induk. Gamet ini disebut rekombinan. Rekombinasi ini penting dalam menciptakan variasi genetik yang lebih besar pada keturunan.

Pindah silang memiliki efek besar dalam memecah tautan genetik antara gen-gen yang terletak pada kromosom yang sama. Dalam kasus gen-gen tertaut, mereka cenderung diwariskan bersama karena berada di satu kromosom. Namun, pindah silang dapat

**c. Peta Kromosom**

Peta kromosom dibuat dengan menghitung frekuensi pindah silang antara dua atau lebih gen yang tertaut (berada pada kromosom yang sama). Untuk menentukan jarak di antara gen-gen tersebut, para ilmuwan mengamati rasio keturunan rekombinan (keturunan dengan kombinasi fenotipe baru yang dihasilkan dari pindah silang) dibandingkan dengan keturunan parental (keturunan yang menunjukkan kombinasi genotipe asli dari induk). Frekuensi pindah silang 1% setara dengan jarak 1 sentimorgan (cM) di peta genetik.

Frekuensi pindah silang antara dua gen dihitung sebagai:

$$\text{▷ Frekuensi Pindah Silang} = (\text{Jumlah Keturunan Rekombinan} : \text{Jumlah Total Keturunan}) \times 100$$

Misalkan dalam percobaan persilangan, ditemukan 1000 keturunan dan 150 di antaranya adalah rekombinan (yaitu, mereka memiliki kombinasi fenotipe yang tidak ditemukan pada salah satu induk).

Frekuensi pindah silang antara dua gen tersebut dihitung sebagai:

$$\text{▷ Frekuensi Pindah Silang} = (150 : 1000) \times 100 = 15\%$$

Ini berarti gen-gen tersebut dipisahkan oleh jarak 15 sentimorgan pada peta kromosom.

Dalam penelitian klasik oleh Thomas Hunt Morgan pada lalat buah (*Drosophila melanogaster*), peta kromosom dibuat berdasarkan frekuensi pindah silang antara gen-gen yang mengendalikan beberapa sifat, seperti warna tubuh dan bentuk sayap.

**Langkah-langkah Pembuatan Peta Kromosom**

▷ Gen yang diteliti:

- Gen A: Mengendalikan warna tubuh (abu-abu atau hitam).
- Gen B: Mengendalikan bentuk sayap (normal atau vestigial).
- Gen C: Mengendalikan warna mata (merah atau putih).

▷ Frekuensi pindah silang:

- A dan B: Frekuensi pindah silang 10%.
  - B dan C: Frekuensi pindah silang 5%.
  - A dan C: Frekuensi pindah silang 15%.
- ▷ Penyusun peta kromosom: berdasarkan frekuensi pindah silang, jarak genetik di antara gen-gen ini bisa ditentukan:
- A dan B: 10 cM terpisah.
  - B dan C: 5 cM terpisah.
  - A dan C: 15 cM terpisah.

Dari data di atas, peta kromosom dapat digambarkan sebagai berikut:

**A** ----- **10 cM** ----- **B** ----- **5 cM** ----- **C**

Dalam peta ini, gen A berjarak 10 sentimorgan dari gen B, dan gen C berjarak 5 sentimorgan dari gen B. Gen A dan C terletak paling jauh satu sama lain dengan jarak 15 sentimorgan.

#### d. Gagal Berpisah (*Nondisjunction*)

Peta Gagal berpisah atau *nondisjunction* adalah kesalahan dalam pembelahan sel, khususnya selama meiosis atau mitosis, di mana kromosom homolog atau kromatid tidak terpisah dengan benar ke dalam sel anak. Akibatnya, sel-sel yang dihasilkan memiliki jumlah kromosom yang tidak normal, yang disebut aneuploidi.

Kesalahan ini dapat terjadi selama meiosis I, ketika kromosom homolog tidak berpisah, atau selama meiosis II atau mitosis, ketika kromatid tidak berpisah dengan benar. Gagal berpisah bisa menyebabkan berbagai kelainan genetik pada keturunan, termasuk sindrom Down, sindrom Turner, dan sindrom Klinefelter.

Sindrom Down adalah contoh paling umum dari kelainan kromosom akibat gagal berpisah. Ini disebabkan oleh adanya tiga salinan kromosom 21 di dalam sel (trisomi 21). Gagal berpisah pada meiosis I atau II menyebabkan gamet (sperma atau sel telur) memiliki dua salinan kromosom 21, yang setelah pembuahan, menghasilkan individu dengan 47 kromosom (bukannya 46). Ciri khas sindrom Down meliputi keterlambatan perkembangan fisik dan mental, ciri wajah yang khas, serta masalah kesehatan seperti kelainan jantung.

### Penentuan Jenis Kelamin (Determinasi Seks)

Pada tahun 1902, McClung memperkenalkan gagasan bahwa kromosom khusus (yang kini kita kenal sebagai kromosom seks) memainkan peran penting dalam penentuan jenis kelamin pada organisme. Kontribusi penting McClung terletak pada pengamatannya terhadap kromosom X, yang kemudian diidentifikasi sebagai faktor utama dalam penentuan jenis kelamin pada banyak spesies.

McClung mengemukakan bahwa jenis kelamin suatu individu ditentukan oleh kombinasi kromosom tertentu yang diwariskan dari kedua orang tua. Teori ini menyatakan bahwa organisme memiliki kromosom seks yang menentukan apakah individu tersebut akan menjadi jantan atau betina. Secara umum, penentuan jenis kelamin menurut McClung berdasarkan kromosom X dan



kemudian, dengan pengembangan lebih lanjut, ditemukan pula adanya kromosom Y.

#### a. Penentuan Jenis Kelamin pada Hewan

Penelitian McClung awalnya dilakukan pada serangga, khususnya belalang, di mana dia menemukan bahwa salah satu pasangan kromosom terlihat berbeda antara jantan dan betina. Berdasarkan pengamatan ini, McClung menyimpulkan bahwa kromosom yang berbeda tersebut terkait dengan jenis kelamin, dan ia menyebutnya sebagai kromosom aksesoris, yang kemudian diidentifikasi sebagai kromosom X.

##### ▷ Tipe X/A

Sistem penentuan jenis kelamin X/A (juga dikenal sebagai rasio X terhadap autosom) didasarkan pada perbandingan jumlah kromosom X dengan jumlah set kromosom autosom (A) dalam sel. Sistem ini ditemukan pada serangga, seperti lalat buah (*Drosophila melanogaster*), dan beberapa spesies lainnya. Penentuan jenis kelamin tipe X/A seperti berikut:

- Rasio X/A = 1, individu menjadi betina.
- Rasio X/A < 1, individu menjadi jantan.

Contoh pada Lalat Buah (*Drosophila melanogaster*):

- Betina memiliki dua kromosom X dan dua set autosom (XX, 2A), sehingga rasio X/A = 1 → betina.
- Jantan memiliki satu kromosom X dan dua set autosom (X, 2A), sehingga rasio X/A = 0,5 → jantan.

##### ▷ Tipe X/O

Dalam sistem XX-XO, penentuan jenis kelamin ditentukan oleh kehadiran atau ketiadaan kromosom X. Sistem ini ditemukan pada beberapa serangga, seperti belalang. Penentuan jenis kelamin tipe X/O seperti berikut:

- Betina memiliki dua kromosom X (XX), sedangkan jantan hanya memiliki satu kromosom X (XO), dan tidak ada kromosom Y. Di sini, kromosom O berarti tidak adanya kromosom seks kedua (tidak ada Y)

Contoh pada belalang:

- Betina: XX → betina normal dengan dua kromosom X.
- Jantan: XO → jantan dengan satu kromosom X dan tidak ada kromosom Y.

Sistem ini berbeda dari sistem XY karena tidak ada kromosom Y. Penentuan jenis kelamin didasarkan pada jumlah kromosom X yang dimiliki, di mana dua kromosom X menghasilkan betina, dan satu kromosom X tanpa pasangan Y menghasilkan jantan.

##### ▷ Tipe ZW

Sistem ZW adalah kebalikan dari sistem XY pada manusia. Sistem ini ditemukan pada burung, beberapa reptil, ikan, dan kupu-kupu. Dalam sistem ZW, betina adalah heterogamet (memiliki dua kromosom seks yang berbeda, ZW), sedangkan jantan adalah homogamet (memiliki dua kromosom Z, ZZ). Penentuan jenis kelamin tipe ZW seperti berikut:

- Betina: ZW, di mana betina memiliki satu kromosom Z dan satu kromosom W.
- Jantan: ZZ, di mana jantan memiliki dua kromosom Z.

Contoh pada burung:

- Betina pada burung (misalnya ayam) memiliki ZW sebagai kromosom seks.
- Jantan memiliki ZZ sebagai kromosom seks.

Kromosom W adalah penentu betina dalam sistem ini, sedangkan kromosom Z adalah yang lebih besar dan membawa lebih banyak gen, mirip dengan kromosom X pada sistem XY

▷ **Tipe Haploid-Diploid**

Sistem haploid diploid ditemukan pada serangga sosial, seperti lebah, tawon, dan semut. Dalam sistem ini, jenis kelamin ditentukan oleh jumlah set kromosom, atau ploidy individu. Jantan berkembang dari telur yang tidak dibuahi dan bersifat haploid (memiliki satu set kromosom), sedangkan betina berkembang dari telur yang dibuahi dan bersifat diploid (memiliki dua set kromosom). Penentuan jenis kelamin tipe haploid-diploid seperti berikut:

- Jantan adalah haploid ( $n$ ), yang berarti mereka hanya memiliki satu set kromosom yang berasal dari ibu.
- Betina adalah diploid ( $2n$ ), yang berarti mereka memiliki dua set kromosom, satu dari ibu dan satu dari ayah.

Contoh pada lebah madu:

- Ratu lebah menghasilkan telur. Jika telur tidak dibuahi, telur tersebut akan berkembang menjadi jantan haploid (drone,  $n$ ).
- Jika telur dibuahi oleh sperma jantan, telur tersebut akan berkembang menjadi betina diploid (pekerja atau ratu,  $2n$ ).

Sistem haploid-diploid juga mempengaruhi perilaku sosial pada koloni lebah, di mana ratu dan pekerja betina adalah diploid dan memiliki peran dalam koloni, sedangkan jantan hanya berfungsi untuk reproduksi.

**b. Penentuan Jenis Kelamin pada Tumbuhan**

Beberapa tumbuhan menggunakan mekanisme penentuan jenis kelamin genetik, mirip dengan sistem penentuan jenis kelamin pada hewan yang memiliki kromosom seks spesifik (misalnya, sistem XY atau ZW).

▷ **Sistem XY**

Sistem penentuan jenis kelamin X/A (juga dikenal sebagai rasio X terhadap autosom) didasarkan pada perbandingan jumlah kromosom X dengan jumlah set kromosom autosom (A) dalam sel. Sistem ini ditemukan pada serangga, seperti lalat buah (*Drosophila melanogaster*), dan beberapa spesies lainnya. Pada beberapa spesies tumbuhan, jenis kelamin ditentukan secara genetik menggunakan sistem XY, di mana jantan memiliki kromosom XY dan betina memiliki kromosom XX. Penentuan jenis kelamin sistem XY pada tumbuhan seperti berikut:

Pada beberapa spesies tumbuhan, jenis kelamin ditentukan secara genetik menggunakan sistem XY, di mana jantan memiliki kromosom XY dan betina memiliki kromosom XX.

▷ **Sistem ZW**

Beberapa tumbuhan lain menggunakan sistem ZW, di mana betina memiliki kromosom ZW dan jantan memiliki kromosom ZZ. Pada beberapa spesies tanaman seperti rumput atau lumut, sistem ZW terlibat dalam penentuan jenis kelamin, meskipun sistem ini jarang pada tumbuhan berbunga.



### Rahasia Genetik: Kakek Bisa 'Hidup' Lagi Lewat Cucu

Pernah dengar orang bilang, "Wah, wajah cucunya mirip sekali dengan kakeknya!"? Itu bukan sekadar omongan. Secara genetik, memang bisa terjadi!

Sifat yang tidak muncul pada orang tua bisa "muncul kembali" di generasi cucu, karena gen resesif bisa tersembunyi dan diturunkan diam-diam dari satu generasi ke generasi berikutnya.

Jadi, bisa saja kamu punya lesung pipi atau warna rambut yang sama persis dengan kakek-nenekmu, walau orang tuamu tidak memiliki sifat-sifat tersebut.



### Contoh Soal

Apa yang dimaksud dengan Hukum Mendel I dan bagaimana hukum ini menjelaskan kemunculan kembali sifat resesif pada generasi F2?

#### Jawaban:

Hukum Mendel I atau Hukum Segregasi menyatakan bahwa pasangan alel akan dipisahkan secara acak ke dalam gamet saat pembentukan sel kelamin. Hukum ini menjelaskan bahwa setiap individu mewarisi satu alel dari masing-masing orang tua. Sifat resesif muncul kembali pada generasi F2 karena kombinasi alel resesif dari kedua orang tua dapat bertemu kembali dan diekspresikan.

#### Pembahasan:

Pada persilangan antara dua individu heterozigot (Aa × Aa), genotipe F1 adalah Aa (dominan), tetapi pada F2 kombinasi alel dapat menghasilkan AA, Aa, dan aa. Individu dengan genotipe aa akan mengekspresikan sifat resesif. Inilah sebabnya mengapa sifat yang sempat "menghilang" pada F1 bisa muncul kembali pada F2 dalam rasio 3:1.

### Kegiatan Kelompok 1

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan belajar untuk memahami prinsip Hukum Mendel I (Segregasi) dan Hukum Mendel II (Asosiasi Bebas), melatih keterampilan menganalisis hasil persilangan genetik sederhana dan menghubungkan teori pewarisan sifat dengan simulasi konkret.

1. Buatlah kelompok yang terdiri dari 4 orang, lalu siapkan alat dan bahan berikut:

- ▷ Manik-manik, kancing, atau kertas berwarna dua jenis:
  - Warna/Simbol A = alel dominan
  - Warna/Simbol a = alel resesif
- ▷ Kertas pengamatan
- ▷ Pulpen/pensil
- ▷ Kalkulator sederhana (opsional)

Simulasi Penyilangan Hybrid (1 Sifat):

2. Tentukan sifat yang akan disimulasikan (contoh: warna bunga, tinggi tanaman), misalkan:

- ▷ A = alel dominan (bunga merah)
  - ▷ a = alel resesif (bunga putih)
3. Setiap anggota kelompok mengambil dua manik/kertas secara acak untuk melambangkan gamet dari induk.
  4. Catat kombinasi genotipe hasil penyilangan (AA, Aa, aa).
  5. Ulangi hingga terkumpul minimal 20 data hasil penyilangan, lalu hitung rasio fenotipe dan genotipe yang dihasilkan.

Simulasi Penyilangan Dihibrid (2 sifat):

6. Pilih dua sifat, contoh:
  - ▷ Warna bunga (A = merah, a = putih)
  - ▷ Bentuk daun (B = bulat, b = lonjong)
7. Lakukan simulasi penyilangan antar dua individu heterozigot ( $AaBb \times AaBb$ ).
8. Catat kombinasi genotipe dan fenotipe yang dihasilkan.
9. Hitung rasio fenotipe sesuai Hukum Mendel II.
10. Diskusikan hasil analisismu, dan bandingkan hasil simulasi dengan rasio fenotipe teoritis (contoh: monohibrid 3:1, dihibrid 9:3:3:1).
  - ▷ Apakah ada perbedaan antara hasil simulasi dan teori? Mengapa bisa terjadi?
  - ▷ Apa yang dimaksud dengan penyimpangan semu Hukum Mendel?
  - ▷ Bagaimana simulasi ini membantu memahami pola pewarisan sifat?



### 3. Hereditas Manusia: Sifat-sifat yang Kita Warisi

Hereditas atau pewarisan sifat pada manusia mempelajari bagaimana sifat-sifat genetik diturunkan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Sifat-sifat tersebut bisa berupa sifat fisik seperti warna mata, bentuk rambut, dan tinggi badan, serta sifat yang lebih kompleks seperti golongan darah atau kecenderungan terhadap penyakit tertentu. Dalam hereditas, informasi genetik yang tersimpan dalam DNA diwariskan melalui gen yang terletak pada kromosom. Pola-pola hereditas manusia sering kali mengikuti hukum Mendel, namun ada variasi dalam pewarisan genetik manusia yang melibatkan interaksi gen, mutasi, dan lingkungan.

#### Variasi Sifat pada Manusia

Variasi sifat pada manusia disebabkan oleh kombinasi genetik dan lingkungan. Setiap individu memiliki kombinasi unik dari alel-alel yang diwariskan dari orang tua mereka, yang menghasilkan variasi dalam sifat-sifat seperti warna rambut, warna mata, dan bentuk tubuh. Variasi sifat ini membantu meningkatkan keragaman genetik dalam populasi manusia. Berikut merupakan sifat-sifat genetik yang umum:



##### a. Warna Mata

Warna mata pada manusia diwariskan melalui gen-gen yang kompleks, dengan alel dominan untuk mata coklat dan alel resesif untuk mata biru atau hijau. Namun, pewarisan warna mata melibatkan lebih dari satu gen, yang menghasilkan variasi warna yang lebih besar.

##### b. Warna Rambut

Warna rambut juga diwariskan melalui berbagai gen. Alel dominan menghasilkan warna rambut yang lebih gelap (seperti hitam dan coklat), sementara alel resesif menghasilkan rambut yang lebih terang (seperti pirang atau merah).

##### c. Golongan Darah

Golongan darah pada manusia ditentukan oleh sistem golongan darah ABO dan faktor Rhesus (Rh). Sistem ABO memiliki tiga alel utama: A, B, dan O, dengan alel A dan B bersifat kodominan, sementara alel O bersifat resesif.

##### d. Tinggi Badan

Tinggi badan adalah sifat poligenik, yang berarti banyak gen yang berkontribusi terhadap variasi tinggi badan. Selain itu, faktor lingkungan, seperti nutrisi, juga mempengaruhi tinggi badan seseorang.

##### e. Sidik Jari

Sidik jari juga merupakan hasil pewarisan genetik, tetapi pola detail sidik jari berbeda untuk setiap individu, bahkan untuk anak kembar identik. Hal ini menunjukkan kombinasi pengaruh genetik dan lingkungan.

## Silsilah Keluarga (Pedigree)

Pedigree adalah diagram atau silsilah keluarga yang digunakan untuk melacak pewarisan sifat-sifat genetik dalam suatu keluarga selama beberapa generasi. Pedigree sangat berguna untuk memahami pola pewarisan sifat-sifat tertentu, termasuk penyakit genetik, serta untuk mengidentifikasi apakah sifat tersebut dominan, resesif, atau terkait kromosom seks.

### Simbol Pedigree

- ▷ **Lingkaran:** Mewakili individu perempuan.
- ▷ **Persegi:** Mewakili individu laki-laki.
- ▷ **Lingkaran atau persegi yang diwarnai penuh:** Menunjukkan individu yang mengekspresikan sifat tertentu atau memiliki penyakit genetik.
- ▷ **Lingkaran atau persegi yang setengah berwarna:** Menunjukkan pembawa sifat (carrier) dalam pewarisan resesif.
- ▷ **Garis horizontal:** Menghubungkan pasangan suami-istri atau individu yang memiliki anak bersama.
- ▷ **Garis vertikal:** Menghubungkan orang tua dengan anak-anak mereka.

## Penentuan Jenis Kelamin pada Manusia

Pada manusia, penentuan jenis kelamin secara genetik mengikuti sistem XY, di mana jenis kelamin ditentukan oleh kombinasi kromosom seks yang diwariskan dari kedua orang tua. Setiap manusia normal memiliki 23 pasang kromosom dalam setiap sel tubuhnya, terdiri dari 22 pasang kromosom autosom dan 1 pasang kromosom seks. Pasangan kromosom seks ini menentukan apakah individu akan menjadi laki-laki atau perempuan. Kromosom XX menentukan jenis kelamin perempuan dan XY laki-laki.

Jenis kelamin manusia ditentukan selama proses fertilisasi, yaitu ketika sel telur dan sperma bersatu untuk membentuk zigot. Sel telur selalu membawa kromosom X, sementara sperma dapat membawa kromosom X atau kromosom Y. Oleh karena itu, jenis kelamin anak ditentukan oleh jenis kromosom seks yang dibawa oleh sperma.

### Teori Kemungkinan Jenis Kelamin

Teori kemungkinan jenis kelamin menyatakan bahwa setiap pembuahan memiliki peluang yang sama untuk menghasilkan anak laki-laki atau perempuan. Karena sperma membawa dua jenis kromosom seks (X atau Y) secara acak, peluang untuk menghasilkan anak laki-laki atau perempuan adalah 50:50. Rumus teori kemungkinan.

$$(l + p)^n$$

- ▷  $l$  = kemungkinan lahir anak laki-laki = 50%
- ▷  $p$  = kemungkinan lahir anak perempuan = 50%
- ▷  $n$  = jumlah anak yang diharapkan

Penentuan rumus teori kemungkinan jenis kelamin adalah:"

- ▷ Asumsi anak yang diharapkan 1, maka  $(l + p)^1 = l + p$
- ▷ Asumsi anak yang diharapkan 2, maka  $(l + p)^2 = l^2 + 2lp + p^2$

## Golongan Darah

Golongan darah ditentukan oleh adanya antigen spesifik pada permukaan sel darah merah, yang diwariskan secara genetik. Antigen-antigen ini memainkan peran penting dalam transfusi darah dan penolakan imunologis. Sistem golongan darah yang paling dikenal adalah sistem ABO, sistem MN, dan sistem Rhesus (Rh). Golongan darah setiap individu ditentukan oleh kombinasi alel yang diwarisi dari kedua orang tua.

### a. Golongan Darah ABO

Sistem ABO adalah sistem golongan darah yang paling umum dan penting dalam klinis. Golongan darah dalam sistem ini ditentukan oleh kehadiran atau ketiadaan antigen A dan B pada permukaan sel darah merah.

Berikut adalah tabel penggolongan darah sistem ABO yang menunjukkan genotipe, fenotipe (golongan darah), dan antigen serta antibodi yang dimiliki oleh masing-masing golongan darah.

**Tabel penggolongan darah sistem ABO**

Golongan Darah (Fenotipe)	Genotipe	Antigen pada Sel Darah	Antibodi dalam Plasma
A	I <sup>A</sup> I <sup>A</sup>	Antigen A	Antibodi anti-B
B	I <sup>B</sup> I <sup>B</sup>	Antigen B	Antibodi anti-A
AB	I <sup>A</sup> I <sup>B</sup>	Antigen A dan B	Tidak ada antibodi inti-A atau anti-B
O	I <sup>O</sup> I <sup>O</sup>	Tidak ada antigen A atau B	Antibodi anti-A dan anti-B

- ▷ Golongan darah A memiliki antigen A pada sel darah merah dan antibodi anti-B dalam plasma.
- ▷ Golongan darah B memiliki antigen B pada sel darah merah dan antibodi anti-A dalam plasma.
- ▷ Golongan darah AB memiliki kedua antigen A dan B, tetapi tidak memiliki antibodi anti-A atau anti-B, sehingga bisa menerima darah dari semua golongan (penerima universal).
- ▷ Golongan darah O tidak memiliki antigen A atau B, tetapi memiliki antibodi anti-A dan anti-B, sehingga bisa mendonorkan darah ke semua golongan (donor universal).

### b. Golongan Darah Sistem MN

Sistem MN adalah sistem golongan darah yang lebih sederhana dan tidak memiliki pengaruh besar dalam transfusi darah. Sistem ini melibatkan dua antigen, M dan N, yang juga terletak di permukaan sel darah merah. Sistem ini dikontrol oleh satu gen dengan dua alel: L<sup>M</sup> dan L<sup>N</sup>, yang bersifat kodominan. Tabel penggolongan darah sistem MN, yang menunjukkan genotipe dan fenotipe (golongan darah MN) berdasarkan kombinasi alel L<sup>M</sup> dan L<sup>N</sup>:

**Tabel penggolongan darah sistem MN**

Golongan Darah (Fenotipe)	Genotipe	Antigen pada Sel Darah Merah
M	L <sup>M</sup> L <sup>M</sup>	Antigen M
N	L <sup>N</sup> L <sup>N</sup>	Antigen N
MN	L <sup>M</sup> L <sup>N</sup>	Antigen M dan N

- ▷ Golongan darah M memiliki antigen M pada sel darah merah dengan genotipe  $L^M L^M$ .
- ▷ Golongan darah N memiliki antigen N pada sel darah merah dengan genotipe  $L^N L^N$ .
- ▷ Golongan darah MN memiliki kedua antigen M dan N pada sel darah merah, dengan genotipe  $L^M L^N$ . Ini menunjukkan bahwa alel  $L^M$  dan  $L^N$  bersifat kodominan, sehingga keduanya diekspresikan bersamaan pada individu dengan genotipe heterozigot.

#### c. Golongan Darah Sistem Rhesus

Sistem Rhesus (Rh), atau dikenal sebagai faktor Rh, menentukan apakah seseorang memiliki antigen Rh pada sel darah merahnya. Golongan darah Rh sangat penting dalam transfusi darah dan selama kehamilan, karena adanya ketidakcocokan Rh antara ibu dan janin dapat menyebabkan komplikasi medis yang serius. Tabel penggolongan darah sistem Rhesus (Rh), yang menunjukkan genotipe dan fenotipe (golongan darah Rh) berdasarkan ada atau tidaknya antigen D pada sel darah merah:

**Tabel penggolongan darah sistem rhesus**

Golongan Darah (Fenotipe)	Genotipe	Antigen pada Sel Darah Merah
Rh Positif ( $Rh^+$ )	DD atau Dd	Antigen D
Rh Negatif ( $Rh^-$ )	dd	Tidak ada antigen D

- ▷ Rh Positif ( $Rh^+$ ): Individu dengan genotipe DD atau Dd memiliki antigen D pada sel darah merah. Orang dengan  $Rh^+$  bisa menerima darah dari  $Rh^-$ , tetapi orang  $Rh^-$  tidak bisa menerima darah  $Rh^+$  tanpa risiko reaksi imun.
- ▷ Rh Negatif ( $Rh^-$ ): Individu dengan genotipe dd tidak memiliki antigen D pada sel darah merah. Mereka hanya bisa menerima darah dari sesama  $Rh^-$  untuk mencegah produksi antibodi anti-Rh yang bisa menyerang antigen D dalam darah donor.

### Kelainan dan Penyakit Genetik pada Manusia

Kelainan dan penyakit genetik pada manusia sering kali disebabkan oleh mutasi atau perubahan pada gen yang diwariskan dari orang tua. Beberapa kelainan ini diturunkan melalui alel yang tertaut pada autosom (kromosom non-seks), sementara yang lain bisa diturunkan melalui kromosom seks. Penyakit-penyakit ini dapat diwariskan secara dominan atau resesif, tergantung pada sifat alel yang terlibat.

#### a. Kelainan dan Penyakit Menurun oleh Alel yang Tertaut pada Autosom

Kelainan genetik yang diturunkan melalui alel tertaut pada autosom melibatkan gen-gen yang terdapat pada kromosom autosom (kromosom non-seks, yaitu kromosom 1 sampai 22). Kelainan ini bisa bersifat dominan atau resesif, tergantung pada cara pewarisan alelnya.

##### ▷ Kelainan yang disebabkan oleh alel dominan autosom

Dalam pewarisan autosomal dominan, hanya diperlukan satu alel dominan untuk menyebabkan penyakit atau kelainan. Jika salah satu orang tua memiliki alel dominan yang cacat, ada 50% kemungkinan anak akan mewarisi kelainan tersebut, meskipun anak-anak bisa juga sehat jika tidak mewarisi alel dominan yang cacat.

###### • Polidaktili

Polidaktili adalah kelainan genetik yang ditandai dengan jumlah jari tangan atau kaki yang berlebih. Seseorang dengan kondisi ini dapat memiliki jari tambahan yang berkembang di tangan atau kaki. Kelainan ini diwariskan melalui pola autosom dominan, yang berarti hanya

diperlukan satu alel dominan yang cacat untuk menyebabkan kondisi ini. Seseorang dengan genotipe  $Pp$  (di mana  $P$  adalah alel dominan yang menyebabkan polidaktili) akan memiliki kondisi ini, sedangkan genotipe  $pp$  tidak akan menunjukkan gejala.

- **Brakidaktili**

Brakidaktili adalah kelainan genetik yang ditandai dengan jari-jari atau tulang tangan dan kaki yang lebih pendek dari normal. Kelainan ini juga diwariskan melalui pola autosom dominan. Brakidaktili dapat memengaruhi jari atau kaki, tergantung pada gen yang terlibat. Seseorang dengan genotipe  $Bb$  (di mana  $B$  adalah alel dominan yang menyebabkan brakidaktili) akan menunjukkan gejala, sementara  $bb$  akan normal.

- **Sindaktili**



Kaki seorang anak dengan kelainan Sindaktili – Canva Studio

Sindaktili adalah kelainan genetik yang menyebabkan fusi atau keterikatan jari-jari tangan atau kaki. Jari-jari yang terkena sindaktili mungkin terhubung oleh kulit atau bahkan oleh tulang. Sindaktili juga diwariskan melalui pola autosom dominan. Seseorang dengan genotipe  $SdSd$  atau  $Sdsd$  (di mana  $Sd$  adalah alel dominan yang menyebabkan sindaktili) akan menunjukkan kondisi ini.

- **Huntington**

Penyakit Huntington adalah kelainan genetik neurodegeneratif yang menyebabkan kerusakan progresif pada otak. Penyakit ini diwariskan melalui pola autosom dominan, yang berarti seseorang hanya membutuhkan satu alel dominan untuk terkena penyakit ini. Huntington biasanya dimulai pada usia pertengahan (30-50 tahun) dan menyebabkan kemunduran fungsi fisik dan mental. Seseorang dengan genotipe  $Hh$  (di mana  $H$  adalah alel dominan yang menyebabkan Huntington) akan terkena penyakit, sementara  $hh$  berarti orang tersebut tidak memiliki risiko terkena Huntington.

- **Akondroplasia**

Akondroplasia adalah kelainan genetik yang menyebabkan pertumbuhan tulang abnormal, yang mengakibatkan dwarfisme atau tubuh pendek. Ini adalah penyebab paling umum dari dwarfisme dan diwariskan melalui pola autosom dominan. Seseorang dengan genotipe  $Aa$  (di mana  $A$  adalah alel dominan yang menyebabkan akondroplasia) akan memiliki kondisi ini, sementara  $aa$  tidak akan terpengaruh. Genotipe  $AA$  biasanya letal, yang berarti embrio dengan dua alel dominan tidak dapat bertahan hidup.

- **Tilosis**

Tilosis, atau dikenal sebagai keratoderma palmaris et plantaris, adalah kelainan genetik yang menyebabkan penebalan kulit pada telapak tangan dan telapak kaki. Tilosis diwariskan melalui pola autosom dominan, di mana satu salinan alel yang cacat sudah cukup untuk menyebabkan kondisi ini. Seseorang dengan genotipe  $Tt$  (di mana  $T$  adalah alel dominan yang menyebabkan tilosis) akan mengalami kondisi ini, sementara  $tt$  menunjukkan kulit normal.

- **Sindrom Marfan**

Sindrom Marfan adalah kelainan genetik yang memengaruhi jaringan ikat tubuh, terutama pada jantung, pembuluh darah, mata, dan tulang. Sindrom ini diwariskan secara autosomal dominan dan disebabkan oleh mutasi pada gen *FBN1* yang mengontrol protein fibrillin-1, komponen penting jaringan ikat. Seseorang dengan  $Mm$  (di mana  $M$  adalah alel dominan yang menyebabkan Marfan) akan mengalami kondisi ini, sementara  $mm$  berarti tidak terpengaruh.

- **Sindrom ACHOO (Refleks Sneeze Herediter)**

Sindrom ACHOO (Autosomal Dominant Compelling Helio-Ophthalmic Outburst) adalah kelainan genetik yang menyebabkan seseorang bersin ketika terpapar cahaya terang, terutama sinar matahari. Kelainan ini diwariskan melalui pola autosomal dominan. Genotipe  $Aa$  (dengan  $A$  sebagai alel dominan) menyebabkan sindrom ini, sementara  $aa$  menunjukkan individu tanpa refleks bersin terhadap cahaya.

- **Hipertensi**

Hipertensi, atau tekanan darah tinggi, adalah kondisi yang dapat diwariskan dan menyebabkan peningkatan tekanan darah secara kronis. Meskipun hipertensi sering dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti pola makan dan gaya hidup, ada bentuk hipertensi herediter yang diwariskan melalui pola autosomal dominan. Seseorang dengan  $Hh$  (di mana  $H$  adalah alel dominan) cenderung memiliki risiko hipertensi herediter, sementara  $hh$  menunjukkan tekanan darah normal.



- **Dentinogenesis Imperfecta**

Dentinogenesis Imperfecta adalah kelainan genetik yang memengaruhi pembentukan gigi, menyebabkan gigi menjadi rapuh, transparan, dan lebih rentan terhadap kerusakan. Kelainan ini diwariskan secara autosomal dominan dan memengaruhi dentin, bagian dalam gigi yang berada di bawah enamel. Seseorang dengan  $Dd$  (di mana  $D$  adalah alel dominan yang menyebabkan dentinogenesis imperfecta) akan menunjukkan kondisi ini, sementara  $dd$  menunjukkan gigi normal.

- **Anonikia**

Anonikia adalah kelainan genetik yang menyebabkan tidak adanya kuku di jari tangan atau kaki. Ini adalah kondisi yang sangat langka dan diwariskan melalui pola autosomal dominan. Genotipe  $Aa$  (dengan  $A$  sebagai alel dominan) akan menyebabkan anonikia, sementara  $aa$  berarti kuku berkembang secara normal.

▷ **Kelainan yang disebabkan oleh alel semidominan autosomal**

Alel semidominan adalah alel yang menunjukkan dominansi sebagian (incomplete dominance). Dalam kasus alel semidominan autosomal, individu heterozigot menunjukkan fenotipe yang lebih ringan dibandingkan individu homozigot. Kelainan genetik yang disebabkan oleh alel semidominan autosomal biasanya menghasilkan spektrum gejala, di mana individu heterozigot memiliki bentuk gejala yang lebih ringan daripada individu homozigot.

**Sistinuria**

Sistinuria adalah kelainan metabolismik yang disebabkan oleh gangguan transportasi asam amino sistin di ginjal dan usus. Hal ini menyebabkan penumpukan sistin dalam urin, yang dapat membentuk batu ginjal (kalkuli) yang menyakitkan. Sistinuria diwariskan melalui pola autosomal semidominan. Sistinuria terjadi karena mutasi pada gen SLC3A1 atau SLC7A9, yang mengatur transportasi sistin. Orang dengan genotipe SS (homozigot) memiliki gejala yang lebih parah, sedangkan individu Ss (heterozigot) biasanya memiliki gejala yang ringan atau tidak ada gejala sama sekali.

▷ **Kelainan yang disebabkan oleh alel resesif autosomal**

Kelainan genetik yang disebabkan oleh alel resesif autosomal memerlukan dua alel resesif (satu dari masing-masing orang tua) untuk mengekspresikan penyakit atau kelainan. Orang dengan satu alel resesif dan satu alel normal (heterozigot) disebut carrier atau pembawa, tetapi mereka tidak menunjukkan gejala. Penyakit atau kelainan hanya muncul jika seseorang mewarisi dua alel resesif (homozigot) dari kedua orang tua.

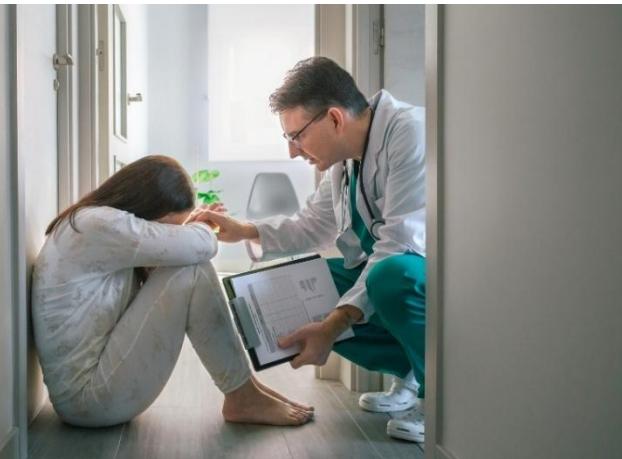
• **Albino**

Albinisme adalah kelainan genetik yang mempengaruhi produksi melanin, pigmen yang memberi warna pada kulit, rambut, dan mata. Albinisme diwariskan melalui pola autosomal resesif, yang berarti seseorang harus mewarisi dua alel resesif dari kedua orang tua untuk menunjukkan gejala albinisme. Albinisme disebabkan oleh mutasi pada salah satu dari beberapa gen yang mengontrol produksi melanin, seperti gen TYR (tyrosinase). Genotipe yang mungkin adalah sebagai berikut: SS adalah kelainan metabolismik yang disebabkan oleh gangguan transportasi asam amino sistin di ginjal dan usus. Hal ini menyebabkan penumpukan sistin dalam urin, yang dapat membentuk batu ginjal (kalkuli) yang menyakitkan. Sistinuria diwariskan melalui pola autosomal semidominan. Sistinuria terjadi karena mutasi pada gen SLC3A1 atau SLC7A9, yang mengatur transportasi sistin. Orang dengan genotipe SS (homozigot) memiliki gejala yang lebih parah, sedangkan individu Ss (heterozigot) biasanya memiliki gejala yang ringan atau tidak ada gejala sama sekali.

- Genotipe aa (homozigot resesif): Individu dengan albinisme. Mereka mewarisi dua alel resesif yang mencegah produksi melanin.
- Genotipe Aa (heterozigot): Carrier atau pembawa, tidak menunjukkan gejala albinisme tetapi bisa menurunkan alel resesif kepada keturunan.
- Genotipe AA (homozigot dominan): Individu dengan pigmen normal.



- **Gangguan Mental**



Beberapa gangguan mental dapat diwariskan melalui pola autosomal resesif, di mana mutasi genetik memengaruhi fungsi otak. Gangguan mental genetik ini biasanya terjadi karena mutasi pada gen yang berhubungan dengan perkembangan saraf.

- Genotipe aa (homozigot resesif): Menunjukkan gelaja gangguan mental akibat mutasi genetik.
- Genotipe Aa (heterozigot): *Carrier* atau pembawa tanpa gejala.

- **Siklemia**

Siklemia, atau anemia sel sabit, adalah kelainan darah genetik yang disebabkan oleh mutasi pada gen HBB, yang mengkode hemoglobin. Penyakit ini menyebabkan sel darah merah berbentuk sabit yang mudah pecah, menurunkan kemampuan darah untuk mengangkut oksigen. Rupa gangguan mental dapat diwariskan melalui pola autosomal resesif, di mana mutasi genetik.

- Genotipe ss (homozigot resesif): Menunjukkan gelaja penyakit sel sabit.
- Genotipe Ss (heterozigot): *Carrier* dengan bentuk ringan (parsial)

- **Xeroderma Pigmentosum**

Xeroderma Pigmentosum (XP) adalah kelainan genetik yang mengakibatkan kepekaan ekstrem terhadap sinar UV. Mutasi pada gen yang memperbaiki kerusakan DNA akibat radiasi UV menyebabkan akumulasi mutasi yang tidak diperbaiki, sehingga meningkatkan risiko kanker kulit.

- Genotipe aa (homozigot resesif): Individu yang terkena XP.
- Genotipe Aa (heterozigot): Tidak terpengaruh tetapi bisa menunjukkan alel resesif.

- **Galaktosemia**

Galaktosemia adalah kelainan metabolismik di mana tubuh tidak mampu memecah galaktosa, gula yang ditemukan dalam susu. Mutasi pada gen GALT menyebabkan defisiensi enzim yang memetabolisme galaktosa, yang berakibat penumpukan galaktosa dalam darah dan menyebabkan kerusakan organ.

- Genotipe gg (homozigot resesif): Individu yang terkena galaktosemia.
- Genotipe Gg (heterozigot): Pembawa tanpa gejala.

- **Fibrosis Sistik**

Fibrosis Sistik adalah kelainan genetik yang mempengaruhi kelenjar eksokrin, menghasilkan lendir yang kental dan lengket yang menumpuk di paru-paru dan organ lainnya. Penyakit ini disebabkan oleh mutasi pada gen CFTR.

- Genotipe ff (homozigot resesif): Menunjukkan gejala fibrosis sistik.
- Genotipe Ff (heterozigot): Carrier tanpa gejala.

- **Talasemia**

Talasemia adalah kelainan darah yang menyebabkan produksi hemoglobin abnormal. Penyakit ini dibagi menjadi talasemia alfa dan talasemia beta, tergantung pada bagian gen hemoglobin yang terpengaruh.

- Genotipe tt (homozigot resesif): Menunjukkan gejala talasemia mayor.
- Genotipe Ff (heterozigot): Menunjukkan gejala ringan talasemia minor.

**b. Kelainan dan Penyakit Menurun oleh Alel yang Tertaut pada Kromosom Kelamin**

Kelainan genetik yang diturunkan melalui alel tertaut pada kromosom kelamin biasanya berhubungan dengan kromosom X dan Y. Pada manusia, perempuan memiliki dua kromosom X (XX), sedangkan laki-laki memiliki satu kromosom X dan satu kromosom Y (XY). Karena laki-laki hanya memiliki satu kromosom X, mereka lebih rentan terhadap penyakit tertaut X dibandingkan perempuan, karena tidak ada alel lain pada kromosom X kedua untuk menutupi alel yang cacat.

▷ **Kelainan yang tertaut pada Kromosom X**

Kelainan yang tertaut pada kromosom X adalah kelainan yang disebabkan oleh mutasi pada gen yang terletak di kromosom X. Kelainan ini lebih sering terjadi pada laki-laki karena mereka hanya memiliki satu kromosom X, sehingga mutasi pada satu alel X cukup untuk menyebabkan penyakit. Pada perempuan, yang memiliki dua kromosom X, biasanya dibutuhkan dua salinan alel cacat untuk menunjukkan penyakit, sehingga perempuan sering kali menjadi carrier atau pembawa tanpa gejala.

- **Buta Warna**



Buta warna adalah kelainan genetik yang mengakibatkan ketidakmampuan untuk membedakan antara warna-warna tertentu, biasanya merah dan hijau. Ini adalah bentuk kelainan genetik yang tertaut pada kromosom X, dan karena sifat pewarisan yang terkait kromosom X, kondisi ini lebih sering ditemukan pada laki-laki daripada perempuan.

Pada manusia, terdapat gen *OPN1LW* dan *OPN1MW* yang mengkode pigmen merah dan pigmen hijau di retina. Mutasi pada gen ini menyebabkan buta warna merah-hijau. Laki-laki yang memiliki satu salinan alel cacat di kromosom X mereka akan mengalami buta warna karena mereka tidak memiliki salinan kromosom X kedua yang bisa mengkompensasi mutasi tersebut. Perempuan, di sisi lain, memerlukan dua alel cacat (satu dari masing-masing orang tua) untuk mengalami buta warna, karena mereka memiliki dua kromosom X.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe buta warna berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
<b>Laki-laki</b>	$X^N Y$	Normal (melihat warna normal)
<b>Laki-laki</b>	$X^C Y$	Buta warna (tidak bisa membedakan warna merah-hijau)
<b>Perempuan</b>	$X^N X^N$	Normal (melihat warna normal)
<b>Perempuan</b>	$X^N X^C$	Carrier (melihat warna normal, tetapi membawa alel buta warna)
<b>Perempuan</b>	$X^C X^C$	Buta warna (tidak bisa membedakan warna merah-hijau)

Jika ibu carrier ( $X^N X^C$ ) dan ayah normal ( $X^N Y$ ), kemungkinan anak-anak mereka adalah:

- 25% perempuan normal ( $X^N X^N$ )
- 25% perempuan carrier ( $X^N X^C$ )
- 25% laki-laki normal ( $X^N Y$ )
- 25% laki-laki buta warna ( $X^C Y$ )

Jika ayah buta warna ( $X^C Y$ ) dan ibu normal ( $X^N X^N$ ), semua anak perempuan akan menjadi carrier ( $X^N X^C$ ), dan semua anak laki-laki akan memiliki penglihatan warna normal ( $X^N Y$ ).

- **Hemofilia**



Hemofilia adalah kelainan genetik yang mengganggu pembekuan darah, yang membuat pendarahan sulit dihentikan setelah cedera. Hemofilia terjadi karena mutasi pada gen yang mengkode faktor pembekuan darah (seperti faktor VIII untuk Hemofilia A dan faktor IX untuk Hemofilia B). Penyakit ini diturunkan melalui kromosom X, dan seperti kelainan lain yang tertaut pada kromosom X, hemofilia lebih sering terjadi pada laki-laki daripada perempuan.

Pada hemofilia, laki-laki yang memiliki satu salinan gen yang cacat di kromosom X akan menunjukkan penyakit ini karena mereka tidak memiliki kromosom X kedua yang bisa mengkompensasi alel yang cacat. Perempuan, di sisi lain, harus mewarisi dua alel cacat (satu dari setiap orang tua) untuk menunjukkan hemofilia, yang jarang terjadi. Perempuan dengan satu alel cacat biasanya menjadi carrier (pembawa) dan bisa menurunkan alel tersebut kepada anak-anak mereka.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe hemofilia berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
<b>Laki-laki</b>	$X^H Y$	Normal (pembekuan darah normal)
<b>Laki-laki</b>	$X^h Y$	Hemofilia (gangguan pembekuan darah)
<b>Perempuan</b>	$X^H X^H$	Normal (pembekuan darah normal)
<b>Perempuan</b>	$X^H X^h$	Carrier (pembawa, pembekuan darah normal)
<b>Perempuan</b>	$X^h X^h$	Hemofilia (gangguan pembekuan darah)

Jika seorang ibu carrier ( $X^H X^h$ ) dan ayah normal ( $X^H Y$ ) memiliki anak, kemungkinan pewarisan genotipe dan fenotipe anak mereka adalah sebagai berikut:

- 25% perempuan normal ( $X^H X^H$ )
- 25% perempuan carrier ( $X^H X^h$ )
- 25% laki-laki normal ( $X^H Y$ )
- 25% laki-laki dengan hemofilia ( $X^h Y$ )

Jika ayah dengan hemofilia ( $X^h Y$ ) dan ibu normal ( $X^H X^H$ ) memiliki anak, semua anak perempuan akan menjadi carrier ( $X^H X^h$ ), sementara semua anak laki-laki akan memiliki pembekuan darah normal karena mereka menerima kromosom X normal dari ibu mereka.

- **Distrofi Otot**



Distrofi otot Duchenne (DMD) adalah kelainan genetik yang ditandai dengan kelemahan otot yang progresif dan degenerasi jaringan otot. DMD adalah salah satu bentuk distrofi otot yang paling umum dan parah. Penyakit ini disebabkan oleh mutasi pada gen distrofin yang terletak pada kromosom X. Gen distrofin berperan dalam menjaga struktur sel otot, sehingga

mutasi pada gen ini menyebabkan otot menjadi lemah dan mengalami kerusakan secara bertahap.

DMD diwariskan melalui pola resesif tertaut X, yang berarti penyakit ini lebih sering terjadi pada laki-laki karena mereka hanya memiliki satu kromosom X. Perempuan biasanya menjadi carrier dan jarang menunjukkan gejala, kecuali jika kedua kromosom X mereka membawa alel cacat.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe distrofi otot berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
Laki-laki	X <sup>NY</sup>	Normal (tidak terkena DMD)
Laki-laki	X <sup>DY</sup>	Distrofi Otot Duchenne (DMD)
Perempuan	X <sup>N</sup> X <sup>N</sup>	Normal (tidak terkena DMD)
Perempuan	X <sup>N</sup> X <sup>D</sup>	Carrier (pembawa, biasanya tanpa gejala)
Perempuan	X <sup>D</sup> X <sup>D</sup>	Sangat jarang, tetapi jika terjadi, bisa mengalami gejala DMD ringan hingga sedang

Jika seorang ibu carrier (X<sup>N</sup>X<sup>D</sup>) dan ayah normal (X<sup>NY</sup>) memiliki anak, kemungkinan pewarisan genotipe dan fenotipe anak-anak mereka adalah sebagai berikut:

- 25% 25% perempuan normal (X<sup>N</sup>X<sup>N</sup>)
- 25% perempuan carrier (X<sup>N</sup>X<sup>D</sup>)
- 25% laki-laki normal (X<sup>NY</sup>)
- 25% laki-laki dengan DMD (X<sup>DY</sup>)

Jika ayah dengan DMD (X<sup>DY</sup>) dan ibu normal (X<sup>N</sup>X<sup>N</sup>) memiliki anak, semua anak perempuan akan menjadi carrier (X<sup>N</sup>X<sup>D</sup>), dan semua anak laki-laki akan normal (X<sup>NY</sup>).

- **Sindrom Fragile X**

Sindrom Fragile X adalah kelainan genetik yang disebabkan oleh mutasi pada gen FMR1 yang terletak pada kromosom X. Sindrom ini merupakan penyebab umum keterbelakangan mental dan masalah perkembangan lainnya, seperti autisme dan kesulitan belajar. Mutasi pada gen FMR1 biasanya berupa ekspansi berlebihan dari sekuen CGG pada gen tersebut.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe sindrom fragile x berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
Laki-laki	X <sup>GY</sup>	Normal
Laki-laki	X <sup>f</sup> Y	Sindrom Fragile X (keterbelakangan mental)
Perempuan	X <sup>G</sup> X <sup>G</sup>	Normal
Perempuan	X <sup>G</sup> X <sup>f</sup>	Carrier, gejala ringan atau tanpa gejala
Perempuan	X <sup>f</sup> X <sup>f</sup>	Sindrom Fragile X, gejala lebih ringan dari laki-laki

Sindrom ini lebih sering terjadi pada laki-laki karena mereka hanya memiliki satu kromosom X. Perempuan biasanya lebih ringan gejalanya, karena mereka memiliki dua kromosom X yang bisa mengompensasi gen FMR1 yang cacat.

- **Sindrom Lesch-Nyhan**

Sindrom Lesch-Nyhan adalah kelainan metabolismik yang disebabkan oleh defisiensi enzim HPRT (hypoxanthine-guanine phosphoribosyltransferase) akibat mutasi pada gen HPRT1 yang terletak pada kromosom X. Sindrom ini mempengaruhi metabolisme asam urat, yang mengarah pada akumulasi asam urat dalam tubuh dan menyebabkan gangguan neurologis, keterbelakangan mental, dan perilaku menyakiti diri sendiri. Sindrom ini hampir selalu terjadi pada laki-laki, karena perempuan dengan satu salinan alel cacat biasanya hanya carrier tanpa gejala.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe sindrom Lesch-Nyhan berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
<b>Laki-laki</b>	X <sup>H</sup> Y	Normal
<b>Laki-laki</b>	X <sup>I</sup> Y	Sindrom Lesch-Nyhan (gangguan metabolismik dan mental)
<b>Perempuan</b>	X <sup>H</sup> X <sup>H</sup>	Normal
<b>Perempuan</b>	X <sup>H</sup> X <sup>I</sup>	Carrier, tidak menunjukkan gejala
<b>Perempuan</b>	X <sup>I</sup> X <sup>I</sup>	Sangat jarang, tetapi bisa menunjukkan gejala ringan

- **Anodontia**

Anodontia adalah kelainan genetik yang mengakibatkan tidak adanya perkembangan gigi secara sebagian (anodontia parsial) atau keseluruhan (anodontia total). Kondisi ini disebabkan oleh mutasi genetik yang dapat terjadi pada gen yang terkait dengan perkembangan gigi, seperti gen PAX9 atau MSX1, yang tertaut pada kromosom X. Anodontia bisa bersifat resesif tertaut X, yang berarti laki-laki lebih rentan mengalaminya, sedangkan perempuan bisa menjadi carrier.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe anodontia berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
<b>Laki-laki</b>	X <sup>A</sup> Y	Normal, gigi berkembang normal
<b>Laki-laki</b>	X <sup>a</sup> Y	Anodontia, tidak ada perkembangan gigi
<b>Perempuan</b>	X <sup>A</sup> X <sup>A</sup>	Normal, gigi berkembang normal
<b>Perempuan</b>	X <sup>A</sup> X <sup>a</sup>	Carrier, tidak menunjukkan gejala
<b>Perempuan</b>	X <sup>a</sup> X <sup>a</sup>	Anodontia, tidak ada perkembangan gigi (lebih ringan dari laki-laki)

- **Gigi Detektif**

Gigi Defektif mengacu pada kelainan genetik yang menyebabkan struktur dan bentuk gigi yang tidak normal, seperti email gigi yang rapuh atau bentuk gigi yang tidak sempurna. Ini bisa disebabkan oleh mutasi pada gen yang mengatur perkembangan gigi, termasuk gen

yang tertaut pada kromosom X. Sama seperti anodontia, gigi defektif bisa diwariskan melalui resesif tertaut X, yang lebih sering memengaruhi laki-laki.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe gigi defektif berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
Laki-laki	X <sup>G</sup> Y	Normal, gigi berkembang normal
Laki-laki	X <sup>g</sup> Y	Gigi defektif, rapuh atau bentuk abnormal
Perempuan	X <sup>G</sup> X <sup>G</sup>	Normal, gigi berkembang normal
Perempuan	X <sup>G</sup> X <sup>g</sup>	Carrier, tidak menunjukkan gejala
Perempuan	X <sup>g</sup> X <sup>g</sup>	Gigi defektif, gejala lebih ringan daripada laki-laki

▷ **Kelainan yang tertaut pada Kromosom Y**

Kelainan genetik yang tertaut pada kromosom Y sangat jarang, karena kromosom Y jauh lebih kecil daripada kromosom X dan hanya mengandung sedikit gen. Karena kromosom Y hanya diwariskan dari ayah ke anak laki-laki, kelainan yang tertaut pada kromosom Y hanya akan terjadi pada laki-laki. Laki-laki yang mewarisi kelainan ini akan selalu menurunkannya kepada semua anak laki-laki mereka, sementara perempuan tidak akan terpengaruh karena mereka tidak mewarisi kromosom Y.

**Hypertrichosis**

Hypertrichosis tertaut kromosom Y adalah kelainan genetik yang menyebabkan pertumbuhan rambut berlebih pada bagian tubuh tertentu, biasanya pada telinga, tetapi bisa juga pada bagian tubuh lainnya. Kelainan ini juga dikenal sebagai hypertrichosis auricularis atau rambut berlebih di telinga. Ini adalah salah satu dari sedikit kondisi genetik yang diketahui diwariskan melalui kromosom Y, sehingga hanya ditemukan pada laki-laki.

**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe hypertrichosis berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe
Laki-laki	XY <sup>H</sup>	Hypertrichosis (pertumbuhan rambut berlebih)
Laki-laki	XY	Normal
Perempuan	XX	Tidak terpengaruh (karena tidak memiliki kromosom Y)

Hypertrichosis yang tertaut pada kromosom Y hanya dapat diwariskan dari ayah ke anak laki-laki, karena hanya laki-laki yang memiliki kromosom Y. Setiap anak laki-laki dari seorang ayah yang memiliki hypertrichosis akan mewarisi kondisi ini, sementara perempuan tidak terpengaruh karena mereka tidak mewarisi kromosom Y.

▷ **Kelainan yang dipengaruhi oleh Hormon Kelamin**

Beberapa kelainan genetik pada manusia dapat dipengaruhi oleh hormon kelamin, yaitu hormon androgen (hormon pria) dan hormon estrogen (hormon wanita). Hormon-hormon ini memainkan peran penting dalam perkembangan seksual dan karakteristik sekunder (seperti pertumbuhan rambut, suara, dan distribusi lemak tubuh), serta dapat mempengaruhi ekspresi gen yang berkaitan dengan kelainan tertentu. Kelainan yang dipengaruhi oleh hormon kelamin biasanya

bermanifestasi berbeda pada laki-laki dan perempuan, tergantung pada tingkat hormon yang berbeda dalam tubuh.

### Sindrom Kalman

Beberapa kelainan genetik pada manusia dapat dipengaruhi oleh hormon kelamin, yaitu hormon androgen (hormon pria) dan hormon estrogen (hormon wanita). Hormon-hormon ini memainkan peran penting dalam perkembangan seksual dan karakteristik sekunder (seperti pertumbuhan rambut, suara, dan distribusi lemak tubuh), serta dapat mempengaruhi ekspresi gen yang berkaitan dengan kelainan tertentu. Kelainan yang dipengaruhi oleh hormon kelamin biasanya bermanifestasi berbeda pada laki-laki dan perempuan, tergantung pada tingkat hormon yang berbeda dalam tubuh.



**Tabel hubungan genotipe dan fenotipe sindrom kalman berdasarkan jenis kelamin**

Jenis Kelamin	Genotipe	Fenotipe (Gejala)
Laki-laki	$X^{KY}$	Normal (tidak memiliki sindrom Kallmann)
Laki-laki	$X^{kY}$	Sindrom Kallmann: Pubertas tertunda, infertilitas, anosmia (hilangnya penciuman), ciri-ciri seksual sekunder tidak berkembang (suara tidak mendalam)
Perempuan	$X^{KX}$	Normal (tidak memiliki sindrom Kallmann)
Perempuan	$X^{KX^k}$	Carrier (pembawa, biasanya tidak menunjukkan gejala)
Perempuan	$X^{kX^k}$	Sindrom Kallmann: Pubertas tertunda, amenore, infertilitas, anosmia (gejala lebih ringan daripada pada laki-laki)
Laki-laki/Perempuan	$K^aK^A$	Normal (gen autosomal)
Laki-laki/Perempuan	$K^aK^a$	Carrier (autosomal, biasanya tidak menunjukkan gejala)
Laki-laki/Perempuan	$K^aK^o$	Sindrom Kallmann: Gejala serupa, tetapi lebih sering pada laki-laki. Perempuan mungkin mengalami amenore dan infertilitas.

Sindrom Kallmann dapat diwariskan melalui berbagai pola pewarisan, baik tertaut X maupun autosomal, yang mengakibatkan gangguan perkembangan seksual, seperti pubertas tertunda, infertilitas, dan hilangnya indra penciuman (anosmia). Laki-laki lebih sering terpengaruh secara signifikan, sementara perempuan lebih sering menjadi carrier atau mengalami gejala yang lebih ringan.

### Contoh Soal

Mengapa seseorang yang memiliki genotipe heterozigot (seperti Aa atau Ss) tidak menunjukkan gejala penyakit genetik resesif, dan bagaimana hal ini berperan dalam pewarisan sifat?

#### Jawaban:

Individu heterozigot membawa satu alel normal dan satu alel resesif, sehingga sifat resesif tidak diekspresikan karena tertutupi oleh alel dominan. Mereka disebut carrier atau pembawa sifat. Meskipun tidak menunjukkan gejala, mereka bisa menurunkan alel resesif tersebut kepada keturunannya.

#### Pembahasan:

Pada penyakit genetik resesif seperti albino atau siklema, ekspresi penyakit hanya muncul jika seseorang mewarisi dua alel resesif (homozigot). Carrier (heterozigot) tetap memiliki risiko menurunkan sifat tersebut jika pasangannya juga pembawa alel resesif. Inilah sebabnya pentingnya pemahaman silsilah keluarga dan pemeriksaan genetik sebelum menikah.



## 4. Mutasi: Perubahan dalam Cetak Biru Gen

### Pengertian Mutasi

Mutasi adalah perubahan permanen pada materi genetik suatu organisme, yaitu DNA atau RNA, yang dapat mempengaruhi struktur dan fungsi sel. Mutasi bisa terjadi secara spontan atau dipicu oleh faktor eksternal yang disebut mutagen. Perubahan ini dapat diwariskan kepada keturunan jika mutasi terjadi pada sel germinal (sel-sel reproduktif), atau hanya mempengaruhi individu itu sendiri jika mutasi terjadi pada sel somatik.

### Jenis Mutasi

Mutasi adalah perubahan permanen pada materi genetik suatu organisme, yaitu DNA atau RNA, yang dapat mempengaruhi struktur dan fungsi sel. Mutasi bisa terjadi secara spontan atau dipicu oleh faktor eksternal yang disebut mutagen. Perubahan ini dapat diwariskan kepada keturunan jika mutasi terjadi pada sel germinal (sel-sel reproduktif), atau hanya mempengaruhi individu itu sendiri jika mutasi terjadi pada sel somatik.

#### a. Mutasi Gen

Mutasi gen adalah mutasi yang terjadi pada tingkat gen individual, yang dapat menyebabkan perubahan pada satu atau beberapa basa DNA. Contoh mutasi gen termasuk substitusi, insersi, dan delesi.

#### b. Mutasi Kromosom

Mutasi kromosom adalah perubahan yang memengaruhi struktur atau jumlah kromosom. Ini mencakup perubahan besar seperti translokasi, inversi, delesi, dan duplikasi pada segmen kromosom.

#### c. Mutasi Silent

Mutasi diam adalah perubahan pada pasangan basa dalam gen yang menyebabkan perubahan kode genetik, tetapi tidak mengubah asam amino yang dikode. Mutasi silent dapat dikategorikan berdasarkan efeknya pada produk protein.

- ▷ **Silent:** Tidak menyebabkan perubahan pada protein.
- ▷ **Missense:** Mengubah satu asam amino dalam protein.
- ▷ **Nonsense:** Menghasilkan sinyal penghentian prematur dalam produksi protein.

### Peristiwa Mutasi

Mutasi Peristiwa mutasi telah menjadi subjek penting dalam studi genetika, dengan berbagai ilmuwan mempelajari penyebab dan dampaknya. Beberapa mutasi terjadi secara spontan, tanpa pengaruh eksternal, sedangkan mutasi lain dipicu oleh mutagen. Penelitian mengenai mutasi membantu mengungkap mekanisme evolusi dan asal mula variasi genetik dalam populasi.

#### a. Seth Wright

Seth Wright pada akhir abad ke-18. Peristiwa ini terjadi pada tahun 1791, ketika Seth Wright, seorang peternak domba di Massachusetts, Amerika Serikat, memperhatikan adanya mutasi pada salah satu dombanya. Wright memperhatikan bahwa salah satu domba jantannya lahir dengan ekor panjang yang menggantung di belakangnya, yang berbeda dari domba normal yang memiliki ekor pendek yang tegak. Mutasi ini ternyata menyebabkan perubahan pada struktur fisik ekor domba. Daripada

mengabaikan mutasi ini, Seth Wright memutuskan untuk mengembangbiakkan domba tersebut, dan akhirnya berhasil menciptakan domba dengan ekor menggantung sebagai karakteristik yang bisa diwariskan kepada keturunannya.

**b. Hugo de Vries**

Hugo de Vries adalah seorang ahli botani dan genetika asal Belanda yang terkenal karena teorinya tentang mutasi. Pada awal abad ke-20, de Vries memperkenalkan konsep mutasi sebagai mekanisme yang bertanggung jawab atas variasi mendadak dalam spesies. Dia melakukan eksperimen pada tanaman Evening Primrose (*Oenothera lamarckiana*) dan mengamati munculnya variasi mendadak dalam populasi tanaman tersebut. Mutasi bukanlah perubahan bertahap yang terjadi melalui seleksi alam seperti yang dijelaskan dalam teori Darwin, tetapi merupakan perubahan genetik besar yang muncul tiba-tiba.

**c. Herman J. Muller**

Herman J. Muller adalah seorang ahli genetika Amerika yang terkenal atas karyanya dalam menunjukkan bahwa radiasi dapat menyebabkan mutasi genetik. Pada tahun 1927, Muller menemukan bahwa sinar X memiliki kemampuan untuk meningkatkan tingkat mutasi pada organisme, khususnya pada lalat buah (*Drosophila melanogaster*), yang pada akhirnya mempengaruhi struktur genetik mereka. Sinar X memiliki efek mutagenik, yang berarti bahwa paparan sinar ini dapat menyebabkan mutasi pada gen dan kromosom. Muller menunjukkan bahwa mutasi ini dapat diwariskan, artinya perubahan genetik akibat radiasi dapat diteruskan ke generasi berikutnya.

**d. Thomas Hunt Morgan**

Thomas Hunt Morgan adalah seorang ahli genetika Amerika yang dikenal karena kontribusinya dalam mempelajari pewarisan sifat menggunakan lalat buah (*Drosophila melanogaster*) sebagai model. Penelitian Morgan mengarah pada pengembangan teori kromosom sebagai dasar pewarisan sifat dan mengungkapkan tautan genetik dan pindah silang. Morgan mengemukakan bahwa gen terletak pada kromosom dan diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya melalui proses reproduksi. Morgan juga menemukan bahwa gen-gen yang terletak di kromosom yang sama dapat diwariskan bersama, tetapi bisa mengalami pindah silang selama pembelahan sel, sehingga menghasilkan kombinasi baru dari gen-gen tersebut.



Thomas Hunt Morgan - Wikipedia



**Biologipedia**

**Mutasi Tak Selalu Buruk, Lho!**

Sekitar 90% mutasi genetik yang terjadi dalam tubuh manusia tidak berbahaya, bahkan banyak yang tidak kamu sadari!

Beberapa mutasi malah bisa memberi kelebihan—misalnya, sebagian orang punya mutasi yang membuat mereka tahan terhadap HIV. Ternyata, tidak semua perubahan dalam gen itu merugikan, ya!



## Jenis Mutasi

Mutasi tingkat gen terjadi ketika ada perubahan dalam urutan basa nitrogen pada gen tunggal dalam molekul DNA. Mutasi ini memengaruhi satu atau beberapa nukleotida dalam suatu gen dan dapat menghasilkan perubahan pada produk protein yang dihasilkan oleh gen tersebut. Karena gen adalah segmen DNA yang mengkode protein, perubahan pada urutan DNA ini dapat memengaruhi fungsi protein dan, akibatnya, mengubah fenotipe individu.

### a. Mutasi Tingkat Gen

#### ▷ Mutasi Akibat Perubahan Jumlah Basa Nitrogen

Mutasi akibat perubahan jumlah basa nitrogen terjadi ketika ada penambahan (insersi) atau penghilangan (delesi) satu atau lebih nukleotida dari urutan DNA. Perubahan ini mengganggu urutan kode genetik yang digunakan untuk mensintesis protein, yang dapat memengaruhi struktur dan fungsi protein yang dihasilkan. Perubahan jumlah basa nitrogen dapat disebabkan oleh adisi, insersi, delesi, dan duplikasi. Perhatikan contoh berikut:

**Urutan DNA awal: TAA – ACC – GCC**

- **Duplikasi**

Duplikasi adalah peristiwa ketika segmen DNA tertentu diulang satu kali atau lebih. Berikut contoh duplikasi pada urutan DNA dengan duplikasi segmen “ACC”:

**Urutan DNA setelah duplikasi: TAA – ACC – ACC – GCC**

- **Adisi**

Adisi adalah penambahan satu atau lebih nukleotida baru ke urutan DNA. Ini bisa terjadi di mana saja dalam urutan DNA. Adisi basa “G”:

**Urutan DNA setelah adisi: G – TAA – ACC – GCC**

- **Infersi**

Infersi adalah penambahan satu atau lebih nukleotida baru di tengah urutan DNA, yang dapat menyebabkan perubahan kerangka pembacaan (frameshift). Infersi basa “T” antara “TAA” dan “ACC”:

**Urutan DNA setelah infersi: TAA – T – ACC – GCC**

- **Delesi**

Delesi adalah hilangnya satu atau lebih nukleotida dari urutan DNA. Ini dapat menyebabkan perubahan kerangka pembacaan (frameshift) atau menghilangkan segmen penting dalam gen. Delesi basa “A” dari segmen “ACC”:

**Urutan DNA setelah delesi: TAA – CC – GCC**

#### ▷ Mutasi Akibat Perubahan Jenis Basa Nitrogen

Mutasi akibat perubahan jenis basa nitrogen terjadi ketika satu basa nitrogen digantikan oleh basa nitrogen lain. Mutasi ini dikenal sebagai substitusi, dan ada dua jenis substitusi berdasarkan tipe basa nitrogen yang terlibat: transisi dan transversi.

- **Substitusi Transisi**

Substitusi transisi adalah mutasi di mana satu basa purin digantikan oleh purin lain atau satu basa pirimidin digantikan oleh pirimidin lain. Karena purin dan pirimidin memiliki struktur yang mirip, mutasi transisi lebih umum terjadi dibandingkan transversi. Purin: Adenin (A) dan Guanin (G). Pirimidin: Timin (T) dan Sitosin (C).

Contoh Substitusi Transisi:

- $A \rightarrow G$  atau  $G \rightarrow A$ : Satu purin digantikan oleh purin lainnya.
- $T \rightarrow C$  atau  $C \rightarrow T$ : Satu pirimidin digantikan oleh pirimidin lainnya.

- **Substitusi Transversi**

Substitusi transversi terjadi ketika satu basa purin digantikan oleh pirimidin, atau sebaliknya, satu basa pirimidin digantikan oleh purin. Mutasi ini lebih jarang terjadi karena melibatkan perubahan struktur yang lebih besar antara purin dan pirimidin.

Contoh Substitusi Transversi

- $A \rightarrow T$  atau  $A \rightarrow C$ : Purin digantikan oleh pirimidin.
- $G \rightarrow C$  atau  $G \rightarrow T$ : Purin digantikan oleh pirimidin.

▷ **Mutasi Akibat Perubahan Letak Basa Nitrogen**

Mutasi transposisi adalah mutasi yang terjadi akibat perubahan posisi urutan basa nitrogen dalam DNA. Transposisi terjadi ketika segmen DNA yang dikenal sebagai transposon (atau elemen transposabel) berpindah dari satu lokasi ke lokasi lain dalam genom. Proses ini menyebabkan perubahan besar dalam urutan DNA, dan kadang-kadang dapat menyebabkan disfungsi gen atau menciptakan kombinasi gen baru. Perhatikan contoh berikut:

**Urutan DNA awal: CAT – GTT – ACC**

Transposisi melibatkan perpindahan satu atau lebih segmen DNA dari satu tempat ke tempat lain. Dalam contoh ini, kita akan memindahkan sebagian urutan basa nitrogen dalam rantai DNA tersebut. Misalkan segmen GTT berpindah tempat ke awal urutan

**Urutan DNA setelah transposisi: GTT – CAT – ACC**

**b. Mutasi Tingkat Kromosom (Abrasi Kromosom)**

Mutasi tingkat kromosom, atau dikenal sebagai abrasi kromosom, terjadi ketika ada perubahan besar dalam struktur atau jumlah kromosom dalam suatu organisme. Mutasi ini dapat memengaruhi satu atau lebih kromosom secara keseluruhan, menyebabkan perubahan besar dalam ekspresi genetik. Mutasi kromosom sering kali menyebabkan kelainan genetik serius dan dapat memengaruhi banyak gen sekaligus, berbeda dengan mutasi gen yang hanya melibatkan perubahan pada satu gen.

▷ **Mutasi Akibat Perubahan Struktur Kromosom**

Mutasi struktur kromosom terjadi ketika ada perubahan dalam pengaturan atau urutan segmen pada kromosom. Ini sering kali melibatkan penghilangan, penambahan, atau penyusunan ulang bagian-bagian besar dari kromosom, yang dapat menyebabkan dampak serius pada perkembangan dan fungsi organisme.

- **Delesi (Penghapusan)**

Delesi terjadi ketika segmen kromosom hilang atau dihapus. Mutasi ini menyebabkan hilangnya sejumlah besar gen yang terdapat dalam segmen yang dihapus, yang dapat mengakibatkan penyakit atau kondisi serius. Sindrom Cri-du-chat adalah hasil dari delesi sebagian pada kromosom 5, yang menyebabkan keterbelakangan mental, masalah perkembangan, dan suara tangisan khas yang menyerupai suara kucing.

- **Duplikasi (Penggandaan)**

Duplikasi terjadi ketika segmen kromosom berulang atau tergandakan, menghasilkan dua salinan gen pada kromosom yang sama. Meskipun tidak selalu merugikan, duplikasi dapat menyebabkan ekspresi gen yang berlebihan.

- **Inversi (Perbalikan)**

Inversi adalah mutasi dimana segmen kromosom terputar dan kembali terpasang terbalik. Dalam inversi, segmen kromosom tidak hilang atau digandakan, tetapi orientasinya berubah. Inversi dapat mengganggu ekspresi gen di dekat titik inversi dan kadang-kadang memengaruhi pasangan kromosom homolog, sehingga menghambat pindah silang (crossing over) selama pembelahan sel.

- **Translokasi (Pertukaran Segmen)**

Translokasi terjadi ketika segmen kromosom berpindah dari satu kromosom ke kromosom lain yang bukan homolog. Translokasi dapat bersifat seimbang (tidak ada materi genetik yang hilang atau ditambahkan) atau tidak seimbang (materi genetik hilang atau ditambahkan). Leukemia mielogen kronis (CML) disebabkan oleh translokasi antara kromosom 9 dan kromosom 22, yang dikenal sebagai kromosom Philadelphia. Ini menyebabkan aktivasi gen yang memicu pertumbuhan sel kanker.

- **Translokasi Resiprok**

Translokasi resiprok adalah jenis mutasi struktural kromosom di mana terjadi pertukaran segmen antara dua kromosom non-homolog. Dalam translokasi resiprok, segmen dari satu kromosom dipindahkan ke kromosom lain dan sebaliknya, tanpa ada materi genetik yang hilang atau ditambahkan. Oleh karena itu, secara umum translokasi resiprok dianggap seimbang, dan sering kali tidak menyebabkan gejala pada individu yang memiliki. Jika kromosom 9 dan kromosom 22 bertukar segmen, segmen dari kromosom 9 pindah ke kromosom 22, dan segmen dari kromosom 22 pindah ke kromosom 9. Translokasi resiprok yang seimbang biasanya tidak menyebabkan kelainan fenotipik pada pembawa, tetapi dapat menyebabkan masalah reproduksi, seperti keguguran atau memiliki anak dengan kelainan genetik jika gamet yang dihasilkan memiliki translokasi tidak seimbang.

- **Translokasi Non-Resiprok**

Translokasi nonresiprok adalah jenis mutasi di mana segmen kromosom dipindahkan dari satu kromosom ke kromosom lain, tetapi tidak ada pertukaran balik segmen kromosom. Ini berarti bahwa satu kromosom kehilangan segmen genetik, sementara kromosom lain mendapatkan segmen tersebut. Jika segmen dari kromosom 5 dipindahkan ke kromosom 3 tanpa pertukaran segmen, ini akan menciptakan translokasi nonresiprok. Kromosom 5 kehilangan segmen, dan kromosom 3 mendapatkan segmen tambahan. Translokasi nonresiprok sering kali menyebabkan ketidakseimbangan genetik, karena salah satu kromosom kehilangan materi genetik sementara yang lain memiliki tambahan materi genetik. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan kelainan fisik atau gangguan perkembangan, tergantung pada gen-gen yang terlibat. Misalnya, hilangnya segmen pada kromosom penting dapat menyebabkan gangguan pertumbuhan, cacat lahir, atau penyakit genetik.

- **Translokasi Robertson**

Translokasi Robertsonian adalah jenis khusus translokasi tidak seimbang yang terjadi antara kromosom akrosentrik (kromosom dengan sentromer yang terletak sangat dekat

dengan ujung). Pada translokasi Robertsonian, dua kromosom akrosentrik bergabung di dekat sentromer mereka, menghasilkan kromosom gabungan tunggal. Translokasi ini biasanya terjadi antara kromosom 13, 14, 15, 21, dan 22. Translokasi Robertsonian yang melibatkan kromosom 21 dan 14 adalah salah satu penyebab umum dari sindrom Down. Dalam kasus ini, sebagian besar lengan panjang kromosom 21 melekat pada kromosom 14, yang dapat menyebabkan individu tersebut memiliki tiga salinan kromosom 21. Pembawa translokasi Robertsonian biasanya memiliki 45 kromosom, tetapi mereka dapat sehat karena mereka tidak kehilangan materi genetik penting. Namun, translokasi Robertsonian dapat menyebabkan masalah reproduksi, termasuk keguguran berulang atau memiliki anak dengan kelainan kromosom, seperti trisomi 21 yang menyebabkan sindrom Down.

- **Katenasi (Fusion)**

Katenasi adalah mutasi di mana dua kromosom berbeda bergabung untuk membentuk kromosom baru, menghasilkan gabungan dari dua segmen yang berbeda menjadi satu struktur kromosom. Katenasi dapat terjadi pada translokasi Robertsonian, di mana dua kromosom akrosentrik bergabung di dekat sentromer, menghasilkan satu kromosom besar dan satu kromosom kecil yang mungkin hilang dari genom.

▷ **Mutasi Akibat Perubahan Jumlah Kromosom**

Mutasi akibat perubahan jumlah kromosom terjadi ketika organisme memiliki jumlah kromosom yang tidak normal. Ini dapat melibatkan perubahan pada satu set lengkap kromosom (euploid) atau penambahan atau pengurangan satu atau beberapa kromosom individu (aneuploid). Perubahan jumlah kromosom sering kali memiliki dampak serius pada perkembangan dan fungsi organisme.

- **Euploid**

Euploid adalah kondisi di mana sel memiliki jumlah set kromosom lengkap yang merupakan kelipatan dari  $n$  (jumlah kromosom haploid dalam spesies tertentu). Normalnya, organisme eukariotik memiliki dua set kromosom (diploid,  $2n$ ), tetapi dalam kasus mutasi atau kelainan, organisme dapat memiliki lebih sedikit atau lebih banyak set kromosom lengkap. Variasi euploid ini mencakup monoploid, diploid, triploid, dan bentuk poliploid lainnya terjadi ketika segmen kromosom hilang atau dihapus. Mutasi ini menyebabkan hilangnya sejumlah besar gen yang terdapat dalam segmen yang dihapus, yang dapat mengakibatkan penyakit atau kondisi serius. Sindrom Cri-du-chat adalah hasil dari delesi sebagian pada kromosom.

- **Monoloid**

Monoploid adalah kondisi di mana suatu organisme atau sel hanya memiliki satu set kromosom ( $1n$ ). Ini lebih jarang terjadi pada hewan tetapi bisa terjadi pada beberapa spesies tumbuhan. Beberapa serangga seperti lebah jantan (drone) bersifat monoploid. Mereka berkembang dari telur yang tidak dibuahi dan hanya memiliki satu set kromosom dari induknya. Organisme monoploid lebih rentan terhadap mutasi karena tidak memiliki salinan kedua dari gen-gen yang dapat berfungsi sebagai cadangan. Ini sering mengakibatkan penurunan kemampuan bertahan hidup jika terjadi mutasi gen yang merugikan.

- **Diploid**

Diploid adalah kondisi normal bagi sebagian besar organisme, di mana sel memiliki dua set kromosom ( $2n$ ), satu set diwariskan dari setiap orang tua. Manusia adalah organisme diploid, dengan 46 kromosom (23 pasang). Setiap pasangan kromosom terdiri dari satu kromosom dari ibu dan satu dari ayah. Organisme diploid memiliki keragaman genetik

yang lebih tinggi dan lebih tahan terhadap mutasi genetik dibandingkan organisme monoploid karena salinan gen kedua dapat menutupi efek dari mutasi pada satu gen.

- **Triploid**

Triploid adalah kondisi di mana sel memiliki tiga set kromosom (3n). Ini merupakan salah satu bentuk poliploidi, di mana terdapat lebih dari dua set kromosom. Pisang yang biasa dikonsumsi adalah contoh tanaman triploid. Pisang komersial memiliki tiga set kromosom dan steril, yang berarti mereka tidak dapat berkembang biak secara seksual, tetapi mereka berkembang biak melalui cara vegetatif. Organisme triploid sering kali steril, karena ketidakseimbangan jumlah kromosom membuat proses pembelahan sel (meiosis) tidak berfungsi dengan baik. Dalam tanaman, triploid dapat menghasilkan buah yang lebih besar dan sering kali tanpa biji, tetapi pada hewan, triploid biasanya menyebabkan ketidaksuburan dan masalah perkembangan.

- **Tetraploid**

Tetraploid adalah kondisi di mana organisme atau sel memiliki empat set kromosom (4n). Ini adalah bentuk poliploidi, di mana jumlah set kromosom lebih dari dua (2n). Tetraploid sering ditemukan dalam tumbuhan dan jarang terjadi pada hewan. Beberapa jenis tanaman, seperti kentang dan gandum tetraploid, memiliki empat set kromosom yang memberikan keunggulan dalam ukuran tanaman dan produktivitas. Tetraploid sering kali menghasilkan ukuran sel lebih besar, yang dapat meningkatkan pertumbuhan dan ukuran keseluruhan organisme. Dalam pertanian, tanaman tetraploid digunakan karena mereka dapat menghasilkan buah atau biji yang lebih besar. Namun, tetraploid pada hewan sering kali menyebabkan ketidaksuburan atau masalah perkembangan.

- **Autopoliploid**

Autopoliploid terjadi ketika duplikasi set kromosom berasal dari spesies yang sama. Ini adalah mutasi di mana semua set kromosom dalam organisme berasal dari satu spesies. Poliploidi jenis ini biasanya terjadi akibat kegagalan pembelahan sel selama meiosis atau mitosis, menghasilkan sel dengan dua kali lipat jumlah kromosom. Autopoliploid sering kali menghasilkan tanaman yang lebih kuat, lebih besar, dan lebih produktif, tetapi sering kali juga menyebabkan sterilitas karena masalah dalam pembelahan sel. Pada tanaman, ini tidak menjadi masalah besar karena mereka dapat berkembang biak secara vegetatif.

- **Alopoliploid**

Alopoliploid terjadi ketika organisme memiliki set kromosom ganda yang berasal dari dua spesies berbeda. Ini adalah hasil dari hibridisasi antara dua spesies, di mana kromosom dari kedua spesies bergabung menjadi satu organisme. Hibridisasi ini biasanya diikuti oleh duplikasi kromosom, yang memungkinkan gen-gen dari kedua spesies menjadi kompatibel satu sama lain. Gandum modern adalah contoh alopoliploid. Gandum merupakan hibrida yang berasal dari spesies berbeda, dengan gabungan kromosom dari dua atau lebih spesies asli. Alopoliploid sering kali menghasilkan organisme yang lebih bervariasi dan dapat mewarisi sifat-sifat menguntungkan dari kedua spesies induk. Ini juga memungkinkan organisme untuk menghindari sterilitas yang biasanya terjadi pada hibrida interspesies, karena kromosom yang terduplicasi dapat berpasangan dengan tepat selama meiosis.

Euploid yang terjadi pada manusia dan hewan dapat terjadi melalui Digini dan Diandri. Digini adalah bentuk poliploidi yang terjadi ketika dua set kromosom berasal dari ibu.

Pada kondisi ini, terdapat dua set kromosom dari sel telur (maternal) dan satu set kromosom dari sperma (paternal), sehingga menghasilkan organisme triploid. Sedangkan Diandri adalah bentuk poliploid yang terjadi ketika dua set kromosom berasal dari ayah. Pada kondisi ini, terdapat dua set kromosom dari sperma (paternal) dan satu set kromosom dari sel telur (maternal), yang juga menghasilkan organisme triploid.

- **Aneuploid**

Aneuploid adalah mutasi kromosom yang terjadi ketika ada jumlah kromosom yang tidak normal dalam sel, yaitu adanya penambahan atau pengurangan satu atau lebih kromosom individual dari set kromosom normal. Berbeda dengan poliploid yang melibatkan seluruh set kromosom, aneuploid hanya memengaruhi sebagian kromosom. Aneuploidy sering kali menyebabkan gangguan perkembangan yang signifikan dan sering kali menyebabkan kelainan genetik atau gangguan kesehatan. Penyebab terjadi aneuploid adalah sebagai berikut:

- **Anafase Lag**

Anafase lag adalah peristiwa ketika kromosom atau kromatid tertinggal selama pemisahan kromosom dalam fase anafase pada pembelahan sel (mitosis atau meiosis). Akibatnya, kromosom yang tertinggal tidak masuk ke dalam sel anak yang terbentuk, sehingga sel yang dihasilkan memiliki jumlah kromosom tidak seimbang.

- **Non-disjunction**

Nondisjunction adalah kegagalan kromosom homolog atau kromatid saudara untuk berpisah secara benar selama meiosis atau mitosis. Hal ini menghasilkan gamet (atau sel anak) yang memiliki terlalu banyak atau terlalu sedikit kromosom. Meiosis I: Nondisjunction terjadi ketika kromosom homolog gagal berpisah, menghasilkan gamet dengan dua salinan kromosom atau tanpa kromosom. Meiosis II: Nondisjunction terjadi ketika kromatid saudara tidak berpisah dengan benar, menyebabkan satu gamet memiliki dua kromatid dan yang lain tidak memiliki kromatid untuk kromosom tersebut.

- **Nulisomi**

Nulisomi adalah kondisi di mana dua salinan dari kromosom tertentu hilang dari genom, sehingga menyebabkan sel atau organisme memiliki nol salinan dari kromosom tersebut. Ini adalah bentuk aneuploidi yang sangat jarang ditemukan karena biasanya letal pada tahap awal perkembangan. Jumlah Kromosom:  $(2n - 2)$ , hilangnya sepasang kromosom homolog.

- **Monosomi**

Monosomi adalah kondisi di mana organisme hanya memiliki satu salinan dari kromosom tertentu alih-alih dua salinan seperti yang terjadi pada organisme diploid. Monosomi dapat terjadi karena nondisjunction atau anafase lag. Jumlah Kromosom:  $(2n - 1)$ , hilangnya satu kromosom dari sepasang kromosom homolog.

- **Trisomi**

Trisomi adalah kondisi di mana organisme memiliki tiga salinan dari kromosom tertentu alih-alih dua. Trisomi adalah salah satu jenis aneuploid yang paling umum dan sering kali terjadi akibat nondisjunction selama meiosis. Jumlah Kromosom:  $(2n + 1)$ , adanya satu salinan tambahan dari satu kromosom.

- **Tetrasomi**

Trisomi adalah kondisi di mana organisme memiliki tiga salinan dari kromosom tertentu alih-alih dua. Trisomi adalah salah satu jenis aneuploid yang paling umum dan sering.

## Penyebab Mutasi

Mutagen adalah agen eksternal yang menyebabkan mutasi pada materi genetik (DNA atau RNA). Mutagen dapat mengganggu struktur DNA atau proses replikasi DNA, yang mengakibatkan perubahan permanen pada urutan basa nitrogen. Paparan mutagen bisa bersifat alami atau buatan, dan mutasi yang dihasilkan dapat berdampak positif, negatif, atau netral terhadap organisme.

### a. Jenis Mutagen Berdasarkan Sifatnya

#### ▷ **Mutagen Kimia**

Mutagen kimia adalah senyawa yang berinteraksi dengan DNA, menyebabkan perubahan pada struktur genetik yang dapat mengakibatkan mutasi. Beberapa mutagen kimia dapat menyebabkan substitusi basa, delesi, insersi, atau bahkan mutasi frameshift, tergantung pada cara mereka memengaruhi basa nitrogen dalam DNA.

- **Pestisida**

Pestisida adalah bahan kimia yang digunakan untuk membunuh hama, tetapi beberapa pestisida juga diketahui bersifat mutagenik, karena mereka dapat merusak DNA dalam sel organisme. Pestisida bisa menyebabkan mutasi langsung dengan berinteraksi dengan basa nitrogen atau secara tidak langsung dengan menghasilkan radikal bebas yang merusak struktur DNA. DDT (Dichlorodiphenyltrichloroethane) adalah salah satu pestisida yang diketahui memiliki sifat mutagenik. Paparan DDT dalam jumlah besar dikaitkan dengan risiko kanker dan mutasi genetik.

- **Asam Nitrit**

Asam nitrit adalah mutagen kimia yang dapat menyebabkan deaminasi basa nitrogen dalam DNA. Proses deaminasi mengubah sitosin menjadi urasil, yang menghasilkan mutasi substitusi basa karena urasil biasanya ditemukan dalam RNA, bukan DNA. Deaminasi menyebabkan perubahan pasangan basa selama replikasi DNA, yang menghasilkan mutasi.

- **Asam Alkilase**

Agen alkilase adalah zat kimia yang menambahkan kelompok alkil ke basa nitrogen dalam DNA. Penambahan alkil ini menyebabkan kesalahan pasangan basa, yang dapat menghasilkan mutasi saat DNA direplikasi. Mutasi yang dihasilkan oleh agen alkilase dapat menyebabkan mutasi missense (perubahan satu asam amino dalam protein) atau nonsense (penghentian dini sintesis protein), yang sering kali berakibat pada kanker. Mustard nitrogen dan dimetil sulfat adalah contoh agen alkilase yang digunakan dalam penelitian untuk menginduksi mutasi pada DNA.

- **Benzopyrene**

Benzopyrene adalah senyawa kimia yang terdapat dalam asap tembakau, asap kendaraan bermotor, dan makanan yang dibakar. Benzopyrene adalah salah satu karsinogen utama dalam asap rokok, yang menyebabkan mutasi dengan mengikat basa DNA. Benzopyrene dikaitkan dengan kanker paru-paru, kanker tenggorokan, dan kanker lain yang terkait dengan paparan jangka panjang terhadap asap tembakau atau polusi udara. Benzopyrene

berinteraksi dengan DNA, terutama dengan basa guanin, dan membentuk aduk DNA yang mengganggu proses replikasi.

- **Zat Digitonin**

Digitonin adalah senyawa kimia yang diekstrak dari tumbuhan Digitalis. Digitonin terutama dikenal karena efeknya pada membran sel, tetapi dalam jumlah besar, digitonin juga dapat menyebabkan kerusakan DNA, yang berpotensi menyebabkan mutasi. Penggunaan digitonin sebagai mutagen terbatas, tetapi paparan zat ini dalam dosis tinggi bisa memicu kerusakan jaringan dan potensi mutasi. Kerusakan DNA yang disebabkan oleh digitonin biasanya terjadi karena gangguan pada integritas membran dan peroksidasi lipid, yang memicu kerusakan oksidatif pada DNA.

- **Akridin**

Akridin dan turunannya adalah senyawa kimia yang dapat menyebabkan mutasi frameshift dengan menyiapkan diri di antara basa nitrogen dalam DNA. Penyiapan ini mengganggu pembacaan kode genetik selama replikasi DNA. Mutasi frameshift menyebabkan perubahan besar dalam urutan asam amino yang dihasilkan, sering kali menghentikan sintesis protein atau menghasilkan protein yang tidak berfungsi. Akridin oranye adalah senyawa yang digunakan dalam penelitian genetik untuk menyebabkan mutasi frameshift.

- **5-Bromourasil**

5-Bromourasil adalah basa analog yang dapat menggantikan timin dalam DNA. Namun, 5-bromourasil cenderung berpasangan dengan guanina alih-alih adenin, yang menghasilkan mutasi substitusi basa. 5-Bromourasil sering digunakan dalam eksperimen laboratorium untuk mempelajari mutasi genetik, tetapi dalam organisme hidup, ini bisa meningkatkan risiko mutasi kanker. 5-Bromourasil menyebabkan kesalahan pasangan basa selama replikasi DNA, yang mengarah pada mutasi missense atau silent.

- **Asam Nitrat**

Asam nitrat adalah bahan kimia yang dapat menginduksi mutasi dengan mengoksidasi basa nitrogen dalam DNA. Asam nitrat menyebabkan deaminasi basa DNA, yang mengubah struktur basa dan menyebabkan kesalahan pasangan basa. Paparan berlebihan terhadap asam nitrat dapat merusak DNA dan meningkatkan risiko mutasi genetik yang mengarah pada kanker atau kerusakan genetik lainnya. Seperti asam nitrit, asam nitrat menyebabkan perubahan dalam urutan DNA melalui deaminasi basa.

▷ **Mutagen Fisika**

Mutagen fisika adalah agen fisik yang dapat menyebabkan mutasi dengan mengganggu struktur DNA atau proses replikasi. Mutagen fisika seperti suhu tinggi, radiasi berenergi tinggi, sinar X, dan sinar ultraviolet dapat merusak ikatan kimia dalam DNA, menyebabkan perubahan permanen pada urutan basa nitrogen.

- **Suhu Tinggi**

Suhu tinggi dapat menyebabkan mutasi dengan cara mengubah stabilitas DNA. Ketika DNA terpapar suhu tinggi, ikatan hidrogen antar basa dalam untai DNA dapat melemah atau putus, menyebabkan denaturasi (hilangnya struktur heliks ganda). Pada suhu ekstrem, ikatan kimia dalam DNA dapat rusak, menyebabkan perubahan dalam struktur molekuler yang dapat mengakibatkan mutasi genetik selama proses replikasi. Meskipun efek mutagenik suhu tinggi jarang terjadi secara alami pada organisme besar, paparan terhadap panas ekstrem bisa menyebabkan kerusakan DNA pada organisme atau sel, mengganggu fungsi gen.

- **Sinar Berenergi Tinggi**

Radiasi berenergi tinggi termasuk radiasi seperti neutron dan proton yang memiliki cukup energi untuk menyebabkan mutasi. Jenis radiasi ini bersifat pengion, yang berarti mampu mengionisasi atom dan molekul dalam sel, termasuk DNA. Sinar berenergi tinggi dapat menyebabkan patahnya untai DNA atau mengubah struktur kimia basa nitrogen, sehingga menyebabkan mutasi besar seperti translokasi atau delesi.

- **Sinar X**

Sinar X adalah bentuk radiasi pengion yang dapat menyebabkan kerusakan langsung pada DNA. Sinar X memiliki energi tinggi yang mampu menembus jaringan dan menyebabkan patahnya untai DNA, baik untai tunggal maupun ganda. Sinar X dapat menyebabkan patahan ganda pada DNA yang sulit diperbaiki oleh mekanisme perbaikan sel. Ini sering menyebabkan mutasi besar seperti inversi atau delesi. Paparan sinar X berlebihan dapat meningkatkan risiko kanker, terutama kanker darah seperti leukemia, karena kerusakan kromosom yang disebabkan oleh radiasi ini.

- **Sinar X dan Sinar Gamma (Y)**

Sinar X dan sinar gamma (Y) merupakan dua jenis radiasi pengion yang sangat kuat. Keduanya memiliki energi yang sangat tinggi dan mampu menyebabkan kerusakan parah pada DNA dengan merusak basa nitrogen, memutus ikatan dalam untai DNA, dan menyebabkan patahan ganda. Sinar X dan sinar gamma dapat menginduksi patahan ganda untai DNA yang sangat sulit diperbaiki oleh mekanisme perbaikan sel. Jika patahan ini tidak diperbaiki dengan benar, dapat terjadi mutasi besar seperti translokasi, delesi, atau mutasi frameshift. Sinar gamma memiliki energi lebih tinggi dari sinar X dan merupakan salah satu bentuk radiasi yang paling merusak. Radiasi gamma dihasilkan oleh peluruhan radioaktif atau reaksi nuklir, dan sering digunakan dalam radioterapi untuk membunuh sel kanker. Paparan sinar X atau sinar gamma secara berlebihan dapat menyebabkan kanker, seperti kanker tiroid, kanker darah, dan kanker kulit, serta mutasi genetik yang berbahaya bagi generasi mendatang.

- **Sinar Ultraviolet**

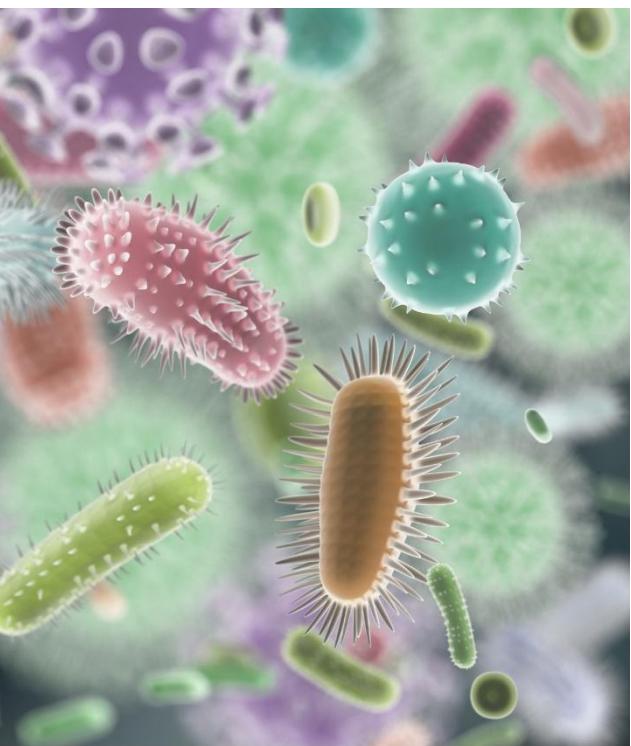
Sinar ultraviolet (UV), terutama UV-B dan UV-C, adalah bentuk radiasi berenergi rendah yang dapat menyebabkan kerusakan DNA dengan membentuk dimer timin. Dimer timin adalah ikatan abnormal antara dua basa timin yang berdekatan pada DNA, yang mengganggu pembacaan normal kode genetik. Sinar UV menyebabkan terbentuknya dimer timin, yang menghalangi replikasi DNA normal. Jika dimer ini tidak diperbaiki oleh sistem perbaikan DNA, dapat menyebabkan mutasi substitusi basa selama proses replikasi. Paparan sinar UV yang berlebihan, terutama dari sinar matahari, dapat meningkatkan risiko kanker kulit seperti melanoma. Sinar UV juga diketahui merusak mata dan menyebabkan katarak jika paparan berlebihan terjadi.

▷ **Mutagen Biologi**

Mutagen biologi adalah organisme atau agen biologis yang dapat menyebabkan mutasi dalam DNA sel inang. Mutagen biologi ini dapat berasal dari bakteri, virus, atau elemen biologis lainnya yang dapat mengubah materi genetik organisme. Mutasi yang dihasilkan sering kali terjadi ketika agen-agen ini memodifikasi atau mengganggu replikasi DNA dalam sel.

- **Bakteri**

Beberapa bakteri dapat menyebabkan mutasi genetik melalui mekanisme tidak langsung seperti penghasil radikal bebas atau penginduksi peradangan dalam tubuh. Peradangan



Bakteri dan virus – Canva Studio

kronis yang disebabkan oleh infeksi bakteri dapat meningkatkan risiko mutasi pada DNA sel inang, terutama karena kerusakan oksidatif. *Helicobacter pylori*, bakteri yang menyebabkan infeksi lambung, telah dikaitkan dengan peningkatan risiko kanker lambung. Bakteri ini menghasilkan reaksi peradangan kronis yang dapat menyebabkan mutasi pada sel epitel lambung. Mutasi yang disebabkan oleh bakteri seperti *Helicobacter pylori* dapat mengarah pada kanker lambung atau kondisi pra-kanker lainnya.

- **Virus**

Virus dikenal sebagai mutagen biologis yang sangat berpengaruh, karena beberapa virus dapat menyisipkan materi genetik mereka ke dalam DNA inang, yang menyebabkan perubahan pada genom inang. Virus sering kali mengganggu regulasi genetik dan menyebabkan mutasi yang berkontribusi pada perkembangan kanker atau penyakit genetik. Human papillomavirus (HPV) adalah virus yang dapat menyisipkan DNA-nya ke dalam sel epitel serviks. Mutasi yang disebabkan oleh HPV berhubungan dengan perkembangan kanker serviks. Demikian juga, Hepatitis B dan Hepatitis C meningkatkan risiko kanker hati dengan menyebabkan kerusakan DNA selama infeksi kronis. Virus yang menyebabkan mutasi ini sering kali bertanggung jawab atas kanker dan penyakit lainnya yang diakibatkan oleh integrasi DNA virus ke dalam genom inang.

**b. Jenis Mutagen Berdasarkan Sumbernya**

Mutagen dapat dikelompokkan berdasarkan sumbernya menjadi mutagen alami dan mutagen buatan. Klasifikasi ini membantu dalam memahami apakah mutasi yang terjadi dipicu oleh faktor alami di lingkungan atau oleh agen yang diciptakan oleh aktivitas manusia.

- ▷ **Mutagen Alami**

Mutagen alami adalah agen yang secara alami ada di lingkungan dan dapat menyebabkan mutasi tanpa intervensi manusia. Ini termasuk berbagai radiasi kosmik, sinar ultraviolet dari matahari, bahan kimia yang ditemukan secara alami dalam tumbuhan atau jamur, dan organisme seperti virus. Radiasi kosmik yang berasal dari luar angkasa juga dapat menyebabkan mutasi pada organisme yang terpapar, terutama di luar atmosfer bumi.

- ▷ **Mutagen Buatan**

Mutagen buatan adalah agen mutagenik yang dibuat atau dihasilkan melalui aktivitas manusia. Ini termasuk bahan kimia industri, pestisida, radiasi buatan dari sinar X, dan bahan-bahan yang ditemukan dalam produk-produk seperti asap rokok. Sinar X yang digunakan dalam diagnosis medis adalah bentuk radiasi buatan yang dapat menyebabkan patahnya untai DNA jika digunakan secara berlebihan. Benzopyrene, yang ditemukan dalam asap rokok dan polusi udara, adalah mutagen buatan yang diketahui menyebabkan mutasi dalam DNA manusia, yang memicu kanker paru-paru.

## Klasifikasi Mutasi

Mutasi dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria, termasuk sumber asal mutasi, sifat mutasi, arah mutasi, dan peran mutasi terhadap organisme. Klasifikasi ini membantu dalam memahami jenis mutasi, bagaimana mutasi terjadi, serta dampaknya terhadap organisme.

### a. Mutasi Berdasarkan Sumber Asalnya

Mutasi dapat dibagi menjadi dua kategori berdasarkan sumber asalnya, yaitu mutasi alami dan mutasi buatan.

#### ▷ Mutasi Alami

Mutasi alami adalah mutasi yang terjadi secara spontan dan tanpa pengaruh dari faktor luar seperti bahan kimia atau radiasi. Mutasi ini biasanya disebabkan oleh kesalahan yang terjadi secara acak selama replikasi DNA, pembelahan sel, atau kerusakan DNA yang tidak dapat diperbaiki oleh mekanisme perbaikan sel. Mutasi alami adalah bagian dari proses evolusi dan dapat terjadi pada organisme apa pun.

#### ▷ Mutasi Buatan

Mutasi buatan adalah mutasi yang terjadi sebagai hasil dari paparan agen eksternal atau mutagen buatan. Ini sering kali terjadi karena aktivitas manusia, baik sengaja maupun tidak sengaja. Mutagen buatan termasuk bahan kimia, radiasi, atau agen biologis yang secara langsung atau tidak langsung mempengaruhi DNA.

### b. Mutasi Berdasarkan Sifat Genetik

Mutasi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat genetiknya menjadi mutasi dominan dan mutasi resesif, tergantung pada bagaimana mutasi tersebut diekspresikan dalam fenotipe individu.

#### ▷ Mutasi Dominan

Mutasi dominan akan terekspresi dalam fenotipe bahkan jika hanya terdapat satu alel yang bermutasi. Mutasi ini dapat menyebabkan perubahan yang nyata meskipun hanya satu dari dua alel yang mengalami mutasi. Huntington's disease disebabkan oleh mutasi dominan pada kromosom 4.

#### ▷ Mutasi Resesif

Mutasi resesif hanya akan terekspresi jika kedua alel pada lokus tersebut mengalami mutasi. Jika hanya satu alel yang bermutasi, individu tersebut biasanya merupakan carrier dan tidak menunjukkan gejala. Sistik fibrosis adalah hasil dari mutasi resesif, di mana kedua alel CFTR harus bermutasi agar penyakit ini muncul.

### c. Mutasi Berdasarkan Arah Mutasinya

Mutasi dapat dikategorikan berdasarkan arah atau perubahan genetiknya, apakah mengembalikan organisme ke kondisi normal atau membuat kondisi lebih jauh dari kondisi awal.

#### ▷ Mutasi Maju

Mutasi maju adalah perubahan dari gen normal menjadi gen mutan. Mutasi ini menyebabkan gen berfungsi secara abnormal atau kehilangan fungsinya. Mutasi yang mengubah gen normal yang mengatur sel menjadi onkogen yang menyebabkan kanker.

#### ▷ Mutasi Balik

Mutasi balik atau back mutation adalah mutasi yang terjadi pada gen yang sebelumnya bermutasi, yang menyebabkan gen tersebut kembali ke bentuk normalnya. Ini sering dikenal

sebagai restorasi dari mutasi. Mutasi balik pada bakteri yang mengembalikan sifat aslinya setelah sebelumnya bermutasi.

**d. Mutasi Berdasarkan Jumlah Faktor yang Bermutasi**

Mutasi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah gen atau faktor genetik yang mengalami perubahan dalam satu mutasi.

▷ **Mutasi Tunggal (Monogenik)**

Mutasi tunggal adalah mutasi yang hanya melibatkan satu gen. Mutasi ini dapat menyebabkan kelainan genetik yang disebabkan oleh perubahan pada gen spesifik tunggal. Contoh: Anemia sel sabit disebabkan oleh mutasi pada satu gen yang mengkode hemoglobin.

▷ **Mutasi Ganda (Poligenik)**

Mutasi ganda adalah mutasi yang melibatkan lebih dari satu gen. Kondisi ini biasanya lebih kompleks karena melibatkan interaksi antara beberapa gen yang bermutasi. Beberapa bentuk kanker dan diabetes tipe 2 disebabkan oleh kombinasi mutasi poligenik.

**e. Mutasi Berdasarkan Dampak**

Mutasi juga dikategorikan berdasarkan dampaknya terhadap fungsi organisme dan kemampuan bertahan hidup.

▷ **Mutasi Menguntungkan**

Mutasi ini memberikan keuntungan evolusioner bagi organisme. Misalnya, mutasi yang meningkatkan resistensi terhadap penyakit atau adaptasi terhadap lingkungan. Resistensi terhadap antibiotik pada bakteri merupakan contoh mutasi menguntungkan dalam konteks survival.

▷ **Mutasi Merugikan**

Mutasi ini merusak fungsi gen yang penting dan sering menyebabkan penyakit, kegagalan perkembangan, atau kematian dini. Mutasi pada gen yang mengkode protein CFTR menyebabkan sistik fibrosis, yang mengganggu fungsi pernapasan dan pencernaan.

▷ **Mutasi Netral**

Mutasi ini tidak memiliki dampak langsung pada kemampuan organisme untuk bertahan hidup atau berkembang biak. Sebagian besar mutasi yang terjadi bersifat netral. Seperti mutasi silent yang tidak mengubah urutan asam amino dalam suatu protein.

## **Kelainan pada Manusia Akibat Mutasi**

Mutasi pada kromosom manusia dapat menyebabkan berbagai kelainan genetik, terutama terkait dengan jumlah dan struktur kromosom. Kelainan ini terjadi ketika terjadi aneuploid, yaitu perubahan jumlah kromosom yang menyebabkan kelebihan atau kekurangan kromosom tertentu. Kelainan-kelainan ini memengaruhi perkembangan fisik dan mental, serta fungsi organ-organ tubuh.

**a. Sindrom Klinefelter**

Sindrom Klinefelter terjadi pada laki-laki yang memiliki satu kromosom X ekstra sehingga kariotipenya menjadi 47,XXY. Ini merupakan bentuk aneuploid pada kromosom seks. Sindrom ini mempengaruhi perkembangan seksual laki-laki, tetapi banyak penderita bisa menjalani kehidupan yang cukup normal dengan terapi hormon dan perawatan medis yang tepat. Ciri-cirinya adalah kemandulan, testis kecil, produksi testosteron rendah, payudara membesar (ginekomastia), dan tubuh tinggi kurus. Beberapa penderita juga mengalami kesulitan belajar atau gangguan bahasa.

**b. Sindrom Turner**

Sindrom Turner adalah kondisi di mana perempuan hanya memiliki satu kromosom X (45,X) alih-alih dua kromosom seks (XX). Ini adalah bentuk monosomi yang terjadi pada kromosom seks. Perempuan dengan sindrom Turner tidak mengalami perkembangan seksual yang normal dan tidak memiliki ovarium yang berfungsi. Terapi hormon dapat membantu menangani beberapa gejala. Ciri-cirinya adalah kemandulan, tinggi badan rendah, leher berselaput, dan gangguan pada perkembangan seksual. Beberapa penderita memiliki masalah jantung atau ginjal.

**c. Sindrom XXX (Wanita Super)**

Sindrom Triple X terjadi pada perempuan yang memiliki tiga kromosom X (47,XXX) alih-alih dua. Ini adalah bentuk aneuploid ringan yang biasanya tidak menunjukkan gejala signifikan. Sebagian besar perempuan dengan sindrom Triple X menjalani kehidupan normal tanpa masalah kesehatan yang serius. Beberapa perempuan dengan kondisi ini mungkin lebih tinggi dari rata-rata, memiliki keterlambatan bicara, atau kesulitan belajar, tetapi banyak yang tidak menunjukkan gejala fisik atau mental yang jelas.

**d. Sindrom Jacob**

Sindrom Jacob terjadi pada laki-laki yang memiliki dua kromosom Y (47,XYY). Ini adalah bentuk aneuploid yang melibatkan kromosom seks. Sebagian besar laki-laki dengan sindrom Jacob tidak mengalami masalah kesehatan yang serius dan dapat hidup normal. Ciri-cirinya adalah Tinggi badan lebih tinggi dari rata-rata, jerawat yang parah selama masa remaja, dan keterlambatan bicara atau kesulitan belajar. Beberapa penelitian menunjukkan peningkatan risiko masalah perilaku, meskipun banyak penderita tidak mengalami masalah signifikan.

**e. Sindrom Y**

Sindrom Y adalah kelainan genetik yang terjadi pada laki-laki dengan dua kromosom Y atau kelebihan materi kromosom Y. Kondisi ini cukup langka dan mempengaruhi perkembangan fisik dan mental. Gejala dapat bervariasi, tetapi biasanya mencakup tinggi badan di atas rata-rata, masalah perilaku, dan kesulitan belajar. Kondisi ini tidak selalu menyebabkan masalah kesehatan serius, meskipun ada peningkatan risiko untuk beberapa kelainan.

**f. Hemafrodit**

Hermafroditisme adalah kelainan yang menyebabkan individu memiliki organ seksual dari kedua jenis kelamin. Dalam hermafroditisme sejati, seseorang memiliki jaringan ovarium dan testis, sementara dalam pseudohermafroditisme, seseorang memiliki alat kelamin eksternal yang tidak sesuai dengan gonad internal. Individu mungkin memiliki alat kelamin ambigu atau campuran antara alat kelamin pria dan wanita. Intervensi medis seringkali diperlukan untuk menentukan jenis kelamin dan menangani gangguan perkembangan seksual.

**g. Sindrom Patau**

Sindrom Patau disebabkan oleh adanya salinan ekstra dari kromosom 13 (trisomi 13). Ini adalah salah satu kelainan genetik paling serius. Sebagian besar bayi yang lahir dengan sindrom Patau meninggal pada tahun pertama kehidupan mereka karena komplikasi berat. Ciri-cirinya adalah Keterbelakangan mental yang parah, kelainan fisik, seperti bibir sumbing, polidaktili (jari berlebih), cacat jantung, dan perkembangan otak yang tidak sempurna.

**h. Sindrom Edward**

Sindrom Edward disebabkan oleh adanya salinan ekstra dari kromosom 18 (trisomi 18). Kondisi ini juga sangat serius dan biasanya berakibat fatal. Sebagian besar bayi dengan sindrom Edward meninggal pada beberapa bulan pertama kehidupannya, meskipun ada beberapa kasus yang bertahan lebih

lama dengan perawatan intensif. Bayi dengan sindrom ini memiliki kelainan jantung, kelainan ginjal, kelainan pada bentuk tangan dan kaki, serta keterlambatan pertumbuhan.

i. **Sindrom Down**

Sindrom Down adalah kelainan genetik yang disebabkan oleh salinan ekstra dari kromosom 21 (trisomi 21). Ini adalah kelainan kromosom yang paling umum. Sebagian besar individu dengan sindrom Down dapat menjalani kehidupan yang sehat dengan perawatan medis yang tepat, meskipun mereka memiliki risiko lebih tinggi terhadap penyakit tertentu, seperti Alzheimer di usia tua. Keterbelakangan mental ringan hingga sedang, ciri wajah khas (mata sipit, hidung datar), serta risiko tinggi terhadap penyakit jantung bawaan dan masalah tiroid.

j. **Sindrom Wolf-Hirschhorn**

Sindrom Wolf-Hirschhorn disebabkan oleh delesi sebagian pada lengan pendek kromosom 4 (4p). Ini adalah kelainan genetik langka yang mengakibatkan gangguan perkembangan yang serius. Bayi yang lahir dengan sindrom Wolf-Hirschhorn sering kali mengalami masalah perkembangan yang parah dan membutuhkan perawatan medis yang intensif seumur hidup. Ciri-Ciri: Pertumbuhan yang sangat lambat, keterbelakangan mental, wajah berbentuk helm Yunani (dahi lebar, hidung kecil), dan cacat jantung bawaan.

### **Contoh Soal**

Bagaimana jenis kelamin anak ditentukan secara genetik dan apa peran sperma dalam proses ini?

**Jawaban:**

Jenis kelamin anak ditentukan oleh kombinasi kromosom seks yang diwariskan dari orang tua, yaitu XX untuk perempuan dan XY untuk laki-laki. Sel telur selalu membawa kromosom X, sedangkan sperma bisa membawa kromosom X atau Y. Oleh karena itu, jenis kelamin anak tergantung pada jenis kromosom yang dibawa oleh sperma.

**Pembahasan:**

Penentuan jenis kelamin terjadi saat proses fertilisasi. Jika sperma membawa kromosom X dan membua sel telur (X), maka anak akan berjenis kelamin perempuan (XX). Namun jika sperma membawa kromosom Y, maka anak yang terbentuk akan berjenis kelamin laki-laki (XY). Dengan demikian, sperma dari ayah yang menentukan jenis kelamin anak.

## Kegiatan Kelompok 2

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan belajar untuk memahami prinsip Hukum Mendel I (Segregasi) dan Hukum Mendel II (Asosiasi Bebas)m, melatih keterampilan menganalisis hasil persilangan genetik sederhana dan menghubungkan teori pewarisan sifat dengan simulasi konkret.

1. Buatlah kelompok yang terdiri dari 4 orang, lalu siapkan alat dan bahan berikut:
2. Bacalah data kasus berikut data 3 generasi tentang pewarisan golongan darah dan kasus keluarga dengan riwayat buta warna atau hemofilia:

### Data 1:

#### Pewarisan Golongan Darah (Tiga Generasi)

##### Keterangan:

Golongan darah ditentukan oleh alel A, B, dan O.

Alel A dan B bersifat dominan, O resesif.

Contoh pasangan dan keturunan:

##### Generasi I:

Kakek: Golongan darah A (genotipe bisa AA atau AO)

Nenek: Golongan darah B (genotipe bisa BB atau BO)

##### Generasi II (Anak-anak mereka):

Anak pertama (laki-laki): Golongan darah AB

Anak kedua (perempuan): Golongan darah O

Anak ketiga (perempuan): Golongan darah B

##### Generasi III:

Anak pertama menikah dengan perempuan bergolongan darah O → punya 2 anak:

Anak laki-laki: Golongan darah A

Anak perempuan: Golongan darah B

### Data 2:

#### Pewarisan Buta Warna (Terkait Kromosom X)

##### Keterangan:

Buta warna disebabkan oleh alel resesif yang terpaut kromosom X.

Laki-laki hanya memiliki satu kromosom X, sehingga jika membawa alel buta warna pasti menampakkan sifat tersebut.

##### Simbol:

$X^N$  = normal

$X^b$  = pembawa buta warna

Y = kromosom laki-laki

##### Generasi I:

Kakek: Normal ( $X^N Y$ )

Nenek: Pembawa buta warna ( $X^N X^b$ )

##### Generasi II (Anak-anak mereka):

Anak pertama (perempuan): Pembawa buta warna ( $X^N X^b$ )

Anak kedua (laki-laki): Buta warna ( $X^b Y$ )

Anak ketiga (laki-laki): Normal ( $X^N Y$ )

##### Generasi III:

Anak perempuan pertama menikah dengan laki-laki normal ( $X^N Y$ ), punya 2 anak:

Anak perempuan: Normal ( $X^N X^N$ )

Anak laki-laki: Buta warna ( $X^b Y$ )

3. Buat diagram silsilah keluarga berdasarkan data tersebut, gunakan simbol standar internasional:
  - ▷  $\square$  = laki-laki
  - ▷  $\circ$  = perempuan
  - ▷  $\bullet/\bullet$  = individu yang memiliki sifat/penyakit
  - ▷ Garis penghubung untuk perkawinan dan keturunan
4. Tentukan pola pewarisan sifat dominan atau resesif
5. Diskusikan kemungkinan genotipe setiap individu berdasarkan informasi yang tersedia serta, prediksi peluang keturunan berikutnya mewarisi sifat tersebut
6. Diskusikan pertanyaan berikut:
  - ▷ Apa manfaat diagram silsilah dalam dunia medis dan genetika?
  - ▷ Mengapa penting mengetahui pola pewarisan suatu sifat atau penyakit?
  - ▷ Bagaimana diagram silsilah dapat digunakan untuk konsultasi genetika keluarga?

## Rangkuman

Bab ini membahas secara komprehensif konsep-konsep pewarisan sifat yang mencakup materi genetik, pola-pola hereditas, dan kelainan genetik akibat mutasi.

### a. Materi Genetik

Pewarisan sifat pada makhluk hidup bergantung pada kromosom, gen, dan DNA, yang bertindak sebagai pembawa informasi genetik. Dalam bab ini, kita memahami bagaimana struktur kromosom, peran gen dan alel, serta replikasi DNA menjadi dasar dari transmisi sifat-sifat turun-temurun.

### b. Pola Pewarisan

Hukum Mendel menjelaskan pola dasar pewarisan sifat melalui persilangan monohibrid dan dihibrid. Selain itu, fenomena seperti kodominansi, dominansi tidak sempurna, alel ganda, dan tautan seks memperluas pemahaman kita tentang variasi pewarisan genetik yang lebih kompleks.

### c. Mutasi Genetik

Bab ini juga menjelaskan mutasi sebagai perubahan materi genetik, yang dapat terjadi akibat faktor alami atau buatan. Mutagen fisik, kimia, dan biologis dijelaskan sebagai penyebab utama mutasi. Kelainan seperti Sindrom Klinefelter, Sindrom Turner, dan Sindrom Down adalah hasil dari mutasi kromosom yang mengganggu keseimbangan genetik pada manusia.

### d. Kelainan Genetik

Kelainan genetik yang diakibatkan oleh mutasi menyoroti pentingnya pemahaman mendalam tentang genetika dalam diagnosis dan pengobatan berbagai penyakit turunan. Pemahaman akan mutasi penting dalam dunia medis, baik untuk mencegah, mendiagnosis, maupun mengembangkan terapi untuk gangguan genetik.

## Latihan Soal

1. Struktur yang membawa informasi genetik dalam inti sel dan terdiri dari DNA yang terorganisasi disebut...
  - a. Ribosom
  - b. Gen
  - c. Kromosom
  - d. Alel
  - e. Sentrosom
2. Pernyataan yang tepat tentang perbedaan antara gen dan alel adalah...
  - a. Gen adalah variasi dari alel yang menentukan sifat alternatif
  - b. Alel adalah bagian dari gen yang selalu dominan
  - c. Gen menentukan sifat umum, sedangkan alel menentukan variasinya
  - d. Gen hanya terdapat pada kromosom seks, sedangkan alel tidak
  - e. Alel dan gen tidak saling memengaruhi dalam pewarisan sifat
3. Dalam persilangan dihibrid menurut hukum Mendel, rasio fenotip F2 yang dihasilkan adalah...
  - a. 1:2:1
  - b. 3:1
  - c. 9:3:3:1
  - d. 1:1:1:1
  - e. 1:3:3:9
4. Fenomena ketika dua alel berbeda dari gen yang sama-sama diekspresikan dalam fenotipe disebut...
  - a. Dominansi penuh
  - b. Dominansi tidak sempurna
  - c. Kodominansi
  - d. Epistasis
  - e. Tautan gen
5. Jenis mutasi yang terjadi akibat perubahan satu pasangan basa nitrogen pada DNA disebut...
  - a. Mutasi kromosom
  - b. Delesi
  - c. Mutasi titik

- d. Duplikasi
  - e. Translokasi
6. Sindrom Turner ditandai dengan...
- a. Penambahan kromosom pada pasangan autosom ke-21
  - b. Kehilangan satu kromosom seks X pada wanita
  - c. Adanya kromosom X tambahan pada pria
  - d. Duplikasi gen tertentu di kromosom 18
  - e. Perpindahan kromosom ke pasangan nonhomolog
7. Berikut ini merupakan contoh mutagen yang bersifat fisik, kecuali...
- a. Sinar ultraviolet
  - b. Radiasi gamma
  - c. Zat formaldehida
  - d. Sinar-X
  - e. Radiasi radioaktif

**Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!**



## Referensi

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2014). Molecular Biology of the Cell. 6th ed. New York: Garland Science.
- Brooker, R. J. (2017). Genetics: Analysis and Principles. 6th ed. New York: McGraw-Hill.
- Burke, T., & Bonduriansky, R. (2016). The paradox of genetic variance in life-history traits. *Nature Ecology & Evolution*, 1(3), 173-179.
- Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B., & Doebley, J. (2020). An Introduction to Genetic Analysis. 12th ed. New York: W. H. Freeman.
- Harris, H. (1966). Enzyme polymorphisms in man. *Proceedings of the Royal Society B*, 164(995), 298-310.
- King, R. C., Stansfield, W. D., & Mulligan, P. K. (2006). A Dictionary of Genetics. 7th ed. New York: Oxford University Press.
- Lupski, J. R. (2010). Genomic disorders: molecular mechanisms for rearrangements and conveyed phenotypes. *PLoS Genetics*, 6(12), e1001242.
- Mange, E. J., & Mange, A. P. (1999). Basic Human Genetics. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates.
- Pierce, B. A. (2019). Genetics: A Conceptual Approach. 7th ed. New York: W. H. Freeman.
- Strachan, T., & Read, A. P. (2018). Human Molecular Genetics. 5th ed. New York: Garland Science.
- Venter, J. C., Adams, M. D., Myers, E. W., et al. (2001). The sequence of the human genome. *Science*, 291(5507), 1304-1351.
- Watson, J. D., Baker, T. A., Bell, S. P., Gann, A., Levine, M., & Losick, R. (2013). Molecular Biology of the Gene. 7th ed. San Francisco: Pearson Education.
- Weaver, R. F. (2011). Molecular Biology. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
- Wolpert, L., Tickle, C., Arias, A. M., & Martinez Arias, A. (2015). Principles of Development. 5th ed. Oxford: Oxford University Press.
- Zoghbi, H. Y., & Warren, S. T. (2010). Mechanisms of disease: new insights into fragile X syndrome and related disorders. *Nature Reviews Genetics*, 11(10), 739-750

## BAB 3:

# PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN MAKHLUK HIDUP

### Karakter Pelajar Pancasila

#### ▷ Beriman, Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa, dan Berakhlaq Mulia

Menghargai proses pertumbuhan dan perkembangan makhluk hidup dan menggunakan ilmu pengetahuan untuk memahami dan memelihara keseimbangan kehidupan.

#### ▷ Bernalar Kritis

Menganalisis perbedaan antara pertumbuhan dan perkembangan pada makhluk hidup.

### Tujuan Pembelajaran: Menjelajahi Keharmonisan dalam Tubuh!

#### 1. Menganalisis Pertumbuhan dan Perkembangan Makhluk Hidup

- ▷ Memahami definisi pertumbuhan dan perkembangan pada makhluk hidup.
- ▷ Mengidentifikasi perbedaan antara pertumbuhan dan perkembangan.
- ▷ Menjelaskan mekanisme pertumbuhan dan perkembangan pada berbagai jenis makhluk hidup.

#### 2. Menjelaskan Proses Fisiologi pada Tumbuhan

- ▷ Menguraikan proses perkecambahan pada tumbuhan.
- ▷ Menjelaskan pertumbuhan primer dan bagaimana hal itu mempengaruhi tinggi tumbuhan.
- ▷ Mengidentifikasi pertumbuhan sekunder dan perannya dalam pembesaran batang tumbuhan.



**Kata Kunci:** Pertumbuhan & Perkembangan Makhluk Hidup, Faktor Internal & Eksternal.

### **3. Mendeskripsikan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Tumbuhan**

- ▷ Menguraikan faktor internal dan eksternal yang mempengaruhi pertumbuhan.
- ▷ Menganalisis bagaimana faktor-faktor tersebut berinteraksi dalam proses pertumbuhan.

### **4. Merancang dan Melakukan Eksperimen tentang Faktor Eksternal pada Pertumbuhan Tumbuhan**

- ▷ Mengidentifikasi variable-variabel eksternal yang mempengaruhi pertumbuhan tumbuhan.
- ▷ Merancang percobaan untuk menguji pengaruh faktor-faktor tersebut.
- ▷ Mengumpulkan dan menganalisis data hasil eksperimen.

### **5. Menganalisis Tahapan Pertumbuhan dan Perkembangan pada Hewan dan Manusia**

- ▷ Mengidentifikasi tahapan pertumbuhan dari zigot hingga dewasa pada hewan dan manusia.
- ▷ Menjelaskan proses perkembangan organ dan jaringan pada setiap tahap kehidupan.
- ▷ Menguraikan faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan hewan dan manusia.

F I T R I



## 1. Menggali Konsep Dasar: Apa itu Pertumbuhan dan Perkembangan Makhluk Hidup

### Pengertian Pertumbuhan dan Perkembangan Makhluk Hidup

Pertumbuhan dan perkembangan adalah dua proses penting dalam kehidupan makhluk hidup yang saling berkaitan, namun memiliki perbedaan yang signifikan. Keduanya berperan dalam transformasi organisme dari bentuk yang lebih sederhana menuju struktur yang lebih kompleks dan fungsional. Mari kita bahas definisi dan perbedaan antara pertumbuhan dan perkembangan serta faktor-faktor yang mempengaruhi kedua proses ini.



### Definisi Pertumbuhan

Pertumbuhan adalah proses peningkatan ukuran dan massa suatu organisme yang diakibatkan oleh penambahan jumlah sel atau pembesaran ukuran sel. Pertumbuhan biasanya bersifat kuantitatif, artinya dapat diukur, seperti dengan mengukur panjang batang tumbuhan atau berat tubuh hewan. Pertumbuhan dapat terlihat dalam peristiwa seperti pembesaran daun pada tumbuhan, pertambahan tinggi badan pada manusia, atau penambahan volume tubuh pada hewan. Pada tumbuhan, pertumbuhan dapat dilihat ketika sebuah kecambah mulai berkembang menjadi tumbuhan muda, di mana batangnya memanjang dan daunnya semakin besar. Pada manusia, pertumbuhan terjadi sejak masa kanak-kanak hingga dewasa, terlihat dari bertambahnya tinggi dan berat badan.

### Definisi Perkembangan

Perkembangan adalah proses perubahan kualitas atau diferensiasi sel yang mengarah pada peningkatan kompleksitas dan fungsi organisme. Perkembangan bersifat kualitatif, mencakup perubahan struktur dan fungsi sel, jaringan, hingga organ. Proses ini melibatkan pembentukan berbagai bagian tubuh yang kemudian bekerja sama untuk mendukung kehidupan makhluk hidup secara lebih efisien. Pada tumbuhan, perkembangan bisa dilihat ketika jaringan daun mengalami diferensiasi menjadi berbagai tipe sel yang berbeda, seperti sel stomata untuk pertukaran gas dan sel mesofil untuk fotosintesis. Pada manusia, perkembangan terjadi saat organ-organ tubuh terbentuk dan mulai berfungsi, misalnya perkembangan otak dan sistem saraf pada janin yang memungkinkan koordinasi fungsi tubuh setelah lahir. Berikut tabel perbandingan antara pertumbuhan dan perkembangan.

**Tabel pertumbuhan dan perkembangan**

Aspek	Pertumbuhan	Perkembangan
<b>Definisi</b>	Proses peningkatan ukuran dan massa akibat penambahan jumlah atau ukuran sel.	Proses perubahan menuju struktur dan fungsi yang lebih kompleks, mencakup diferensiasi sel dan organ
<b>Sifat</b>	Kuantitatif (dapat diukur, misalnya dengan panjang, berat, atau volume).	Kualitatif (berkaitan dengan perubahan fungsi atau struktur yang tidak selalu dapat diukur).
<b>Contoh</b>	Batang tumbuhan memanjang, penambahan tinggi badan pada manusia.	Pembentukan bunga pada tumbuhan, diferensiasi organ tubuh pada janin manusia.
<b>Kapan Terjadi</b>	Terjadi sepanjang hidup organisme, namun cenderung melambat atau berhenti saat dewasa.	Terjadi sepanjang hidup, terutama pada tahap awal kehidupan, namun dapat terus berlanjut pada beberapa fungsi.
<b>Permanen atau sementara</b>	Bersifat permanen, misalnya pertambahan ukuran tubuh tidak akan berkurang setelah tercapai	Bersifat permanen dalam hal perubahan struktur dan fungsi, tetapi dapat melibatkan perubahan berkelanjutan
<b>Tipe Proses</b>	Proses fisik yang dapat dilihat atau diukur secara langsung.	Proses fisiologis dan psikologis, melibatkan perubahan fungsi atau adaptasi sel dan organ.
<b>Dampak Lingkungan</b>	Faktor lingkungan (seperti nutrisi dan cahaya) berpengaruh langsung pada laju pertumbuhan.	Lingkungan mempengaruhi perkembangan, namun proses ini juga sangat dipengaruhi oleh faktor genetik dan hormon
<b>Organisme</b>	Terjadi pada semua makhluk hidup, termasuk tumbuhan, hewan, dan manusia	Terjadi pada semua makhluk hidup, termasuk tumbuhan, hewan, dan manusia.

## Faktor Internal

Faktor internal yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan makhluk hidup mencakup faktor-faktor yang berasal dari dalam tubuh organisme itu sendiri, terutama faktor genetik dan hormon. Genetik menentukan potensi dasar pertumbuhan, seperti tinggi maksimum seseorang atau jenis kelamin, yang kemudian akan mengarahkan bagaimana organisme tersebut tumbuh dan berkembang. Selain itu, hormon memainkan peran penting dalam mengatur proses ini. Misalnya, pada tumbuhan, hormon seperti auxin dan gibberellin berperan dalam merangsang pemanjangan batang dan pembentukan bunga. Pada hewan dan manusia, hormon pertumbuhan (GH) dan hormon tiroid mempengaruhi perkembangan otot, tulang, dan sistem metabolisme.

## Faktor Eksternal

Faktor eksternal adalah semua elemen dari lingkungan sekitar yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan makhluk hidup. Faktor-faktor ini meliputi ketersediaan nutrisi, cahaya, air, suhu, dan

kelembaban. Pada tumbuhan, misalnya, keberadaan cahaya sangat penting dalam proses fotosintesis yang mendukung pertumbuhan. Sementara itu, pada hewan, faktor seperti pola makan dan kondisi lingkungan juga sangat menentukan proses pertumbuhan. Sebagai contoh, anak-anak yang mendapatkan nutrisi cukup dari makanan cenderung mengalami pertumbuhan yang optimal, sedangkan kekurangan nutrisi dapat menghambat pertumbuhan mereka. Faktor eksternal lainnya seperti kondisi tanah untuk tumbuhan, atau pola aktivitas fisik untuk hewan dan manusia, juga berperan besar dalam membentuk proses pertumbuhan dan perkembangan setiap organisme.

### **Contoh Soal**

Jelaskan perbedaan utama antara pertumbuhan dan perkembangan pada makhluk hidup serta satu contoh untuk masing-masing!

#### **Jawaban:**

Pertumbuhan adalah peningkatan ukuran dan massa tubuh yang dapat diukur secara kuantitatif, seperti bertambahnya tinggi badan. Sementara itu, perkembangan adalah perubahan struktur dan fungsi yang bersifat kualitatif, seperti pembentukan organ tubuh. Contoh pertumbuhan adalah memanjangnya batang pada tumbuhan, sedangkan contoh perkembangan adalah diferensiasi sel pada embrio menjadi organ tubuh.

#### **Pembahasan:**

Perbedaan utama terletak pada sifatnya: pertumbuhan bersifat fisik dan dapat diukur, sedangkan perkembangan mencakup perubahan fungsi dan struktur yang lebih kompleks. Keduanya penting dan saling berkaitan dalam proses kehidupan makhluk hidup



## 2. Keajaiban Hijau: Bagaimana Tumbuhan Tumbuh dan Berkembang

Pertumbuhan dan perkembangan pada tumbuhan melibatkan proses yang kompleks, dimulai sejak tahap biji hingga tumbuhan dewasa yang mampu bereproduksi. Proses ini mencakup pembelahan sel, perkembangan sel, diferensiasi sel, dan juga peran penting dari endosperma dalam mendukung pertumbuhan awal embrio tumbuhan. Setiap langkah berkontribusi pada pembentukan struktur yang lebih kompleks dan fungsional, memastikan tumbuhan dapat tumbuh dengan sempurna. Sebelum proses pembelahan, perkembangan, dan diferensiasi sel terjadi, ada satu komponen kunci dalam biji yang memainkan peran vital dalam mendukung pertumbuhan embrio, yaitu endosperma. Endosperma adalah jaringan penyimpan cadangan makanan di dalam biji, yang menyediakan nutrisi penting bagi embrio saat berkecambah. Pada sebagian besar tumbuhan berbunga (Angiospermae), endosperma mengandung zat-zat seperti pati, protein, dan minyak yang menjadi sumber energi bagi tumbuhan muda sebelum mampu melakukan fotosintesis sendiri.



### Pembelahan Sel

Pembelahan sel adalah proses awal yang sangat penting dalam pertumbuhan tumbuhan. Proses ini terjadi terutama di daerah meristem, yaitu jaringan di ujung akar dan pucuk batang, yang bertanggung jawab atas pertumbuhan primer. Melalui pembelahan mitosis, sel-sel baru dihasilkan dan diorganisasikan secara cepat, memungkinkan tumbuhan untuk menambah jumlah sel yang membentuk jaringan tubuhnya. Pembelahan ini mengacu pada replikasi seluler di mana satu sel induk membelah menjadi dua sel anak yang identik secara genetik, menjaga jumlah kromosom tetap sama.

### Perkembangan Sel

Setelah pembelahan sel terjadi, sel-sel baru yang terbentuk akan mengalami perkembangan lebih lanjut. Perkembangan ini meliputi pembesaran sel, perubahan bentuk, dan akumulasi komponen-komponen seluler yang diperlukan untuk fungsi tertentu. Sel-sel yang baru terbentuk akan menyerap air, meningkatkan volume sitoplasma, dan memperbesar ukuran keseluruhan sel.

### Diferensiasi Sel

Diferensiasi sel adalah proses di mana sel-sel yang sudah terbentuk melalui pembelahan dan berkembang mulai mengambil fungsi khusus untuk menjadi bagian dari jaringan atau organ tertentu. Dalam proses ini, sel-sel memperoleh karakteristik khusus yang membuat mereka mampu menjalankan fungsi yang lebih spesifik. Diferensiasi ini penting dalam pembentukan jaringan seperti jaringan vaskular (xilem dan floem), jaringan epidermis, atau jaringan mesofil di daun.

## Struktur Biji

Biji adalah tahap penting dalam siklus hidup tumbuhan, berfungsi sebagai unit reproduksi dan penyimpanan energi. Struktur biji sangat bervariasi tergantung pada jenis tumbuhan, namun secara umum, biji terdiri dari beberapa komponen utama yang mendukung pertumbuhan embrio menjadi tumbuhan muda.

### a. Komponen Utama Biji

Secara garis besar, komponen utama dibagi menjadi tiga, yaitu embrio, cadangan makanan, dan testa (kulit biji).

#### ▷ Embrio

Bagian inti biji yang akan berkembang menjadi tumbuhan baru. Embrio ini merupakan hasil pembuahan sel telur oleh serbuk sari dan memiliki bagian-bagian dasar seperti plumula (bakal tunas), radikula (bakal akar), dan kotiledon (daun embrio).

#### ▷ Cadangan Makanan

Embrio membutuhkan sumber energi untuk tumbuh sebelum dapat menghasilkan makanan sendiri melalui fotosintesis. Cadangan makanan ini biasanya tersimpan dalam dua bentuk:

- Endosperma, jaringan penyimpanan yang kaya akan nutrisi seperti pati, protein, dan minyak, memberikan energi selama perkecambahan.
- Pada beberapa tumbuhan, endosperma diserap oleh kotiledon sebelum biji matang, sehingga kotiledon berfungsi sebagai sumber nutrisi.

#### ▷ Testa (Kulit Biji)

Kulit luar biji ini berfungsi melindungi embrio dan cadangan makanan dari kondisi lingkungan yang buruk seperti kekeringan, benturan, atau serangan organisme patogen. Testa memiliki kekuatan bervariasi tergantung jenis biji.

Dua bagian kecil tambahan yang sering terdapat pada biji adalah hilum, yang merupakan bekas tempat biji melekat pada buah, dan mikropil, lubang kecil tempat air masuk untuk memicu perkecambahan.

### b. Struktur Biji Berdasarkan Jumlah Kotiledon

Kotiledon merupakan daun embrionik pertama yang terdapat dalam biji tanaman dan berfungsi sebagai organ cadangan makanan. Kotiledon terbentuk bersamaan dengan akar dan tunas tanaman selama proses embriogenesis. Struktur biji dibagi menjadi dua, yaitu monokotil dan dikotil.

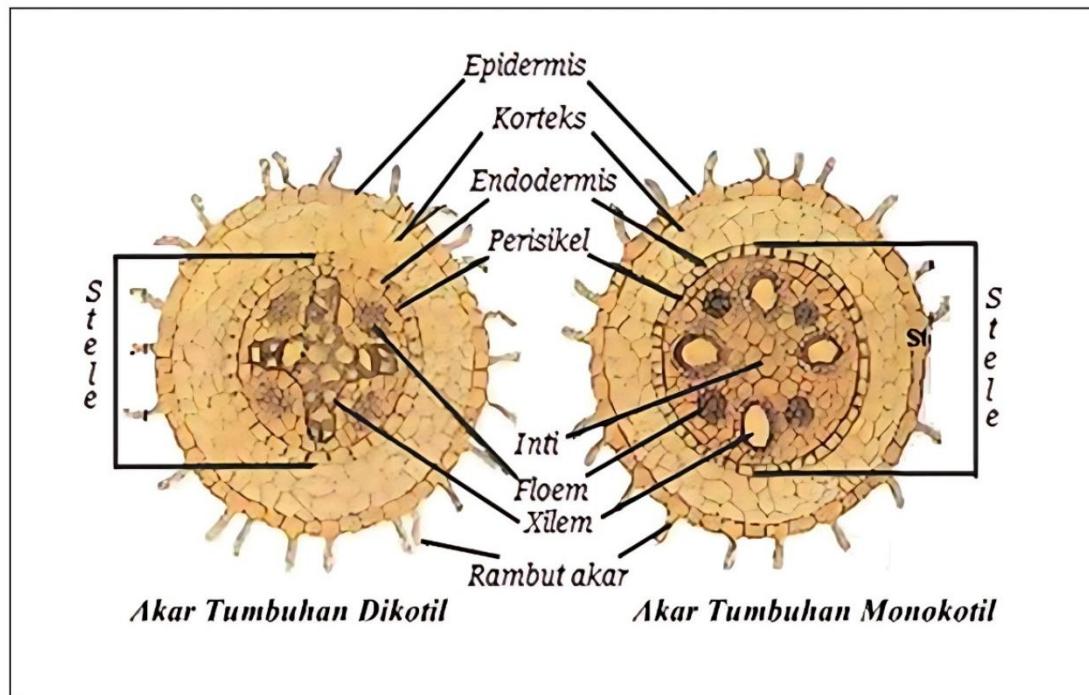
#### ▷ Dikotil

Biji tumbuhan dikotil memiliki dua kotiledon yang berperan penting dalam perkecambahan dan pertumbuhan awal. Kotiledon pada biji dikotil sering kali menyimpan cadangan makanan yang diserap dari endosperma. Setelah berkecambah, kotiledon berfungsi sebagai sumber nutrisi sementara bagi embrio, sampai tumbuhan muda bisa melakukan fotosintesis.

#### ▷ Monokotil

Biji tumbuhan monokotil hanya memiliki satu kotiledon. Pada tumbuhan monokotil, kotiledon memiliki fungsi yang berbeda dibandingkan pada dikotil. Alih-alih menyimpan nutrisi, kotiledon

bertugas menyerap nutrisi dari endosperma. Endosperma pada biji monokotil tetap ada selama proses perkecambahan dan menyediakan energi bagi tumbuhan muda.



Struktur biji dikotil dan monokotil – ipacenters.blogspot.com

**Tabel perbandingan dikotil dan monokotil**

Aspek	Dikotil	Monokotil
<b>Jumlah Kotiledon</b>	Dua kotiledon	Satu kotiledon
<b>Fungsi Kotiledon</b>	Penyimpan cadangan makanan	Menyerap nutrisi dari endosperma
<b>Keberadaan Endosperma</b>	Endosperma biasanya diserap sepenuhnya oleh kotiledon	Endosperma tetap ada dan menyediakan nutrisi saat berkecambah
<b>Akar Embrio (Radikula)</b>	Menghasilkan akar tunggang (akar utama)	Menghasilkan akar serabut
<b>Daun Sejati</b>	Daun dengan tulang daun menyirip atau menjari	Daun dengan tulang daun sejajar atau melengkung
<b>Susunan Vaskular Batang</b>	Beraturan dalam bentuk cincin, xilem dan floem teratur	Tersebar secara acak, xilem dan floem tersebar di seluruh batang

<b>Tipe Bunga</b>	Bunga dengan jumlah bagian kelipatan empat atau lima	Bunga dengan jumlah bagian kelipatan tiga
<b>Pertumbuhan Primer</b>	Menghasilkan pertumbuhan batang dan akar dari meristem apikal (ujung)	Juga tumbuh dari meristem apikal, tetapi dengan pola pertumbuhan serabut
<b>Pertumbuhan Sekunder</b>	Ada pada banyak spesies, memungkinkan batang dan akar membesar (kambium vaskular aktif)	Biasanya tidak ada, batang tidak membesar
<b>Akar Dewasa</b>	Akar tunggang dominan dengan cabang-cabang akar lateral	Akar serabut, semua akar hampir sama ukurannya
<b>Contoh Tumbuhan</b>	Kacang polong, bunga matahari, apel, mawar	Jagung, padi, gandum, anggrek
<b>Pembelahan Sel Pada Batang</b>	Mempunyai kambium yang membentuk lingkaran pertumbuhan sekunder	Tidak memiliki kambium, tidak terjadi pertumbuhan sekunder
<b>Jenis Pembuluh Angkut</b>	Xilem dan floem terletak bersebelahan dalam pola cincin	Xilem dan floem tersebar tanpa pola khusus
<b>Testa (Kulit Biji)</b>	Biasanya tebal dan lebih keras	Kulit biji biasanya lebih tipis
<b>Perkecambahan</b>	Umumnya epigeal (kotiledon muncul ke atas permukaan tanah)	Umumnya hipogeal (kotiledon tetap berada di bawah tanah)

Penjelasan tambahan tentang beberapa aspek:

- Akar Embrio dan Akar Dewasa: Pada dikotil, radikula berkembang menjadi akar utama (akar tunggang) yang lebih besar dan menjadi sistem akar yang dominan, sedangkan pada monokotil, radikula akan mati setelah beberapa saat dan digantikan oleh akar serabut yang memiliki ukuran seragam.
- Susunan Vaskular Batang: Pada tumbuhan dikotil, jaringan vaskular (xilem dan floem) tersusun dalam pola melingkar, memungkinkan tumbuhan untuk mengalami pertumbuhan sekunder (membesar). Pada monokotil, jaringan vaskular tersebar di seluruh batang, membuatnya lebih fleksibel namun tidak memungkinkan pertumbuhan sekunder.
- Tipe Bunga: Bunga tumbuhan dikotil biasanya memiliki bagian-bagian bunga (kelopak, mahkota) yang berjumlah kelipatan empat atau lima, sementara bunga tumbuhan monokotil biasanya memiliki bagian-bagian bunga yang berjumlah kelipatan tiga.
- Pertumbuhan Sekunder: Tumbuhan dikotil sering kali mengalami pertumbuhan sekunder, di mana batang dan akar dapat membesar dari waktu ke waktu karena adanya aktivitas kambium (jaringan meristematik yang aktif membelah), yang tidak terjadi pada kebanyakan tumbuhan monokotil.

- Perkecambahan: Pada dikotil, perkecambahan sering bersifat epigeal, di mana kotiledon muncul ke permukaan tanah. Sedangkan pada monokotil, perkecambahan biasanya hipogeal, di mana kotiledon tetap berada di bawah tanah dan tidak muncul ke permukaan.

## Proses Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan

Pertumbuhan dan perkembangan pada tumbuhan adalah proses berkelanjutan yang dimulai sejak biji berkecambah hingga tumbuhan mencapai kedewasaan dan menghasilkan keturunan baru. Proses ini melibatkan berbagai mekanisme biologis yang memungkinkan tumbuhan untuk tumbuh, memanjangkan akar dan batang, membentuk daun, dan beradaptasi terhadap lingkungan sekitarnya. Proses ini dapat dibagi menjadi tiga tahapan utama: perkecambahan, pertumbuhan primer, dan pertumbuhan sekunder. Ketiga fase ini bekerja secara bertahap, membantu tumbuhan meningkatkan ukuran, kompleksitas, dan kemampuan bertahan hidup di lingkungannya.

### a. Perkecambahan

Perkecambahan adalah proses awal di mana biji yang dorman (tidak aktif) berubah menjadi tumbuhan muda setelah dipicu oleh kondisi lingkungan yang tepat, seperti kelembaban, suhu, dan ketersediaan oksigen. Proses ini dimulai dengan penyerapan air oleh biji (imbibisi), yang menyebabkan biji membengkak dan mengaktifkan embrio di dalamnya. Radikula (bakal akar) adalah bagian pertama yang tumbuh keluar dari biji, diikuti oleh plumula (bakal batang dan daun).

#### ▷ Fisiologi Perkecambahan

Fisiologi perkecambahan merupakan serangkaian proses biokimia yang kompleks yang dimulai ketika biji menyerap air, sebuah tahap yang dikenal sebagai imbibisi. Berikut adalah proses perkecambahan secara keseluruhan.

- **Imbibisi (Penyerapan Air)**

Proses perkecambahan dimulai ketika biji menyerap air dari lingkungannya melalui mikropil atau langsung melalui permukaan kulit biji. Penyerapan air ini mengakibatkan biji membengkak, dan tekanan internal yang meningkat menyebabkan kulit biji (testa) retak, memfasilitasi keluarnya radikula. Proses imbibisi ini penting karena air mengaktifkan enzim-enzim dalam biji yang memecah cadangan makanan, seperti pati dan protein, menjadi bentuk yang lebih sederhana (glukosa dan asam amino) yang dapat digunakan oleh embrio.

- **Aktivitas Enzim**

Setelah imbibisi, serangkaian enzim, termasuk amilase dan protease, diaktifkan. Enzim amilase memecah pati dalam endosperma atau kotiledon menjadi glukosa yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Enzim protease memecah protein menjadi asam amino yang dibutuhkan untuk membangun struktur sel baru selama pertumbuhan.

- **Respirasi Seluler**

Saat embrio mulai menggunakan cadangan makanan, terjadi peningkatan aktivitas respirasi seluler, yaitu proses metabolisme di mana glukosa diubah menjadi energi dalam bentuk ATP. Energi ini sangat penting untuk mendorong pertumbuhan radikula dan plumula. Pada tahap ini, biji membutuhkan banyak oksigen untuk mendukung respirasi aerobik.

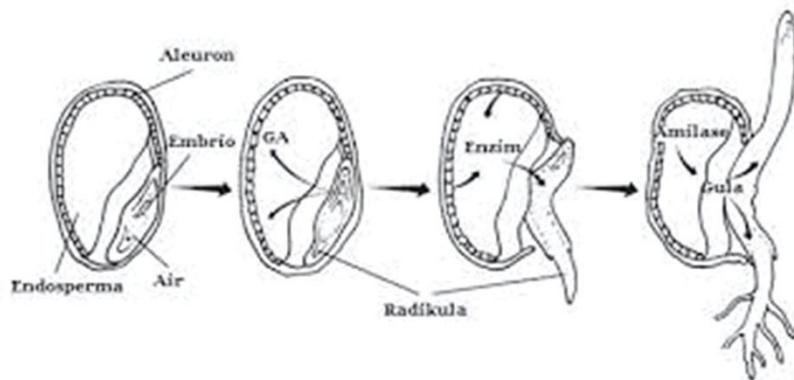
- **Perkembangan Radikula dan Plumula**

Radikula, atau bakal akar, adalah bagian pertama yang tumbuh dari biji, karena akar sangat penting untuk menyerap air dan nutrisi dari tanah. Setelah radikula tumbuh, plumula mulai memanjang dan membentuk batang serta daun muda. Pada tumbuhan dengan

perkecambahan epigeal, kotiledon juga keluar ke permukaan tanah dan membantu fotosintesis awal hingga daun sejati terbentuk.

- **Perubahan Hormon**

Hormon-hormon seperti giberelin dan auksin berperan penting dalam mengatur proses perkecambahan. Giberelin merangsang pertumbuhan embrio dengan meningkatkan pembelahan sel dan memobilisasi cadangan makanan. Auksin mengontrol pertumbuhan radikula dan plumula, membantu orientasi tumbuhan terhadap gravitasi dan cahaya.



Proses perkecambahan – [simpkb.id/guruberbagi/rpp](https://simpkb.id/guruberbagi/rpp) – opensource

▷ **Tipe Perkecambahan**

Proses perkecambahan pada tumbuhan dapat dibedakan menjadi dua tipe utama berdasarkan posisi kotiledon (daun embrio) selama perkembangan awal: perkecambahan epigeal dan perkecambahan hipogeal. Kedua tipe ini memiliki perbedaan mendasar dalam cara tumbuhan memulai fase pertumbuhannya dan bagaimana embrio menggunakan energi cadangan dalam kotiledon untuk mendukung pertumbuhan awal.

- **Epigeal**

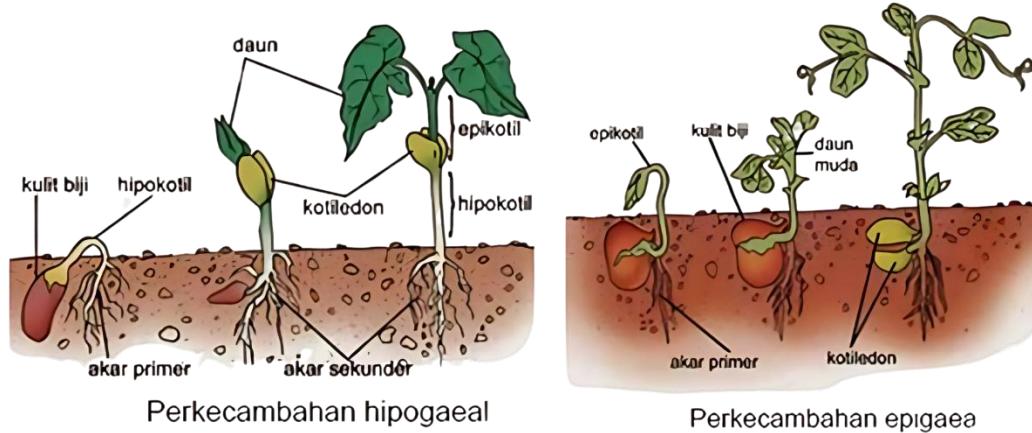
Definisi: Pada perkecambahan epigeal, kotiledon diangkat ke atas permukaan tanah selama proses perkecambahan. Hal ini terjadi karena pemanjangan bagian hipokotil (bagian batang di bawah kotiledon) yang mendorong kotiledon keluar dari tanah. Setelah keluar, kotiledon sering kali berfungsi sebagai daun sementara yang membantu proses fotosintesis hingga daun sejati terbentuk. Tipe perkecambahan ini umum dijumpai pada tumbuhan dikotil seperti kacang polong, kacang merah, dan buncis.

**Contoh:** Pada tumbuhan kacang merah, setelah biji menyerap air dan radikula tumbuh ke bawah membentuk akar, hipokotil memanjang dan mendorong kotiledon ke atas tanah. Kotiledon yang muncul di atas permukaan tanah akan membantu fotosintesis sementara waktu sebelum daun sejati berkembang. Kotiledon kemudian akan layu setelah fungsi utamanya sebagai penyedia energi dan nutrisi berakhir.

- **Hipogeal**

Definisi: Berbeda dengan epigeal, pada perkecambahan hipogeal, kotiledon tetap berada di bawah tanah dan tidak muncul ke permukaan. Hal ini terjadi karena bagian epikotil (bagian batang di atas kotiledon) yang memanjang selama pertumbuhan, bukan hipokotil. Kotiledon dalam tipe perkecambahan ini tetap berada di dalam tanah dan bertindak sebagai penyedia nutrisi bagi embrio hingga tumbuhan muda mampu melakukan fotosintesis melalui daun yang terbentuk di atas tanah.

**Contoh:** Pada tumbuhan seperti jagung dan kacang kapri, setelah radikula muncul dari biji dan mulai menyerap air serta nutrisi dari tanah, epikotil memanjang dan mendorong plumula (bakal batang dan daun) ke permukaan. Selama periode ini, kotiledon tetap di bawah tanah, memberikan cadangan nutrisi pada tumbuhan muda. Setelah daun sejati berkembang dan proses fotosintesis dimulai, kotiledon tidak lagi dibutuhkan dan akan mengering. Perhatikan ilustrasi gambar berikut terkait perkecambahan epigeal dan hipogea.



Ilustrasi perkecambahan hypogea dan epigeal – [kttasarawati.blogspot.com](http://kttasarawati.blogspot.com)

**Tabel Perbandingan Perkecambahan Epigeal dan Hipogea**

Aspek	Perkecambahan Epigeal	Perkecambahan Hipogea
<b>Posisi Kotiledon</b>	Kotiledon muncul di atas permukaan tanah	Kotiledon tetap berada di bawah tanah
<b>Bagian Batang yang Memanjang</b>	Hipokotil (batang di bawah kotiledon) memanjang, mendorong kotiledon ke atas.	Epikotil (batang di atas kotiledon) memanjang, menjaga kotiledon tetap di bawah tanah.
<b>Fungsi Kotiledon</b>	Epikotil (batang di atas kotiledon) memanjang, menjaga kotiledon tetap di bawah tanah.	Hanya berfungsi sebagai penyimpan nutrisi, tidak terlibat dalam fotosintesis
<b>Contoh Tumbuhan</b>	Kacang merah, buncis, kacang tanah, kapuk.	Jagung, kacang kapri, kacang tanah, padi.
<b>Kotiledon dalam Pertumbuhan</b>	Setelah muncul, kotiledon aktif melakukan fotosintesis untuk mendukung tumbuhan muda	Kotiledon tetap di bawah tanah dan hanya menyuplai nutrisi bagi embrio
<b>Energi yang Digunakan</b>	Nutrisi dari kotiledon digunakan lebih cepat karena berfungsi dalam fotosintesis	Nutrisi digunakan secara bertahap hingga daun sejati muncul untuk fotosintesis.
<b>Penampilan pada Fase Awal</b>	Kotiledon terlihat di atas permukaan tanah bersama dengan daun awal	Hanya daun awal yang terlihat di atas tanah; kotiledon tetap tersembunyi

## b. Pertumbuhan Primer

Pertumbuhan primer adalah proses pertumbuhan yang terjadi pada ujung batang dan akar tumbuhan, yang bertanggung jawab atas pemanjangan tumbuhan ke arah cahaya dan air. Proses ini terjadi karena aktivitas meristem apikal, yaitu jaringan tumbuhan yang bersifat meristematik (aktif membelah) di bagian ujung tumbuhan. Melalui pembelahan sel yang terus-menerus, meristem apikal memungkinkan tumbuhan untuk tumbuh lebih tinggi atau lebih panjang, sehingga dapat lebih efektif menyerap cahaya matahari, air, dan nutrisi dari tanah.

Pertumbuhan primer pada tumbuhan dimulai sejak tahap awal perkecambahan dan berlanjut sepanjang hidup tumbuhan, terutama pada tumbuhan yang memiliki siklus hidup tahunan. Proses ini melibatkan tiga zona utama yang terletak di ujung akar dan pucuk batang, di mana pembelahan, pemanjangan, dan pematangan sel terjadi secara berurutan. Setiap zona ini memainkan peran penting dalam memastikan tumbuhan terus tumbuh dan berkembang secara teratur.

### ▷ **Titik Tumbuh Akar**

Titik tumbuh akar merupakan daerah di ujung akar yang bertanggung jawab atas pertumbuhan panjang akar melalui pembelahan sel aktif. Titik tumbuh ini berperan penting dalam memperluas jaringan akar agar tumbuhan dapat lebih efektif menyerap air dan nutrisi dari tanah. Di daerah ini, terdapat meristem apikal yang terdiri dari sel-sel meristematik yang terus membelah, memicu perpanjangan akar.

Titik tumbuh akar terbagi menjadi tiga zona utama: zona pembelahan sel, zona pemanjangan sel, dan zona diferensiasi sel, yang berurutan dari ujung akar ke atas. Setiap zona memiliki fungsi yang berbeda, namun semuanya bekerja bersama untuk memungkinkan akar tumbuh lebih panjang dan fungsional.

- **Zona Pembelahan Sel**

Zona pembelahan sel terletak di bagian paling ujung akar, tepat di belakang tudung akar, yang melindungi sel-sel meristematik dari kerusakan fisik saat menembus tanah. Pada zona ini, sel-sel meristematik aktif membelah secara mitosis, menciptakan sel-sel baru yang akan menjadi dasar bagi pertumbuhan akar. Sel-sel yang dihasilkan di sini adalah sel-sel kecil yang belum berdiferensiasi dan terus berpindah ke zona pemanjangan sel. Meristem apikal di zona ini sangat penting untuk pertumbuhan akar yang berkelanjutan, karena sel-sel baru yang dihasilkan menjadi bagian dari jaringan akar yang berkembang.

- **Zona Pemanjangan Sel**

Di zona pemanjangan sel, sel-sel yang dihasilkan di zona pembelahan mulai memanjang dengan menyerap air melalui proses osmosis. Pemanjangan sel ini yang bertanggung jawab atas pertumbuhan panjang akar, mendorong ujung akar lebih dalam ke dalam tanah. Pada fase ini, sel-sel tidak lagi membelah, melainkan hanya memperbesar ukurannya. Pertumbuhan panjang pada akar sebagian besar terjadi di zona ini, dengan sel-sel meregang secara cepat untuk meningkatkan panjang total akar. Pergerakan air ke dalam vakuola sel menyebabkan sel-sel memanjang, dan ini menjadi kekuatan utama yang mendorong pertumbuhan akar.

- **Zona Diferensiasi Sel (Zona Maturasi)**

Setelah sel-sel melewati zona pemanjangan, mereka masuk ke zona diferensiasi (atau zona maturasi), di mana mereka mulai berdiferensiasi menjadi tipe-tipe sel khusus yang membentuk jaringan fungsional akar. Sel-sel di zona ini berubah menjadi jaringan epidermis, korteks, dan jaringan vaskular (xilem dan floem) yang diperlukan untuk penyerapan air, transportasi nutrisi, serta dukungan struktural. Pada zona ini, akar mulai berfungsi sepenuhnya.

Rambut akar juga berkembang di zona diferensiasi ini, memperluas permukaan akar untuk meningkatkan efisiensi penyerapan air dan mineral dari tanah.

Pertumbuhan primer pada tumbuhan terjadi melalui aktivitas meristem apikal, yang menghasilkan tiga jaringan primer: protoderm, prokambium, dan meristem dasar. Ketiga jaringan ini adalah sumber dari jaringan-jaringan yang membentuk struktur dasar akar, batang, dan daun pada tumbuhan muda. Mereka berdiferensiasi menjadi berbagai tipe jaringan yang berfungsi dalam perlindungan, transportasi, penyimpanan, dan dukungan struktural. Berikut adalah penjelasan tentang ketiga jaringan ini dan perannya dalam pembentukan jaringan primer.

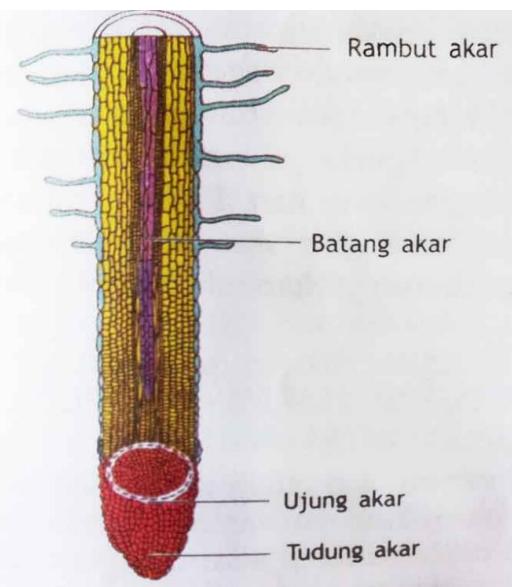
- **Protoderm**

Protoderm adalah jaringan meristematik yang berada di bagian paling luar dari meristem apikal. Jaringan ini berdiferensiasi menjadi epidermis, yaitu lapisan terluar tumbuhan yang berfungsi sebagai pelindung. Epidermis menutupi seluruh permukaan akar, batang, dan daun, berperan penting dalam menjaga keseimbangan air dan melindungi jaringan internal dari serangan patogen atau kerusakan fisik. Epidermis seringkali mengandung sel-sel khusus, seperti stomata (yang memungkinkan pertukaran gas) dan trikoma (rambut-rambut kecil yang membantu mengurangi kehilangan air atau mengusir herbivor). Pada akar, epidermis juga menghasilkan rambut akar yang meningkatkan area permukaan akar untuk penyerapan air dan nutrisi dari tanah.

- **Meristem Dasar**

Meristem dasar adalah jaringan meristematik yang berdiferensiasi menjadi jaringan dasar pada tumbuhan, yaitu parenkim, kolenkim, dan sklerenkim. Jaringan-jaringan ini memiliki berbagai fungsi dalam penyimpanan, fotosintesis, dan dukungan struktural:

- Parenkim: Merupakan jaringan dasar yang paling banyak ditemukan di seluruh bagian tumbuhan. Sel-sel parenkim bersifat fleksibel dan tidak terlalu tebal, berfungsi dalam penyimpanan air dan nutrisi, serta fotosintesis (terutama di daun).
- Kolenkim: Jaringan kolenkim terdiri dari sel-sel yang memberikan dukungan fleksibel pada batang muda dan daun. Dinding selnya lebih tebal di beberapa bagian untuk memperkuat struktur tumbuhan sambil tetap memungkinkan pertumbuhan.
- Sklerenkim: Jaringan sklerenkim lebih kaku dan keras dibandingkan kolenkim, karena mengandung lignin, yang membuatnya sangat kuat. Sklerenkim berfungsi sebagai pendukung utama pada bagian tumbuhan yang sudah berhenti tumbuh, seperti serat pada batang.



Daerah titik tumbuh akar – wandlee.wordpress.com

▷ **Titik Tumbuh Batang**

Titik tumbuh batang merupakan area pertumbuhan aktif pada ujung batang yang memungkinkan batang tumbuhan memanjang ke atas dan cabang-cabang berkembang. Seperti pada akar, titik tumbuh batang mengandung meristem apikal yang terdiri dari sel-sel meristematik yang terus membelah untuk menghasilkan jaringan baru. Pertumbuhan pada titik ini memungkinkan tumbuhan memperluas bagian vegetatifnya, seperti daun dan cabang, untuk meningkatkan fotosintesis dan penyerapan sinar matahari. Titik tumbuh batang, seperti titik tumbuh akar, dapat dibagi menjadi tiga zona: zona pembelahan sel, zona pemanjangan sel, dan zona diferensiasi.

Setiap zona memainkan peran penting dalam memperpanjang batang dan membentuk jaringan-jaringan yang berbeda yang diperlukan untuk fungsi tumbuhan.

- **Zona Pembelahan Sel**

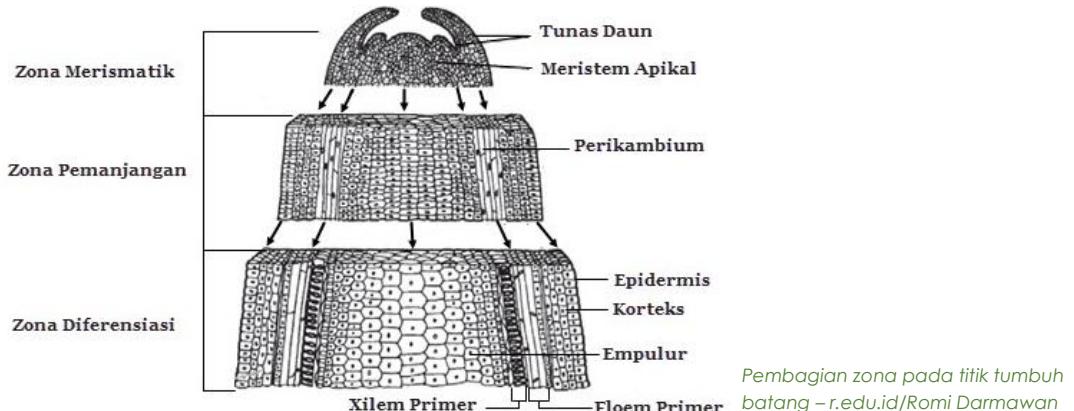
Zona pembelahan sel terletak di bagian paling ujung dari meristem apikal pada batang. Pada zona ini, sel-sel meristematik aktif membelah secara mitosis, menciptakan sel-sel baru yang akan menjadi dasar bagi pertumbuhan batang. Sel-sel yang dihasilkan masih kecil dan belum berdiferensiasi. Aktivitas mitosis yang tinggi di zona ini memungkinkan pertumbuhan vertikal yang berkelanjutan, dengan sel-sel baru yang terus-menerus dihasilkan untuk mendorong pemanjangan batang. Proses ini sangat penting untuk memungkinkan tumbuhan tumbuh lebih tinggi dan mencapai sinar matahari yang diperlukan untuk fotosintesis.

- **Zona Pemanjangan Sel**

Setelah melewati zona pembelahan, sel-sel pindah ke zona pemanjangan sel, di mana mereka menyerap air dan mulai memanjang. Proses pemanjangan ini adalah pendorong utama pertumbuhan tinggi batang. Pada zona ini, sel-sel tidak lagi membelah, tetapi secara aktif memperbesar ukuran mereka melalui penyerapan air dan peningkatan volume vakuola. Pertumbuhan pada zona ini memungkinkan batang memanjang dengan cepat, dan selama proses ini, tumbuhan dapat menyesuaikan pertumbuhannya untuk merespons rangsangan lingkungan, seperti gravitasi (geotropisme) dan cahaya (fototropisme). Pertumbuhan batang ke arah cahaya sangat penting untuk memastikan daun menerima sinar matahari yang cukup untuk mendukung fotosintesis.

- **Zona Diferensiasi Sel (Zona Maturasi)**

Setelah melewati zona pemanjangan, sel-sel memasuki zona diferensiasi, di mana mereka mulai berdiferensiasi menjadi berbagai tipe jaringan yang membentuk struktur batang. Sel-sel di zona ini akan berubah menjadi jaringan khusus seperti:



- Jaringan Epidermis: Yang melindungi batang dari kehilangan air dan patogen.
- Jaringan Vaskular (Xilem dan Floem): Yang berperan dalam transportasi air, mineral, dan nutrisi.
- Jaringan Dasar (Parenkim, Kolenkim, dan Sklerenkim): Yang memberikan dukungan struktural dan penyimpanan.

Pada tahap ini, jaringan-jaringan yang terbentuk berfungsi sepenuhnya dan memungkinkan batang menjalankan peran vitalnya, termasuk penyaluran air dan nutrisi ke seluruh bagian

tumbuhan, serta dukungan struktural yang kuat untuk mempertahankan tegaknya tumbuhan.

### c. Pertumbuhan Sekunder

Pertumbuhan sekunder adalah proses pertumbuhan yang terjadi setelah pertumbuhan primer, di mana batang dan akar tumbuhan mengalami pembesaran diameter atau penebalan. Proses ini terutama terjadi pada tumbuhan dikotil dan gymnospermae, yang memiliki jaringan meristem sekunder, seperti kambium vaskular dan kambium gabus (felogen). Pertumbuhan sekunder memungkinkan tumbuhan untuk memperkuat batang dan akarnya, memberikan stabilitas dan dukungan struktural yang lebih besar seiring pertambahan usia tumbuhan. Pertumbuhan sekunder menghasilkan jaringan kayu (xilem sekunder) dan kulit kayu (floem sekunder), yang penting untuk transportasi air, nutrisi, dan penyimpanan. Ini juga membentuk cincin tahun yang terlihat pada potongan melintang batang kayu, yang menunjukkan musim pertumbuhan dan bisa digunakan untuk memperkirakan usia pohon.

#### ▷ **Kambium Vaskular dan Pembentukan Xilem dan Floem**

Kambium vaskular adalah lapisan meristem sekunder yang terletak di antara xilem primer (bagian dalam) dan floem primer (bagian luar) pada batang dan akar. Kambium vaskular bertanggung jawab untuk membelah dan menghasilkan dua tipe jaringan baru:

- **Xilem Sekunder:** Dihasilkan ke arah dalam, membentuk jaringan kayu. Xilem sekunder adalah jaringan utama yang berperan dalam mengangkut air dan mineral dari akar ke daun, serta memberikan dukungan struktural pada tumbuhan.
- **Floem Sekunder:** Dihasilkan ke arah luar, berfungsi untuk mengangkut hasil fotosintesis (seperti gula) dari daun ke seluruh bagian tumbuhan, termasuk akar.

Setiap tahun, kambium vaskular menghasilkan lapisan baru xilem sekunder dan floem sekunder, dengan xilem yang terus-menerus menumpuk di bagian dalam, membentuk struktur kayu yang kokoh. Sebaliknya, floem sekunder lebih sedikit bertahan lama dan sering kali mengalami tekanan dari pembesaran xilem, menyebabkan jaringan floem yang lebih tua ter dorong ke luar dan akhirnya mati.

#### ▷ **Kambium Gabus dan Pembentukan Periderm**

Kambium gabus (felogen) adalah lapisan meristem sekunder yang terbentuk di bagian luar batang, tepat di bawah epidermis. Aktivitas felogen menghasilkan dua jenis jaringan:

- **Cork (gabus):** Dihasilkan ke arah luar, membentuk lapisan pelindung yang kedap air dan gas, disebut periderm. Gabus berfungsi untuk melindungi tumbuhan dari kehilangan air, serangan patogen, dan cedera mekanis.
- **Pheloderm:** Dihasilkan ke arah dalam, membantu dalam penyimpanan dan kadang mendukung pertumbuhan.

#### ▷ **Cincin Tahun**

Cincin tahun terbentuk sebagai hasil dari aktivitas musiman kambium vaskular, terutama pada tumbuhan yang hidup di daerah beriklim sedang. Pada musim hujan atau musim pertumbuhan yang cepat, kambium vaskular menghasilkan xilem dengan dinding sel yang lebih tipis dan diameter sel yang lebih besar, dikenal sebagai kayu awal atau kayu musim semi. Pada musim kemarau atau periode pertumbuhan yang lambat, kambium vaskular menghasilkan xilem dengan dinding sel yang lebih tebal dan diameter sel yang lebih kecil, dikenal sebagai kayu akhir atau kayu musim panas. Perbedaan ini membentuk lapisan konsentris yang terlihat jelas pada potongan melintang batang tumbuhan berkayu, yang dikenal sebagai cincin tahun. Setiap cincin mencerminkan satu siklus pertumbuhan tahunan, sehingga ilmuwan dapat menghitung usia tumbuhan dengan menghitung jumlah cincin tahun ini.



### Akar Bisa 'Mendengar' Air

Ternyata, akar tumbuhan bisa mendeteksi suara aliran air, lho! Penelitian menunjukkan bahwa akar dapat tumbuh ke arah sumber getaran yang mirip suara air, bahkan tanpa menyentuhnya langsung.

Akar tidak punya telinga, tapi mereka bisa merespons gelombang suara sebagai petunjuk arah—canggih, kan?



### Contoh Soal

Apa peran endosperma dalam proses pertumbuhan awal tumbuhan dan mengapa bagian ini penting sebelum tumbuhan mampu melakukan fotosintesis?

#### Jawaban:

Endosperma berfungsi sebagai sumber cadangan makanan yang kaya akan nutrisi seperti pati, protein, dan minyak. Bagian ini sangat penting karena memberikan energi kepada embrio sebelum tumbuhan dapat melakukan fotosintesis. Tanpa endosperma, embrio tidak akan memiliki cukup energi untuk memulai proses pertumbuhan awal.

#### Pembahasan:

Endosperma berperan vital dalam mendukung proses perkecambahan, terutama ketika tumbuhan belum memiliki daun sejati untuk melakukan fotosintesis. Nutrisi yang disimpan di dalamnya memungkinkan embrio berkembang menjadi tumbuhan muda. Setelah tumbuhan dapat menghasilkan makanan sendiri, peran endosperma mulai berkurang dan biasanya habis digunakan.



### 3. Rahasia Di Balik Pertumbuhan Tumbuhan: Faktor-faktor Kunci yang Menggerakkan Kehidupan

#### Faktor Eksternal

Faktor eksternal adalah elemen-elemen dari lingkungan yang berperan penting dalam mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Salah satu faktor eksternal yang paling berpengaruh adalah nutrisi, yang diperlukan oleh tumbuhan untuk mendukung berbagai proses fisiologis dan biokimia yang penting bagi kelangsungan hidup, pertumbuhan, dan reproduksi. Ketersediaan nutrisi yang cukup dan seimbang sangat menentukan kesehatan tumbuhan dan kemampuannya untuk mencapai potensi pertumbuhan yang optimal.

##### a. Nutrisi

Nutrisi bagi tumbuhan dapat dibagi menjadi dua kelompok utama: unsur hara makro dan unsur hara mikro. Kedua kelompok ini sama-sama penting bagi pertumbuhan, tetapi jumlah yang dibutuhkan oleh tumbuhan berbeda-beda. Unsur hara makro dibutuhkan dalam jumlah besar, sedangkan unsur hara mikro dibutuhkan dalam jumlah yang jauh lebih kecil. Kekurangan atau kelebihan salah satu dari unsur hara ini dapat mengakibatkan pertumbuhan yang terhambat atau kerusakan fisiologis pada tumbuhan.

**Tabel jenis unsur makro, fungsi utama, dan akibat defisiensinya**

Jenis Unsur	Unsur Kimia dalam Tumbuhan	Fungsi Utama	Akibat Defisiensi
<b>Nitrogen (N)</b>	Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Amonium ( $\text{NH}_4^+$ )	Sintesis protein, klorofil, dan enzim. Mendukung pertumbuhan vegetatif.	Klorosis (menguning) pada daun tua, batang lemah, pertumbuhan lambat.
<b>Fosfor (P)</b>	Fosfat ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ )	Pembentukan ATP, DNA, RNA, perkembangan akar, biji, dan buah.	Pertumbuhan akar terganggu, daun ungu atau merah tua, biji kecil.
<b>Kalium (K)</b>	Ion Kalium ( $\text{K}^+$ )	Mengatur keseimbangan air, tekanan osmotik, dan aktivitas enzim	Daun berwarna coklat di tepi, bintik-bintik nekrotik, daun menggulung.
<b>Kalsium (Ca)</b>	Kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	Pembentukan dinding sel, pembelahan sel, stabilitas membran.	Deformasi daun muda, akar pendek dan lemah, ujung tunas mati.
<b>Magnesium (Mg)</b>	Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	Komponen utama klorofil, aktivasi enzim fotosintesis	Klorosis antar-urat daun tua, pertumbuhan terhambat, daun kuning pucat.

<b>Belerang (S)</b>	Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	Sintesis asam amino dan protein, pembentukan enzim	Klorosis pada daun muda, pertumbuhan tanaman kerdil
<b>Oksigen (O)</b>	Oksigen ( $\text{O}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ )	Respirasi dan fotosintesis, bagian dari air dan karbon dioksida.	Pertumbuhan terganggu, proses fotosintesis terganggu.
<b>Karbon (C)</b>	Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )	Komponen utama dalam fotosintesis, pembentukan karbohidrat.	Pertumbuhan terhenti, kekurangan energi pada tumbuhan.
<b>Hidrogen (H)</b>	Air ( $\text{H}_2\text{O}$ )	Bagian dari air, mendukung fotosintesis, transportasi nutrisi.	Layu, kekurangan air, proses metabolisme terhambat.

**Tabel jenis unsur mikro, fungsi utama, dan akibat defisiensinya**

Jenis Unsur	Unsur Kimia dalam Tumbuhan	Fungsi Utama	Akibat Defisiensi
<b>Besi (Fe)</b>	Ion Besi ( $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ )	Pembentukan klorofil, transfer elektron pada fotosintesis dan respirasi	Klorosis antar-urat daun muda, daun menguning, fotosintesis terganggu.
<b>Mangan (Mn)</b>	Ion Mangan ( $\text{Mn}^{2+}$ )	Aktivasi enzim, fotosintesis, metabolisme nitrogen	Bintik-bintik coklat pada daun, klorosis antar-urat daun muda.
<b>Seng (Zn)</b>	Ion Seng ( $\text{Zn}^{2+}$ )	Sintesis hormon auksin, aktivasi enzim.	Daun kecil dan keriput, pertumbuhan terhambat, klorosis antar-urat.
<b>Tembaga (Cu)</b>	Ion Tembaga ( $\text{Cu}^{2+}$ )	Pembentukan klorofil, transfer elektron, aktivasi enzim.	Layu pada ujung tunas, daun bergulung, pertumbuhan akar lemah.
<b>Boron (B)</b>	Borat ( $\text{BO}_3^{3-}$ )	Pembelahan sel, pengangkutan gula, perkembangan dinding sel	Deformasi tunas dan daun, pertumbuhan akar terganggu, jaringan mati
<b>Molibdenum (Mo)</b>	Molibdat ( $\text{MoO}_4^{2-}$ )	Konversi nitrat menjadi amonia, metabolisme nitrogen.	Klorosis pada tepi daun, mirip dengan kekurangan nitrogen

<b>Klorin (Cl)</b>	Ion Klorida ( $\text{Cl}^-$ )	Mengatur keseimbangan air, osmosis, fotosintesis, stomata	Daun layu dan menguning, akar kecil dan lemah, stomata terganggu.
<b>Nikel (Ni)</b>	Ion Nikel ( $\text{Ni}^{2+}$ )	Aktivasi enzim urease, metabolisme nitrogen	Penumpukan urea, daun menguning, pertumbuhan terhambat
<b>Kobalt (Co)</b>	Ion Kobalt ( $\text{Co}^{2+}$ )	Penting untuk fiksasi nitrogen oleh bakteri akar.	Fiksasi nitrogen terhambat. Pertumbuhan bakeri. Pengikat nitrogen terhambat.

### b. Air

Air merupakan salah satu faktor eksternal yang sangat penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Air tidak hanya berperan sebagai pelarut dalam berbagai reaksi kimia, tetapi juga sebagai medium transportasi nutrisi, mineral, dan produk fotosintesis di dalam tumbuhan. Dalam proses fotosintesis, air menyediakan elektron dan proton, serta merupakan sumber oksigen yang dilepaskan ke atmosfer. Air juga mengatur tekanan turgor dalam sel tumbuhan, yang diperlukan untuk mempertahankan struktur sel dan membuka stomata untuk pertukaran gas. Fungsi utama air pada tumbuhan:

- ▷ Fotosintesis: Air adalah sumber elektron dan proton dalam reaksi terang fotosintesis.
- ▷ Transportasi: Air mengangkut nutrisi melalui jaringan xilem dari akar ke seluruh bagian tumbuhan.
- ▷ Pengaturan suhu: Evaporasi air melalui daun (transpirasi) membantu mendinginkan tumbuhan.
- ▷ Turgor sel: Air menjaga tekanan sel, yang penting untuk dukungan struktural dan pertumbuhan sel.

Tumbuhan yang kekurangan air mengalami dehidrasi yang menyebabkan layu, pertumbuhan terhambat, stomata menutup untuk mencegah kehilangan air, dan pada tingkat parah, dapat menyebabkan kematian tanaman.

### c. Derajat Keasaman (pH)

pH tanah mempengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tumbuhan dan aktivitas mikroorganisme dalam tanah. pH tanah diukur dari tingkat keasaman atau kebasaan, dengan skala dari 1 (sangat asam) hingga 14 (sangat basa), sedangkan 7 dianggap netral. Sebagian besar tumbuhan tumbuh optimal pada pH netral hingga sedikit asam (pH 6–7), meskipun beberapa tumbuhan memiliki adaptasi khusus terhadap pH ekstrem. Dampak pH pada tumbuhan:

- ▷ pH rendah (asam): Pada tanah asam, unsur-unsur seperti aluminium dan mangan bisa menjadi beracun, sedangkan unsur hara seperti fosfor, kalsium, dan magnesium cenderung lebih sulit diserap oleh tumbuhan.
- ▷ pH tinggi (basa): Pada tanah basa, unsur hara seperti besi, mangan, tembaga, seng, dan boron kurang tersedia, menyebabkan defisiensi nutrisi meskipun unsur tersebut ada di tanah.

Nilai pH yang terlalu rendah atau tinggi menyebabkan nutrisi tidak dapat diserap secara optimal oleh akar, menyebabkan gejala seperti klorosis (menguningnya daun), pertumbuhan terhambat, dan dalam kasus parah, kematian tumbuhan.

#### d. Kadar Garam

Kadar garam atau salinitas tanah mengacu pada konsentrasi ion garam terlarut dalam tanah. Salinitas tinggi dapat membahayakan pertumbuhan tumbuhan karena menyebabkan stres osmotik, menghambat penyerapan air oleh akar, dan dapat menyebabkan toksitas ion tertentu seperti natrium ( $Na^+$ ) dan klorida ( $Cl^-$ ). Kondisi ini umumnya terjadi di daerah kering atau di tanah yang mengalami irigasi berlebihan. Dampak kadar garam tinggi:

- ▷ Stres osmotik: Ketika kadar garam tanah tinggi, air lebih sulit diserap oleh akar karena air bergerak dari area dengan konsentrasi air tinggi (tanaman) ke area dengan konsentrasi air rendah (tanah garam), menyebabkan dehidrasi pada tumbuhan.
- ▷ Toksitas ion: Akumulasi ion natrium dan klorida yang berlebihan dapat mengganggu fungsi seluler dan menyebabkan kerusakan pada jaringan tanaman, seperti nekrosis pada tepi daun.

Tumbuhan yang tumbuh di tanah dengan kadar garam tinggi sering kali menunjukkan gejala seperti daun terbakar, layu, klorosis, dan pertumbuhan yang terhambat.

#### e. Oksigen

Oksigen sangat penting bagi respirasi seluler pada akar dan jaringan lainnya, yang menghasilkan energi untuk berbagai proses pertumbuhan. Meskipun oksigen diambil dari udara melalui daun, akar juga membutuhkan oksigen yang tersedia di dalam tanah untuk melakukan respirasi aerobik. Tanah yang terlalu jenuh air atau memiliki drainase buruk cenderung kekurangan oksigen, menyebabkan kondisi anaerobik yang menghambat respirasi akar.

- ▷ Respirasi seluler: Oksigen digunakan untuk memecah gula (glukosa) menjadi energi dalam bentuk ATP yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan sel.
- ▷ Pertumbuhan akar: Oksigen yang tersedia di zona perakaran membantu proses respirasi akar, yang penting untuk menyerap air dan nutrisi dari tanah.

Tanah yang jenuh air menyebabkan akar kekurangan oksigen, yang mengarah pada anoksia (kondisi tanpa oksigen), menghambat respirasi akar, dan pada akhirnya menyebabkan akar busuk, pertumbuhan terhambat, dan penurunan produktivitas tanaman.

#### f. Cahaya

Cahaya merupakan sumber energi utama bagi tumbuhan, yang digunakan dalam fotosintesis untuk memproduksi glukosa dari karbon dioksida dan air. Tumbuhan merespons intensitas, durasi, dan kualitas cahaya yang diterimanya, yang mempengaruhi pertumbuhannya secara langsung. Cahaya juga berperan dalam proses fotomorfogenesis, yaitu bagaimana cahaya mempengaruhi pola pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan, seperti perpanjangan batang, pembentukan daun, dan pembungaan. Fungsi cahaya pada tumbuhan:

- ▷ Fotosintesis: Cahaya mengaktifkan klorofil dalam daun, yang menangkap energi dari sinar matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi gula dan oksigen.
- ▷ Fototropisme: Tumbuhan merespons cahaya dengan pertumbuhan batang dan daun ke arah sumber cahaya untuk memaksimalkan fotosintesis.
- ▷ Fotoperiodisme: Cahaya juga mempengaruhi proses pembungaan, di mana panjang siang dan malam hari menentukan kapan tumbuhan berbunga.

Jika tumbuhan tidak menerima cahaya yang cukup, terjadi etiolasi, di mana tumbuhan memanjang dengan cepat, tetapi dengan batang yang lemah dan daun pucat karena klorofil yang terbatas. Selain itu, pertumbuhan menjadi terhambat dan produksi bunga serta buah menurun.

### **g. Fotoperiodisme**

Fotoperiodisme adalah respons fisiologis tumbuhan terhadap perubahan panjang siang dan malam. Fenomena ini memainkan peran penting dalam mengatur siklus pertumbuhan tumbuhan, terutama proses pembunganan dan pembentukan buah. Setiap spesies tumbuhan memiliki "fotoperiode kritis," yaitu jumlah jam cahaya yang dibutuhkan dalam satu hari untuk memicu pembunganan. Fotoperiodisme memungkinkan tumbuhan menyesuaikan waktu pembunganan dengan perubahan musim, sehingga mereka dapat berkembang dalam kondisi yang paling menguntungkan. Fotoperiodisme dipengaruhi oleh pigmen cahaya yang disebut fitokrom, yang mendeteksi perubahan panjang hari dan mengatur aktivitas hormon tumbuhan seperti giberelin dan auksin. Berdasarkan respon terhadap panjang siang, tumbuhan dibagi menjadi tiga kelompok utama: tumbuhan berhari pendek, tumbuhan berhari panjang, dan tumbuhan berhari netral.

#### **▷ Tumbuhan Berhari Pendek**

Tumbuhan berhari pendek (short-day plants) adalah jenis tumbuhan yang berbunga ketika durasi malam lebih panjang dari durasi siang, biasanya lebih dari 12 jam gelap. Tumbuhan ini membutuhkan periode gelap yang panjang untuk memicu pembunganan, dan bahkan sedikit gangguan cahaya selama periode gelap dapat menghambat proses pembunganan. Contoh tumbuhan berhari pendek yaitu, krisam, poinsettia, kedelai, dan tembaku. Pada tumbuhan berhari pendek, proses fotoperiodisme bekerja dengan mendeteksi durasi malam yang panjang. Ketika panjang malam melewati periode kritis tertentu, sinyal akan dikirim untuk memulai pembunganan. Tumbuhan ini umumnya berbunga di musim gugur atau awal musim semi, ketika malam hari lebih panjang. Di daerah beriklim sedang, tumbuhan berhari pendek biasanya mulai berbunga saat musim gugur, ketika panjang malam mulai melebihi panjang siang, memungkinkan mereka berkembang sebelum cuaca terlalu dingin.

#### **▷ Tumbuhan Berhari Panjang**

Tumbuhan berhari panjang (long-day plants) adalah jenis tumbuhan yang berbunga ketika durasi siang lebih panjang dari durasi malam, biasanya lebih dari 12 jam terang. Tumbuhan ini membutuhkan periode terang yang panjang untuk merangsang pembunganan, dan pembunganan terjadi saat hari-hari mulai lebih panjang, umumnya di akhir musim semi atau musim panas. Contoh tumbuhan berhari Panjang yaitu, bayam, selada, gandum, dan barley. Pada tumbuhan berhari panjang, pembunganan dimulai ketika panjang siang hari melebihi periode kritis. Fotoperiodisme pada tumbuhan ini bekerja dengan mendeteksi durasi cahaya yang cukup lama untuk mengaktifkan mekanisme hormon yang memicu pembunganan. Tumbuhan berhari panjang biasanya ditemukan di wilayah yang memiliki musim panas dengan hari yang panjang. Tumbuhan seperti gandum dan barley akan mulai berbunga pada akhir musim semi atau awal musim panas ketika hari-hari menjadi lebih panjang, memberikan lebih banyak waktu untuk fotosintesis dan produksi energi.

#### **▷ Tumbuhan Berhari Netral**

Tumbuhan berhari netral (day-neutral plants) adalah tumbuhan yang proses pembungaananya tidak dipengaruhi oleh panjang siang atau malam. Tumbuhan ini berbunga berdasarkan faktor-faktor lain, seperti usia atau kondisi lingkungan tertentu, seperti suhu dan ketersediaan air, tanpa memperdulikan panjang fotoperiode. Mereka dapat berbunga sepanjang tahun, asalkan kondisi lingkungan mendukung. Contoh tumbuhan berhari netral, yaitu tomat, jagung, mentimun, dan bunga matahari. Tumbuhan berhari netral tidak bergantung pada perubahan panjang hari untuk memulai pembunganan. Mereka dapat berbunga kapan saja dalam setahun, asalkan suhu, nutrisi, dan faktor lingkungan lain sesuai. Ini membuat tumbuhan berhari netral sangat berguna dalam pertanian komersial, karena mereka dapat dibudidayakan sepanjang tahun. Tomat dapat

ditanam dan berbunga sepanjang tahun di rumah kaca atau di wilayah tropis yang stabil secara iklim, karena pembungaannya tidak dipengaruhi oleh panjang siang atau malam.

**Tabel perbandingan fotoperiodisme**

Aspek	Tumbuhan Berhari Pendek	Tumbuhan Berhari Panjang	Tumbuhan Berhari Netral
<b>Definisi</b>	Berbunga ketika durasi malam lebih panjang dari siang.	Berbunga ketika durasi siang lebih panjang dari malam	Berbunga tanpa dipengaruhi oleh panjang siang atau malam
<b>Durasi Hari yang Dibutuhkan</b>	Membutuhkan malam lebih dari 12 jam untuk berbunga.	Membutuhkan siang lebih dari 12 jam untuk berbunga.	Tidak terpengaruh panjang siang/malam, berbunga kapan saja.
<b>Contoh Tumbuhan</b>	Krisan, poinsettia, kedelai, tembakau	Gandum, bayam, selada, barley.	Tomat, jagung, mentimun, bunga matahari
<b>Musim Berbunga</b>	Umumnya berbunga di musim gugur atau awal musim semi	Umumnya berbunga di akhir musim semi atau musim panas.	Dapat berbunga sepanjang tahun, bergantung pada kondisi lingkungan.
<b>Faktor Pemicu</b>	Pembungaan dipicu oleh malam yang panjang	Pembungaan dipicu oleh siang yang panjang	Pembungaan dipicu oleh faktor lain, seperti usia, suhu, atau nutrisi
<b>Pengaruh Cahaya Tambahan</b>	Cahaya tambahan saat malam dapat menghambat pembungaan	Cahaya tambahan saat malam dapat mempercepat pembungaan.	Tidak dipengaruhi oleh perubahan panjang hari atau malam.

#### **h. Suhu**

Suhu adalah faktor eksternal yang sangat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Tumbuhan membutuhkan rentang suhu tertentu untuk menjalankan fungsi metabolisme secara optimal, seperti fotosintesis, respirasi, dan pembelahan sel. Suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat memperlambat pertumbuhan, menghambat proses fisiologis, atau bahkan merusak jaringan tumbuhan. Secara umum, setiap spesies tumbuhan memiliki suhu optimal di mana pertumbuhan berlangsung paling baik.

- ▷ **Suhu rendah:** Suhu yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembekuan air di dalam sel, yang berpotensi merusak membran sel dan menyebabkan kematian sel. Pada suhu rendah, aktivitas enzim juga menurun, sehingga proses fotosintesis dan respirasi terganggu.
- ▷ **Suhu tinggi:** Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penguapan air berlebihan melalui transpirasi, menyebabkan tumbuhan mengalami kekurangan air dan layu. Suhu tinggi juga bisa mengganggu enzim-enzim yang berperan dalam metabolisme tumbuhan.

Pengaruh suhu pada fase-fase perkembangan juga penting, seperti stratifikasi benih yang membutuhkan suhu dingin untuk memecahkan dormansi, atau vernalisasi yang merangsang pembungaan pada beberapa spesies ketika mereka terpapar suhu dingin.



#### i. Kelembaban

Kelembaban adalah kadar uap air di udara yang berpengaruh langsung pada transpirasi dan keseimbangan air dalam tumbuhan. Tingkat kelembaban yang rendah atau tinggi dapat mempengaruhi cara tumbuhan menyerap dan mempertahankan air, serta proses fotosintesis dan respirasi.

- ▷ Kelembaban rendah: Saat kelembaban udara rendah, laju transpirasi meningkat, menyebabkan tumbuhan kehilangan air lebih cepat daripada yang dapat diserap oleh akar. Jika kehilangan air tidak diimbangi oleh penyerapan yang cukup, tumbuhan dapat mengalami kekeringan dan layu.
- ▷ Kelembaban tinggi: Pada kelembaban yang tinggi, laju transpirasi berkurang. Hal ini dapat menghambat pendinginan daun melalui penguapan air dan dapat meningkatkan risiko infeksi jamur akibat lingkungan yang lembab.

#### Tumbuhan Bisa 'Tidur' Jika Cahaya Tidak Cukup

Beberapa tumbuhan dapat "berhenti tumbuh" sementara waktu jika tidak mendapatkan cahaya yang cukup. Ini disebut dormansi cahaya—tumbuhan akan menunggu hingga kondisi terang kembali sebelum melanjutkan pertumbuhannya.

Mirip seperti manusia yang butuh sinar matahari pagi, tumbuhan juga tidak bisa berfungsi optimal tanpa cahaya. Jadi, jangan remehkan kekuatan sinar matahari, ya.



Tumbuhan beradaptasi dengan kelembaban yang berbeda-beda. Misalnya, tumbuhan di daerah kering seringkali memiliki modifikasi seperti stomata yang lebih sedikit atau tertutup selama siang hari untuk mengurangi kehilangan air, sementara tumbuhan di daerah lembab sering memiliki permukaan daun lebar untuk memaksimalkan transpirasi.

#### j. Gravitasi

Gravitasi mempengaruhi arah pertumbuhan tumbuhan melalui proses yang disebut geotropisme atau gravitropisme. Akar tumbuhan biasanya menunjukkan geotropisme positif dengan tumbuh menuju pusat gravitasi (ke bawah), sementara batang dan daun menunjukkan geotropisme negatif dengan tumbuh menjauhi gravitasi (ke atas).

- ▷ Geotropisme positif (akar): Akar tumbuh ke arah bawah, yang membantu tumbuhan mendapatkan air dan nutrisi dari tanah serta memperkuat penopangnya.
- ▷ Geotropisme negatif (batang): Batang dan daun tumbuh ke arah yang berlawanan dengan gravitasi, menuju cahaya, untuk memaksimalkan proses fotosintesis.

Pengaturan pertumbuhan ini dikendalikan oleh hormon auksin, yang didistribusikan secara tidak merata dalam respons terhadap gravitasi, memicu perpanjangan sel di satu sisi tumbuhan dan menyebabkan pembengkokan ke arah tertentu.

#### k. Sentuhan

Sentuhan sebagai faktor eksternal mempengaruhi tumbuhan melalui respons yang dikenal sebagai tigmotropisme. Tigmotropisme adalah respons pertumbuhan tumbuhan terhadap rangsangan fisik dari sentuhan atau kontak dengan objek. Hal ini paling sering diamati pada tumbuhan merambat dan memanjang, seperti anggur atau kacang-kacangan, yang dapat membelit atau melekat pada penopang saat menyentuhnya.

Contoh: Batang sulur: Tumbuhan seperti kacang atau anggur memiliki sulur yang bereaksi terhadap sentuhan dengan membelit objek yang mereka temui, sehingga membantu tumbuhan memanjat dan memperoleh lebih banyak cahaya.

Sentuhan juga dapat menyebabkan tigmonasti, yaitu gerakan yang terjadi sebagai respons langsung terhadap sentuhan, seperti gerakan daun pada tumbuhan Mimosa pudica yang mengatup ketika disentuh untuk melindungi diri dari serangan herbivor.

#### I. Organisme Parasit dan Herbivor

Organisme parasit dan herbivor adalah faktor eksternal biologis yang dapat mempengaruhi kesehatan dan pertumbuhan tumbuhan. Organisme parasit seperti jamur, bakteri, atau virus dapat menyerang dan merusak jaringan tumbuhan, mengambil nutrisi dari inangnya, sehingga menghambat pertumbuhan atau menyebabkan kematian. Sementara itu, herbivor, seperti serangga, hewan pemakan tumbuhan, atau mamalia, juga dapat merusak tumbuhan dengan memakan daun, batang, atau akar, yang mengurangi kemampuan tumbuhan untuk melakukan fotosintesis dan tumbuh secara optimal.

- ▷ Parasit: Jamur dan bakteri parasit dapat menyebabkan penyakit pada tumbuhan, seperti busuk akar, bercak daun, atau layu bakteri, yang semuanya dapat mengurangi hasil panen dan merusak ekosistem pertanian.
- ▷ Herbivor: Serangga seperti ulat atau belalang dapat mengunyah daun dan batang tumbuhan, menghambat kemampuan fotosintesis tumbuhan. Tumbuhan telah mengembangkan pertahanan alami, seperti duri, racun, atau senyawa kimia yang tidak menarik bagi herbivor.

Untuk melindungi diri, beberapa tumbuhan juga menghasilkan senyawa alelopati atau senyawa pertahanan kimia, yang berfungsi sebagai penghalang terhadap parasit dan herbivor.

#### m. Hormon Eksogen

Hormon eksogen adalah zat pengatur tumbuh yang berasal dari luar tumbuhan dan sering kali digunakan oleh manusia untuk memodifikasi atau merangsang pertumbuhan tumbuhan. Hormon-hormon ini termasuk auksin, giberelin, sitokinin, dan etilen, yang semuanya digunakan dalam budidaya tanaman untuk mengendalikan berbagai aspek pertumbuhan dan perkembangan, seperti pembentukan akar, pembungaan, pematangan buah, dan pencegahan kerontokan daun.

Beberapa penggunaan hormon eksogen:

- ▷ Auksin: Digunakan untuk mempercepat pembentukan akar pada stek, serta merangsang pertumbuhan batang.
- ▷ Giberelin: Digunakan untuk mempercepat pembungaan, pemanjangan batang, dan meningkatkan ukuran buah.
- ▷ Sitokinin: Digunakan untuk merangsang pembelahan sel dan memperlambat penuaan daun.
- ▷ Etilen: Digunakan untuk mempercepat pematangan buah dan mengatur pembungaan pada tanaman tertentu.

Aplikasi hormon eksogen ini sangat berguna dalam pertanian dan hortikultura untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman sesuai dengan kebutuhan produksi.

## Faktor Internal

Faktor internal adalah elemen-elemen dalam tumbuhan yang berperan langsung dalam mengatur berbagai proses pertumbuhan dan perkembangan. Salah satu faktor internal yang paling penting adalah hormon tumbuhan, yang bertindak sebagai pengatur dan pengendali bagi hampir semua aktivitas biologis tumbuhan, mulai dari pembelahan dan pemanjangan sel hingga pembungaan dan pematangan buah. Berikut adalah penjelasan mengenai beberapa hormon penting yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

### a. Auksin

Auksin adalah salah satu hormon tumbuhan yang paling dikenal dan berperan penting dalam mengatur pemanjangan sel serta berbagai respons tumbuhan terhadap rangsangan lingkungan. Auksin diproduksi terutama di ujung-ujung batang, akar, dan daun muda, kemudian didistribusikan ke bagian lain tumbuhan untuk mengatur pertumbuhan. Fungsi utama auksin:

- ▷ Pemanjangan sel: Auksin merangsang pemanjangan sel di batang, yang memungkinkan batang tumbuhan memanjang ke arah cahaya (fototropisme) dan melawan gravitasi (geotropisme negatif).
- ▷ Dominansi apikal: Auksin mempertahankan dominansi apikal dengan menghambat pertumbuhan tunas lateral, sehingga batang utama dapat terus memanjang.
- ▷ Pembentukan akar: Auksin merangsang pembentukan akar adventif dan perakaran pada stek tanaman.

Auksin sering digunakan dalam perbanyakan tanaman secara vegetatif, seperti penggunaan hormon ini untuk merangsang perakaran pada stek batang.

### b. Giberelin

Giberelin adalah hormon tumbuhan yang berperan penting dalam pertumbuhan batang, perkecambahan, dan pembungaan. Giberelin ditemukan di berbagai bagian tumbuhan, tetapi terutama aktif dalam jaringan yang sedang berkembang.

Fungsi utama giberelin:

- ▷ Pemanjangan batang: Giberelin merangsang pemanjangan sel, terutama pada batang, sehingga memungkinkan tumbuhan tumbuh lebih tinggi dan membentuk batang yang lebih panjang.
- ▷ Perkecambahan: Giberelin memecah dormansi biji dan memulai proses perkecambahan dengan mengaktifkan enzim yang memobilisasi cadangan makanan dalam biji.
- ▷ Pembungaan: Giberelin merangsang pembungaan pada beberapa tumbuhan, terutama tumbuhan berhali panjang.

Giberelin digunakan dalam pertanian untuk mempercepat pertumbuhan batang dan meningkatkan ukuran buah pada tanaman seperti anggur dan apel.

### c. Gas Etilen

Etilen adalah satu-satunya hormon tumbuhan yang berbentuk gas dan berperan dalam proses pematangan buah, penuaan daun, dan penyusutan. Etilen diproduksi oleh hampir semua bagian tumbuhan, terutama pada jaringan yang sedang mengalami stres atau cedera.

Fungsi utama etilen:

- ▷ Pematangan buah: Etilen merangsang pematangan buah secara cepat, seperti pada pisang, tomat, dan mangga.

- ▷ Absisi daun dan buah: Etilen memicu pelepasan (absisi) daun, buah, atau bunga yang telah tua atau rusak.
- ▷ Respons terhadap stres: Etilen juga berperan dalam respons tumbuhan terhadap kondisi stres, seperti luka atau serangan patogen.

Etilen sering digunakan secara komersial untuk mempercepat pematangan buah-buahan pasca panen, seperti pisang dan tomat, serta untuk mengendalikan penjatuhan daun pada tanaman hias.

**d. Sitokinin**

Sitokinin adalah hormon tumbuhan yang berperan dalam pembelahan sel dan pertumbuhan jaringan. Sitokinin ditemukan terutama di jaringan yang sedang aktif membelah, seperti pada akar, tunas, dan buah yang sedang berkembang.

Fungsi utama sitokinin:

- ▷ Pembelahan sel: Sitokinin merangsang pembelahan sel, terutama pada tunas dan jaringan muda.
- ▷ Pertumbuhan tunas lateral: Berlawanan dengan auksin, sitokinin merangsang pertumbuhan tunas lateral dan mengurangi dominansi apikal.
- ▷ Penundaan penuaan: Sitokinin memperlambat proses penuaan pada daun dengan mempertahankan klorofil dan protein.

Sitokinin digunakan dalam kultur jaringan tumbuhan untuk merangsang pembelahan sel dan regenerasi tunas dari jaringan tumbuhan yang diambil secara *in vitro*.

**e. Asam Absisat**

Asam absisat (ABA) adalah hormon yang berperan dalam menginduksi dormansi dan menjaga keseimbangan air dalam tumbuhan, terutama dalam kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Asam absisat ditemukan di banyak bagian tumbuhan, tetapi terutama di daun dan biji yang sedang mengalami stres.

Fungsi utama asam absisat:

- ▷ Induksi dormansi: ABA menginduksi dormansi biji dan tunas, membantu tumbuhan bertahan dalam kondisi buruk seperti kekeringan atau musim dingin.
- ▷ Penutupan stomata: ABA menyebabkan stomata menutup untuk mengurangi transpirasi dan menjaga air selama periode kekeringan.
- ▷ Penghambat pertumbuhan: ABA menghambat pertumbuhan tumbuhan selama kondisi stres.

ABA digunakan dalam pertanian untuk mencegah perkecambahan dini biji dan untuk membantu tanaman bertahan dalam kondisi kekeringan.

**f. Kalin**

Kalin adalah sekelompok hormon tumbuhan yang berperan dalam pembentukan struktur tubuh tanaman seperti akar (rizokalin), batang (kaulokalin), daun (filokalin), dan bunga (antokalin). Kalin tidak termasuk dalam kelompok utama hormon tumbuhan seperti auksin atau giberelin, tetapi memiliki fungsi spesifik dalam mendukung diferensiasi organ tumbuhan.

Jenis-jenis kalin:

- ▷ Rizokalin: Merangsang pembentukan akar.
- ▷ Kaulokalin: Merangsang pertumbuhan batang.
- ▷ Filokalin: Merangsang pembentukan daun.

- ▷ Antokalin: Merangsang pembentukan bunga.

Meskipun kalin tidak banyak digunakan dalam aplikasi pertanian seperti hormon lainnya, pemahaman tentang peran kalin penting dalam mempelajari bagaimana berbagai bagian tubuh tumbuhan berkembang secara harmonis.

#### **g. Asam traumalin**

Asam traumalin adalah hormon yang terlibat dalam regenerasi jaringan pada tumbuhan yang terluka. Saat jaringan tumbuhan mengalami cedera atau kerusakan, asam traumalin membantu memperbaiki luka dan merangsang pertumbuhan kembali jaringan yang rusak.

Fungsi utama asam traumalin:

- ▷ Regenerasi jaringan: Memperbaiki jaringan tumbuhan yang rusak akibat luka atau infeksi.
- ▷ Penyembuhan luka: Merangsang pembentukan jaringan baru di area yang mengalami cedera.

Asam traumalin juga berperan dalam membentuk lapisan pelindung atau kalus pada bagian tumbuhan yang mengalami cedera, sehingga melindungi jaringan dari infeksi lebih lanjut.

### **Contoh Soal**

Mengapa pH tanah dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman, dan bagaimana tanaman merespons kondisi pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi?

#### **Jawaban:**

pH tanah memengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Jika pH terlalu rendah atau terlalu tinggi, nutrisi penting seperti fosfor atau besi tidak dapat diserap secara optimal oleh akar. Tanaman merespons kondisi ini dengan menunjukkan gejala seperti daun menguning atau pertumbuhan terhambat.

#### **Pembahasan:**

pH tanah memengaruhi aktivitas mikroorganisme serta kelarutan nutrisi dalam tanah. Pada pH rendah, unsur seperti aluminium bisa menjadi racun, sementara fosfor dan magnesium sulit diserap. Sebaliknya, pada pH tinggi, besi dan seng menjadi kurang tersedia. Akibatnya, tumbuhan bisa mengalami defisiensi meskipun unsur hara sebenarnya ada dalam tanah.

### **Kegiatan Kelompok 1**

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan mengamati pengaruh intensitas cahaya terhadap pertumbuhan kecambah, menganalisis perbedaan pertumbuhan tumbuhan yang mendapat cahaya dan yang tidak, dan menjelaskan peran cahaya sebagai faktor eksternal dalam pertumbuhan tanaman.

1. Buatlah kelompok yang terdiri dari 4 orang lalu siapkan alat dan bahan berikut:
  - ▷ 6–10 biji kacang hijau atau biji tumbuhan lain yang mudah tumbuh
  - ▷ Kapas atau tisu basah
  - ▷ 2 wadah kecil (gelas plastik atau pot kecil)
  - ▷ Kardus penutup atau kotak tertutup untuk simulasi ruangan gelap
  - ▷ Penggaris & Label/kertas penanda
2. Siapkan 2 wadah berisi kapas/tisu basah dan letakkan masing-masing 3–5 biji kecambah di setiap wadah.

3. Satu wadah diletakkan di tempat yang mendapat cahaya matahari atau lampu terang (ruang terang).
4. Satu wadah diletakkan di dalam kardus tertutup atau ruangan gelap (ruang gelap).
5. Siram kapas secara teratur agar tetap lembab.
6. Amati dan ukur tinggi kecambah setiap hari selama 5–7 hari.
7. Catat perbedaan tinggi batang, warna daun, dan kekuatan tanaman di kedua tempat.
8. Diskusikan dan analisis bertanyaan berikut:
  - a. Bagaimana perbedaan tinggi tanaman di ruang terang dan ruang gelap?
  - b. Mengapa kecambah di tempat gelap cenderung tumbuh lebih tinggi namun lemah?
  - c. Apa fungsi cahaya dalam proses pertumbuhan tanaman?
  - d. Apa yang terjadi jika tanaman terus-menerus tumbuh di tempat gelap?
  - e. Bagaimana eksperimen ini menggambarkan peran faktor eksternal (cahaya) terhadap pertumbuhan?
9. Buatlah Kesimpulan dari praktikum yang baru saja kamu lakukan.



## 4. Dari Zigot hingga Dewasa: Mengungkap Proses Pertumbuhan pada Hewan dan Manusia

### Tahap Embrio

Pertumbuhan dan perkembangan pada hewan dan manusia merupakan proses kompleks yang dimulai sejak pembuahan dan berlangsung hingga mencapai kedewasaan. Pada tahap awal, perkembangan terjadi pada tingkat seluler melalui serangkaian pembelahan, diferensiasi, dan pembentukan jaringan serta organ. Proses ini diawali dengan pembentukan zigot setelah fertilisasi, diikuti dengan perkembangan tahap-tahap embrionik yang melibatkan morulasi, blastulasi, gastrulasi, dan organogenesis. Masing-masing tahapan ini memainkan peran penting dalam menciptakan struktur tubuh yang lengkap dan berfungsi.

#### a. Morulasi

Morulasi adalah tahap awal perkembangan embrio, dimulai setelah zigot mengalami beberapa kali pembelahan mitosis. Proses ini menghasilkan kelompok sel yang disebut morula, yang menyerupai bola padat sel-sel yang identik. Morula terdiri dari sekitar 16-32 sel yang dihasilkan dari serangkaian pembelahan sel yang cepat tanpa pertambahan ukuran, yang berarti volume total morula tetap sama dengan zigot asli.

Proses utama dalam morulasi:

- ▷ Pembelahan mitosis: Setelah pembuahan, zigot mengalami pembelahan berturut-turut, yang disebut cleavage, tanpa pertumbuhan antar pembelahan.
- ▷ Pembentukan morula: Sel-sel yang dihasilkan membentuk massa padat berbentuk bola kecil.

Morula berfungsi sebagai tahap peralihan menuju blastulasi, di mana embrio mulai membentuk struktur yang lebih kompleks dan mulai membedakan sel-sel untuk fungsi tertentu.

#### b. Blastulasi

Setelah morula terbentuk, perkembangan embrio berlanjut ke tahap blastulasi, di mana morula mulai membentuk rongga berisi cairan yang disebut blastocoel. Pada tahap ini, embrio berkembang menjadi blastula, yang terdiri dari lapisan sel yang mengelilingi blastocoel. Selama blastulasi, sel-sel mulai mengalami reorganisasi, mempersiapkan embrio untuk fase berikutnya, yaitu gastrulasi.

Ciri-ciri utama blastulasi:

- ▷ Pembentukan blastocoel: Rongga berisi cairan terbentuk di tengah-tengah massa sel, mengubah morula menjadi blastula.
- ▷ Trofoektoderm dan massa sel dalam: Pada mamalia, blastula terdiri dari dua bagian, yaitu lapisan luar sel (trofoektoderm) yang akan berkembang menjadi plasenta, dan massa sel dalam yang akan menjadi embrio.

Blastulasi adalah langkah penting menuju diferensiasi lebih lanjut, di mana sel-sel mulai menunjukkan potensi mereka untuk membentuk jaringan tertentu.

#### c. Gastrulasi

Gastrulasi adalah salah satu tahap paling penting dalam perkembangan embrio, di mana lapisan germinal utama terbentuk, yaitu ektoderm, mesoderm, dan endoderm. Proses ini terjadi melalui gerakan sel yang kompleks, di mana sel-sel blastula berpindah posisi dan mengalami diferensiasi untuk membentuk struktur awal tubuh.

Lapisan germinal utama yang terbentuk selama gastrulasi:

- ▷ Ektoderm: Akan berkembang menjadi sistem saraf, kulit, rambut, dan jaringan luar lainnya.
- ▷ Mesoderm: Akan membentuk otot, tulang, sistem peredaran darah, dan organ dalam.
- ▷ Endoderm: Akan menjadi lapisan dalam organ seperti usus, paru-paru, dan sistem pencernaan.

Gastrulasi adalah tahap kritis di mana pola tubuh mulai terbentuk dan sel-sel mulai menentukan nasib mereka untuk menjadi jaringan dan organ tertentu. Gerakan sel selama gastrulasi memastikan bahwa lapisan-lapisan ini terletak pada posisi yang tepat untuk mendukung pembentukan struktur tubuh

#### d. Organogenesis

Organogenesis adalah fase di mana lapisan germinal yang telah terbentuk selama gastrulasi berkembang lebih lanjut menjadi organ-organ dan sistem tubuh yang berbeda. Pada tahap ini, organ-organ utama seperti otak, jantung, ginjal, hati, dan sistem saraf mulai terbentuk. Proses ini melibatkan pembelahan sel yang cepat dan spesialisasi yang memungkinkan terbentuknya jaringan yang berbeda.

Tahap utama dalam organogenesis:

- ▷ Neurulasi: Salah satu proses awal organogenesis adalah pembentukan sistem saraf, di mana ektoderm melipat untuk membentuk tabung saraf yang nantinya berkembang menjadi otak dan sumsum tulang belakang.
- ▷ Pembentukan jantung dan sistem peredaran darah: Jantung adalah salah satu organ pertama yang terbentuk dan mulai berdetak di awal organogenesis, membentuk dasar sistem sirkulasi.
- ▷ Pembentukan organ dalam: Mesoderm berkembang menjadi organ-organ seperti ginjal, otot, dan tulang, sementara endoderm membentuk lapisan dalam organ-organ seperti paru-paru dan usus.

Selama organogenesis, berbagai jaringan yang telah mengalami diferensiasi mulai berfungsi sebagai organ yang terintegrasi, memungkinkan embrio tumbuh dan berkembang menuju janin yang lengkap. Proses ini melibatkan koordinasi yang rumit antara berbagai sel dan jaringan untuk memastikan bahwa semua organ berkembang secara bersamaan dan pada posisi yang tepat.



Tahapan pembelahan sel pada embrio hewan dan manusia – shutterstock.com/AnaKrasavina

#### Tahap Pascaembrio

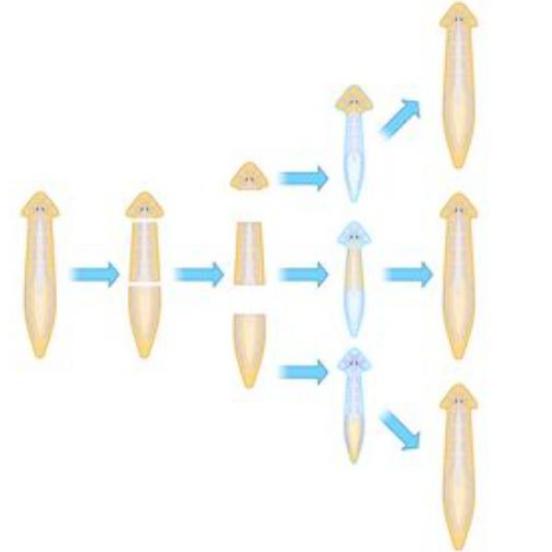
Setelah tahap embrionik, makhluk hidup memasuki tahap pasca embrio, yang merupakan kelanjutan dari perkembangan fisik, pertumbuhan, dan pembentukan struktur tubuh hingga mencapai bentuk dewasa yang lengkap. Pada tahap ini, organisme mengalami proses adaptasi dan transformasi penting, seperti regenerasi dan metamorfosis, yang memungkinkan mereka berkembang sesuai dengan lingkungan dan kondisi fisiologisnya. Pada beberapa spesies, proses ini melibatkan perubahan fisik yang signifikan, seperti pada serangga dan amfibi, sementara pada hewan lain, termasuk manusia, lebih bersifat penyesuaian dan penyempurnaan organ serta sistem tubuh.

### a. Regenerasi

Regenerasi adalah kemampuan organisme untuk memperbaiki atau menumbuhkan kembali bagian tubuh yang rusak, terluka, atau hilang. Kemampuan regenerasi bervariasi di antara spesies; beberapa hewan memiliki kemampuan luar biasa untuk meregenerasi seluruh bagian tubuh, sementara yang lain hanya bisa memperbaiki jaringan tertentu.

#### Contoh regenerasi dalam berbagai organisme:

- ▷ **Cacing Planaria:** Dikenal dengan kemampuan luar biasa untuk meregenerasi seluruh tubuhnya dari potongan kecil. Jika dipotong menjadi beberapa bagian, setiap potongan dapat tumbuh menjadi individu baru.
- ▷ **Kadal:** Beberapa spesies kadal dapat meregenerasi ekor yang hilang akibat serangan predator. Ekor yang baru akan tumbuh dalam beberapa minggu.
- ▷ **Manusia:** Pada manusia, kemampuan regenerasi terbatas pada penyembuhan luka, pembaruan jaringan kulit, dan regenerasi organ tertentu seperti hati. Meski begitu, kemampuan regenerasi manusia tidak sekuat pada beberapa hewan lainnya.



Regenerasi pada Planaria. sp. – Kompas.com/NadiaFaradiba

Proses regenerasi melibatkan pembelahan sel yang cepat, aktivasi gen yang terlibat dalam pertumbuhan jaringan, dan diferensiasi sel yang memastikan jaringan yang baru tumbuh memiliki fungsi dan struktur yang sesuai dengan jaringan aslinya.

### b. Metamorfosis

Metamorfosis adalah proses transformasi fisik yang terjadi pada beberapa organisme selama perkembangan pasca embrio, di mana mereka mengalami perubahan bentuk yang signifikan dari fase larva atau tahap muda menjadi bentuk dewasa. Proses metamorfosis melibatkan perubahan struktur tubuh yang sangat berbeda dari fase awal ke fase dewasa, sering kali melibatkan perkembangan sistem saraf, pencernaan, dan organ reproduksi. Metamorfosis dibagi menjadi dua jenis utama: metamorfosis sempurna dan metamorfosis tidak sempurna.

#### ▷ Metamorfosis pada Serangga

Metamorfosis pada serangga adalah proses perkembangan yang melibatkan perubahan fisik yang signifikan dari tahap muda hingga dewasa. Proses ini memungkinkan serangga untuk beradaptasi dengan lingkungannya pada setiap tahap kehidupan.

- Metamorfosis Sempurna (Holometabolisme)

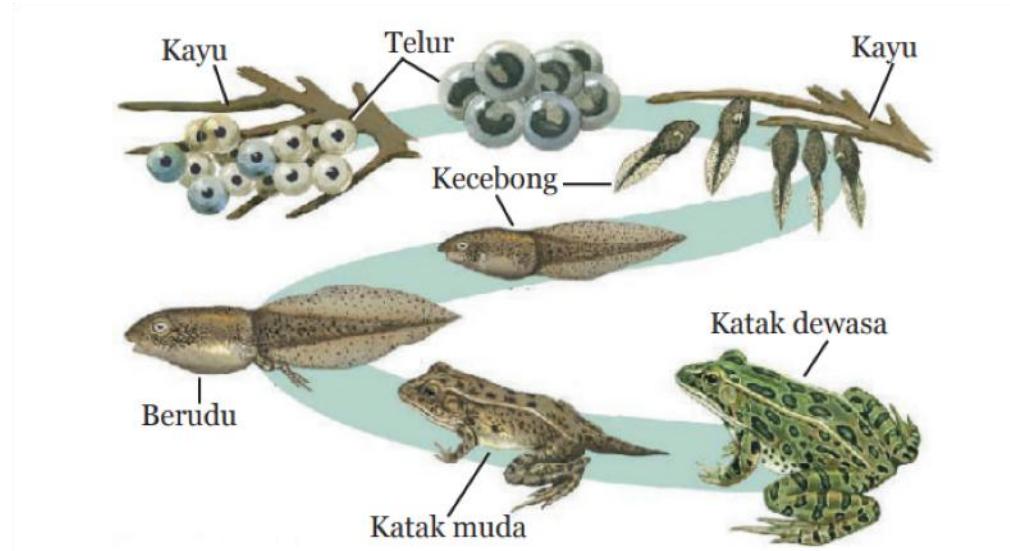
Metamorfosis sempurna (holometabolisme): Serangga melewati empat tahap perkembangan, yaitu telur, larva, pupa, dan dewasa. Setiap tahap memiliki bentuk dan fungsi yang sangat berbeda. Contohnya adalah kupu-kupu, lalat, dan kumbang.

- Metamorfosis Tidak Sempurna (Hemimetabolisme)

Metamorfosis tidak sempurna (hemimetabolisme): Serangga hanya melewati tiga tahap, yaitu telur, nimfa, dan dewasa. Nimfa menyerupai bentuk dewasa, namun ukurannya lebih kecil dan belum berkembang sempurna, seperti pada belalang dan capung.

## ▷ **Metamorfosis pada Katak**

Metamorfosis pada katak adalah proses perkembangan kompleks yang melibatkan perubahan morfologi, fisiologi, dan habitat dari fase larva (berudu) hingga fase dewasa. Katak memulai siklus hidupnya sebagai telur yang menetas menjadi larva yang hidup di air, bernapas melalui insang, dan kemudian berkembang menjadi katak dewasa yang hidup di darat dan bernapas menggunakan paru-paru. Proses ini diatur oleh hormon tiroksin, yang mengendalikan perubahan besar dalam tubuh katak selama metamorfosis. Berikut tahapan metamorfosis pada katak:



Ilustrasi metamorphosis pada katak – [Mediaindonesia.com](http://Mediaindonesia.com)

- **Telur**

Metamorfosis dimulai ketika katak betina bertelur di air. Telur ini biasanya dikelilingi oleh lapisan jeli yang melindungi embrio di dalamnya. Setelah beberapa hari hingga minggu, tergantung pada suhu dan kondisi lingkungan, telur menetas menjadi berudu.

- **Berudu (Larva)**

Berudu adalah fase larva katak yang hidup sepenuhnya di air dan bernapas menggunakan insang. Pada tahap ini, berudu memiliki tubuh seperti ikan dengan ekor panjang untuk berenang dan mulut kecil untuk memakan alga dan tumbuhan air. Organ pernapasan dan sistem pencernaan dirancang untuk kehidupan akuatik. Berudu juga memiliki sirip ekor untuk berenang dan tidak memiliki kaki.

- **Perkembangan Kaki dan Paru-Paru**

Seiring waktu, berudu mulai mengalami perubahan fisik yang penting. Kaki belakang pertama kali muncul, diikuti oleh kaki depan. Paru-paru mulai berkembang dan berudu mulai beradaptasi untuk bernapas di udara. Pada tahap ini, mereka mengurangi ketergantungan pada insang, meskipun mereka tetap hidup di air. Sistem pencernaan berudu juga berubah untuk beralih dari diet herbivora (pemakan alga) ke diet karnivora, yang lebih cocok untuk katak dewasa.

- **Hilangnya Ekor dan Perubahan Sistem Tubuh**

Tahap terakhir metamorfosis melibatkan penyusutan dan hilangnya ekor berudu, serta penyempurnaan paru-paru dan sistem pernapasan katak. Katak muda, yang dikenal sebagai katak muda atau froglet, mulai hidup di darat dan mampu bernapas melalui paru-

paru, meskipun beberapa spesies katak tetap dapat menyerap oksigen melalui kulit. Pada tahap ini, katak memiliki semua ciri fisik katak dewasa.

- **Katak Dewasa**

Setelah metamorfosis selesai, katak telah berubah sepenuhnya menjadi hewan darat yang hidup di air hanya untuk bertelur. Mereka berkembang menjadi karnivora yang memakan serangga, cacing, dan hewan kecil lainnya

Metamorfosis pada katak dikendalikan oleh hormon tiroksin, yang diproduksi oleh kelenjar tiroid. Tiroksin merangsang perubahan fisik dan perkembangan organ yang memungkinkan katak bertransisi dari kehidupan akuatik menjadi kehidupan di darat. Perubahan ini termasuk penggantian insang dengan paru-paru, perkembangan kaki, dan penyusutan ekor.

### c. Metagenesis

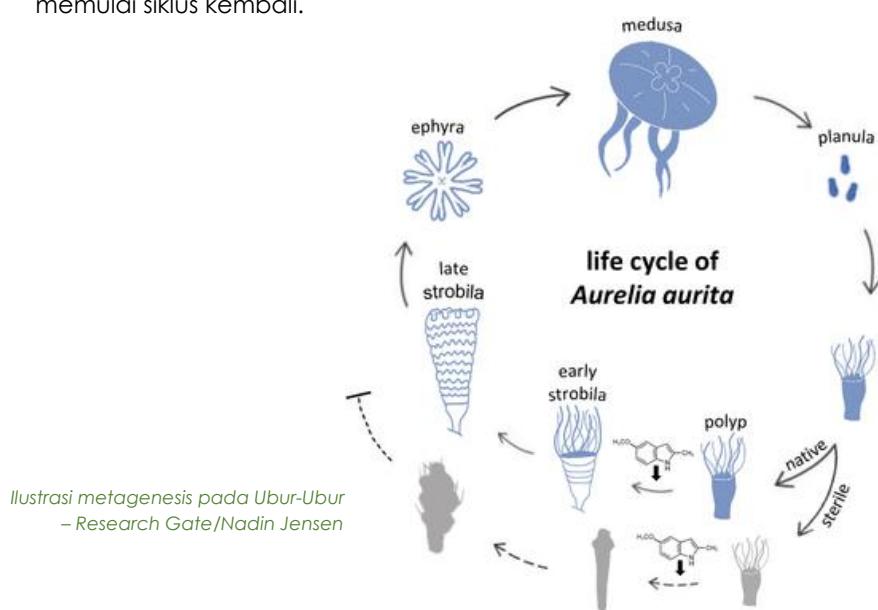
Metagenesis adalah pergantian antara fase reproduksi seksual dan aseksual dalam siklus hidup suatu organisme. Pada beberapa organisme, termasuk beberapa jenis hewan dan tumbuhan, metagenesis memungkinkan mereka untuk bergantian antara menghasilkan keturunan melalui reproduksi seksual (dengan fertilisasi) dan reproduksi aseksual (tanpa fertilisasi). Pergantian generasi ini melibatkan perubahan antara generasi yang menghasilkan gamet (generasi seksual) dan generasi yang berkembang biak secara vegetatif atau aseksual. Metagenesis umum terjadi pada kelompok tertentu seperti cnidaria (misalnya, ubur-ubur) dan beberapa jenis tumbuhan, seperti lumut dan tumbuhan paku. Siklus hidup ubur-ubur adalah contoh klasik metagenesis, di mana mereka bergantian antara fase polip (fase aseksual) dan fase medusa (fase seksual).

#### a. Fase Polip (Aseksual)

Pada fase ini, ubur-ubur hidup sebagai polip yang menempel pada substrat di dasar laut. Polip bereproduksi secara aseksual melalui proses yang disebut budding (pertunasan), di mana polip menciptakan individu baru yang identik dengan dirinya sendiri tanpa pembuahan.

#### b. Fase Medusa (Seksual)

Polip kemudian mengalami strobilasi, yaitu pembelahan polip menjadi banyak bagian, yang kemudian berkembang menjadi medusa. Medusa adalah bentuk dewasa ubur-ubur yang berenang bebas di laut. Pada fase ini, ubur-ubur medusa bereproduksi secara seksual, menghasilkan gamet (sperma dan sel telur) yang akan bersatu untuk membentuk zigot. Zigot ini berkembang menjadi larva yang akhirnya menetap di dasar laut dan tumbuh menjadi polip, memulai siklus kembali.

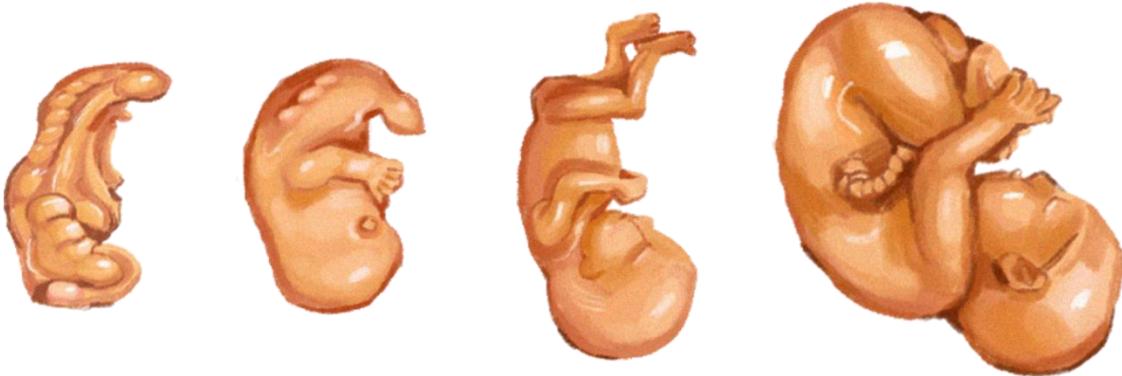




### Jantung Janin Berdetak Sebelum Wajahnya Terbentuk

Jantung manusia mulai berdetak hanya sekitar 22 hari setelah pembuahan, bahkan sebelum janin punya wajah yang lengkap.

Organ ini adalah salah satu yang pertama terbentuk karena fungsinya sangat penting untuk mengalirkan nutrisi dan oksigen ke seluruh bagian tubuh yang sedang berkembang. Jadi, saat kamu baru seukuran kacang, jantungmu sudah bekerja keras!.



### Contoh Soal

Mengapa tahap gastrulasi dianggap sangat penting dalam perkembangan embrio hewan dan manusia?

#### Jawaban:

Gastrulasi penting karena pada tahap inilah terbentuk tiga lapisan embrionik utama: ektoderm, mesoderm, dan endoderm. Lapisan-lapisan ini akan berkembang menjadi berbagai organ dan sistem tubuh. Tanpa proses ini, embrio tidak akan membentuk struktur tubuh yang terorganisasi dengan baik.

#### Pembahasan:

Gastrulasi merupakan fase kritis karena menentukan arah diferensiasi sel dan pola dasar tubuh makhluk hidup. Ektoderm akan membentuk sistem saraf dan kulit, mesoderm membentuk otot dan tulang, sedangkan endoderm membentuk organ dalam seperti usus dan paru-paru. Posisi dan pembentukan lapisan ini akan menentukan perkembangan normal atau cacatnya suatu organisme.

### Kegiatan Kelompok 2

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan memahami tahapan pertumbuhan dan perkembangan manusia sejak zigot hingga dewasa, menganalisis faktor yang mempengaruhi pertumbuhan di setiap tahap, dan memvisualisasikan perjalanan kehidupan manusia secara kreatif dan sistematis

1. Buatlah kelompok yang terdiri dari 4 orang lalu siapkan alat dan bahan berikut:
2. Buat diagram atau poster visual perjalanan pertumbuhan manusia:
3. Untuk setiap tahap, lengkapi informasi:
  - ▷ Ciri fisik utama

- ▷ Perkembangan organ/jaringan penting
  - ▷ Faktor yang mempengaruhi (hormon, nutrisi, lingkungan, gaya hidup)
4. Buat ilustrasi atau gambar sederhana untuk setiap tahap.
  5. Diskusikan Pertanyaan berikut:
    - ▷ Apa perbedaan pertumbuhan dan perkembangan pada manusia?
    - ▷ Bagaimana faktor eksternal seperti nutrisi atau penyakit mempengaruhi perjalanan pertumbuhan?
    - ▷ Mengapa masa remaja disebut masa pertumbuhan pesat?
    - ▷ Apa pentingnya memahami tahapan pertumbuhan manusia?

## Rangkuman

Pertumbuhan didefinisikan sebagai peningkatan ukuran dan massa yang bersifat kuantitatif, sementara perkembangan mencakup perubahan kualitatif dalam bentuk dan fungsi, seperti diferensiasi sel dan pembentukan organ.

Pada tumbuhan, pertumbuhan dan perkembangan diatur oleh faktor internal seperti hormon (auksin, giberelin, sitokin, etilen) dan faktor eksternal seperti nutrisi, cahaya, air, suhu, pH tanah, dan gravitasi. Proses pertumbuhan primer melibatkan pemanjangan batang dan akar, sedangkan pertumbuhan sekunder menghasilkan penebalan batang dan akar pada tumbuhan berkayu. Dalam perkembangan tumbuhan, proses seperti perkecambahan, pembelahan sel, diferensiasi, dan fotoperiodisme sangat mempengaruhi pola pertumbuhan.

Pada hewan dan manusia, pertumbuhan dan perkembangan diawali dengan tahap embrio, yang mencakup morulasi, blastulasi, gastrulasi, dan organogenesis. Tahap pasca embrio melibatkan proses regenerasi, yang memungkinkan pemulihian jaringan, dan metamorfosis, yang sangat penting dalam siklus hidup beberapa hewan, terutama serangga dan amfibi. Proses ini memungkinkan perubahan fisiologis yang signifikan dari fase larva hingga fase dewasa. Di samping itu, pada beberapa organisme seperti tumbuhan paku, lumut, dan ubur-ubur, metagenesis melibatkan pergantian antara reproduksi seksual dan aseksual, memberikan fleksibilitas reproduktif dan adaptasi lingkungan.

Secara keseluruhan, pertumbuhan dan perkembangan makhluk hidup sangat dipengaruhi oleh interaksi antara faktor internal dan eksternal, serta regulasi genetik dan hormonal yang memastikan setiap tahap berlangsung dengan baik untuk mendukung kelangsungan hidup dan reproduksi.

## Latihan Soal

1. Perbedaan utama antara pertumbuhan dan perkembangan pada makhluk hidup adalah...
  - a. Pertumbuhan bersifat kualitatif, perkembangan bersifat kuantitatif
  - b. Pertumbuhan menyebabkan pembentukan organ, perkembangan menyebabkan penambahan ukuran
  - c. Pertumbuhan mencakup perubahan fungsi, perkembangan mencakup perubahan struktur
  - d. Pertumbuhan adalah peningkatan ukuran dan massa, sedangkan perkembangan adalah perubahan bentuk dan fungsi
  - e. Pertumbuhan terjadi setelah perkembangan selesai
2. Hormon tumbuhan yang berperan dalam merangsang pemanjangan sel dan dominansi apikal adalah...
  - a. Giberelin
  - b. Auksin
  - c. Sitokinin
  - d. Etilen
  - e. Asam absisat
3. Pertumbuhan sekunder pada tumbuhan biasanya ditandai oleh...
  - a. Perkecambahan biji
  - b. Penebalan batang dan akar
  - c. Pemanjangan ujung akar
  - d. Pembentukan daun muda
  - e. Aktivitas fototropisme
4. Tahap perkembangan embrio hewan yang ditandai dengan pembentukan tiga lapisan germinal disebut...
  - a. Fertilisasi
  - b. Morulasi
  - c. Blastulasi
  - d. Gastrulasi
  - e. Organogenesis
5. Peristiwa perubahan bentuk dan struktur tubuh dari larva menjadi dewasa pada katak disebut...
  - a. Regenerasi
  - b. Morfogenesis

- c. Metagenesis
  - d. Reproduksi seksual
  - e. Metamorfosis
6. Salah satu contoh organisme yang mengalami metagenesis adalah...
- a. Ayam
  - b. Kucing
  - c. Ubur-ubur
  - d. Katak
  - e. Belalang
7. Faktor eksternal berikut ini yang tidak memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan secara langsung adalah...
- a. Cahaya
  - b. Suhu
  - c. Gravitasi
  - d. Gen
  - e. pH tanah

**Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!**



## Referensi

- Atwell, B. J., Kriedemann, P. E., & Turnbull, C. G. (1999). *Plants in Action: Adaptation in Nature, Performance in Cultivation*. Macmillan Education Australia.
- Böhme, A. (2005). *Plant Development: The Cellular Basis*. Springer.
- Campbell, N. A., Reece, J. B., & Mitchell, L. G. (2008). *Biology* (8th ed.). Pearson Benjamin Cummings.
- Gilbert, S. F. (2010). *Developmental Biology* (9th ed.). Sinauer Associates.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2009). *Introduction to Plant Physiology* (4th ed.). Wiley.
- Jones, M. L., & Jones, P. C. (2011). *Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action!* Springer.
- Mauseth, J. D. (2014). *Botany: An Introduction to Plant Biology* (5th ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Peters, R. A., & Fernández, S. (2015). *Invertebrate Zoology: A Functional Evolutionary Approach*. Oxford University Press.
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2013). *Biology of Plants* (8th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Smith, R. L. (2012). *Elements of Ecology* (8th ed.). Pearson Education.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Trewavas, A. (2003). *Plant Behaviour and Intelligence*. Oxford University Press.
- Wagner, G. P., & Zhang, J. (2011). The Systems Biology of Developmental Evolution. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 242-265.
- Willey, N. (2009). *Environmental Plant Physiology*. Garland Science



## BAB 4:

# PERJALANAN LUAR BIASA EVOLUSI

### Karakter Pelajar Pancasila

#### ▷ Beriman, Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa, dan Berakhlak Mulia

Menghargai keindahan ciptaan Tuhan dalam proses evolusi dan menghargai pengetahuan ilmiah yang menjelaskan bagaimana makhluk hidup berkembang dan beradaptasi dengan lingkungannya.

### Tujuan Pembelajaran: Memahami Perjalanan Evolusi

#### 1. Menjelaskan Perbandingan Teori Evolusi

- ▷ Memahami teori evolusi yang disampaikan oleh Lamarck, Weismann, dan Darwin.
- ▷ Membandingkan perbedaan mendasar antara ketiga teori tersebut.

#### 2. Menjelaskan Fenomena Berkaitan dengan Teori Evolusi

- ▷ Mengidentifikasi dan menjelaskan konsep adaptasi dan seleksi alam.
- ▷ Memberikan contoh nyata dari fenomena adaptasi dan seleksi alam yang mendukung teori evolusi.

#### 3. Mendeskripsikan Bukti Adanya Evolusi

- ▷ Menggambarkan petunjuk evolusi berdasarkan fosil, perbandingan anatomi, dan embriologi.
- ▷ Menjelaskan proses domestikasi sebagai bukti adanya evolusi.



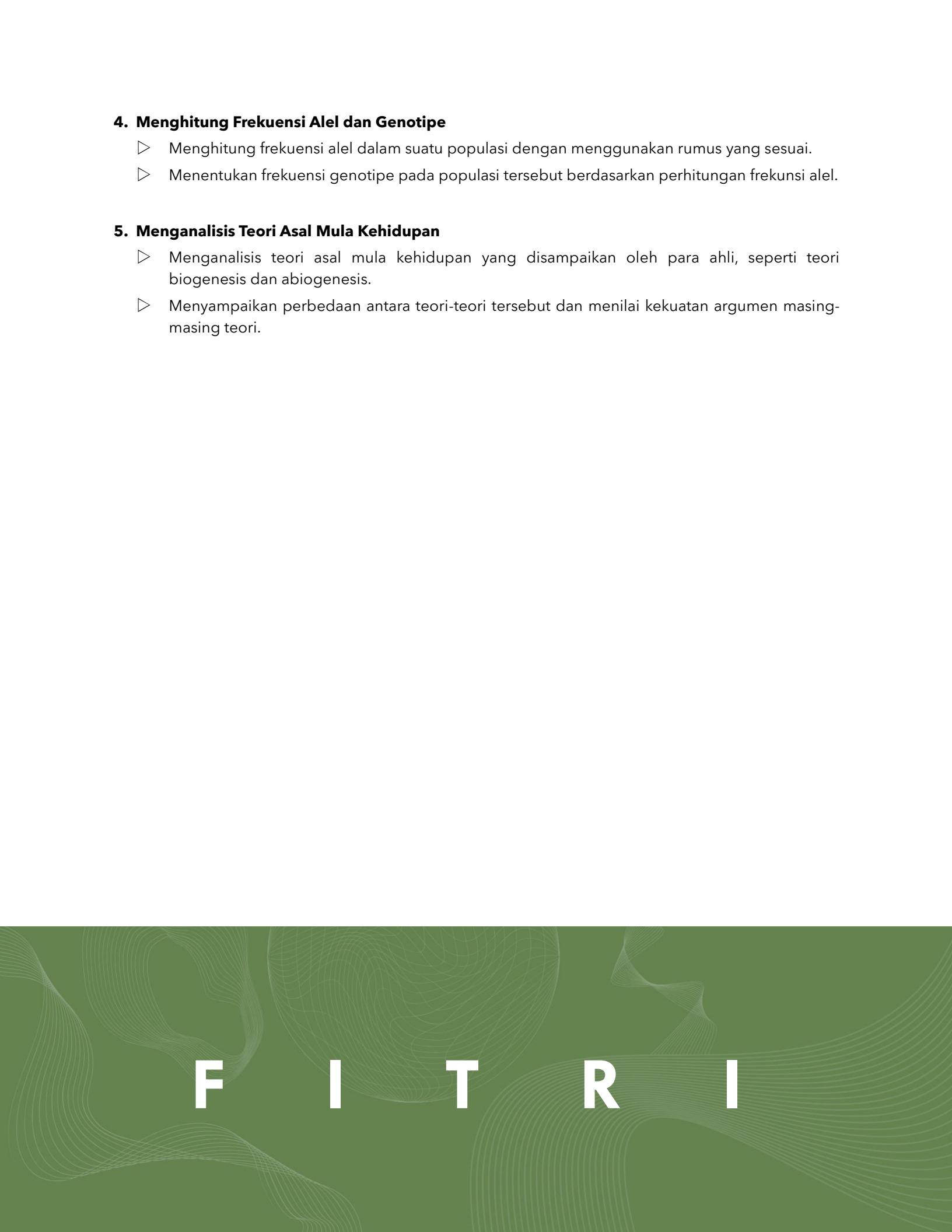
**Kata Kunci:** Evolusi, Teori Evolusi, Adaptasi, Seleksi Alam, Fosil, Anatomi, Embriologi, Genotipe.

#### **4. Menghitung Frekuensi Alel dan Genotipe**

- ▷ Menghitung frekuensi alel dalam suatu populasi dengan menggunakan rumus yang sesuai.
- ▷ Menentukan frekuensi genotipe pada populasi tersebut berdasarkan perhitungan frekuensi alel.

#### **5. Menganalisis Teori Asal Mula Kehidupan**

- ▷ Menganalisis teori asal mula kehidupan yang disampaikan oleh para ahli, seperti teori biogenesis dan abiogenesis.
- ▷ Menyampaikan perbedaan antara teori-teori tersebut dan menilai kekuatan argumen masing-masing teori.



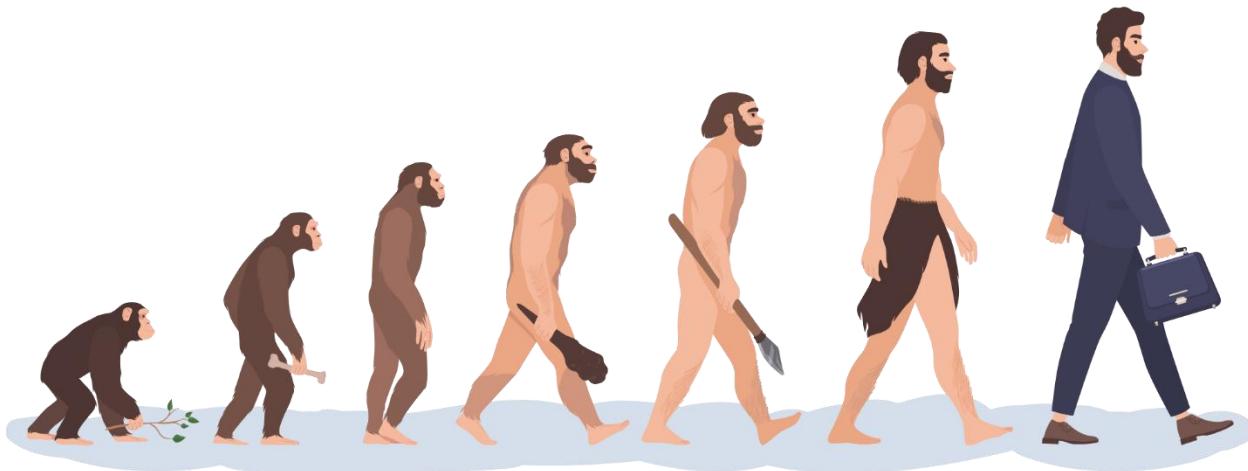
**F I T R I**



## 1. Makna dan Konsep Evolusi

Evolusi adalah proses perubahan yang berlangsung secara bertahap pada makhluk hidup dari generasi ke generasi. Perubahan ini melibatkan sifat-sifat genetik, baik dalam struktur fisik, perilaku, maupun fungsi organisme. Secara umum, evolusi dapat diartikan sebagai proses alamiah yang menyebabkan keragaman dan adaptasi organisme terhadap lingkungannya, sehingga memungkinkan kelangsungan hidup spesies dalam jangka waktu yang panjang.

Dalam konteks biologi, evolusi tidak hanya mencakup perubahan sederhana pada ciri-ciri makhluk hidup, tetapi juga mencakup proses kompleks yang terjadi pada tingkat genetik dan molekuler. Proses ini menyebabkan munculnya variasi baru yang dapat diwariskan dan diuji oleh tekanan seleksi alam. Para ilmuwan, melalui berbagai penelitian, telah menyimpulkan bahwa evolusi merupakan salah satu prinsip fundamental yang menjelaskan bagaimana kehidupan berkembang dan beradaptasi sepanjang sejarah bumi. Oleh karena itu, pemahaman tentang evolusi menjadi landasan penting dalam mempelajari biologi modern, ekologi, serta ilmu genetika.



### Evolusi Kosmik

Evolusi kosmik mengacu pada perubahan dan perkembangan yang terjadi pada skala alam semesta. Konsep ini mencakup asal-usul dan pembentukan materi, bintang, planet, serta tata surya, termasuk Bumi sebagai salah satu planet yang mendukung kehidupan. Evolusi kosmik menjelaskan bagaimana elemen-elemen dasar terbentuk melalui reaksi nuklir di inti bintang dan bagaimana planet-planet terbentuk dari sisa-sisa ledakan supernova. Pemahaman tentang evolusi kosmik memberikan wawasan mengenai kondisi awal terbentuknya Bumi dan kemunculan komponen dasar yang mendukung kehidupan.

### Evolusi Organik

Evolusi organik merujuk pada perubahan yang terjadi pada tingkat organisme dan populasi makhluk hidup di Bumi. Proses ini melibatkan transformasi sifat-sifat genetik dan fisiologis dari generasi ke generasi, yang menyebabkan munculnya spesies baru dan adaptasi terhadap lingkungan. Evolusi organik dipelajari melalui bukti-bukti fosil, studi perbandingan anatomi, dan analisis genetika. Para ilmuwan mendalami proses ini untuk memahami mekanisme seleksi alam, mutasi, dan aliran gen yang berperan dalam perkembangan keanekaragaman hayati.

## Evolusi Biologi

Evolusi biologi berfokus pada perubahan sifat genetik dalam populasi makhluk hidup, yang terjadi melalui mekanisme-mekanisme seperti mutasi, rekombinasi genetik, seleksi alam, dan isolasi reproduktif. Dalam konteks ini, evolusi biologi memberikan penjelasan tentang bagaimana sifat-sifat organisme dapat berubah seiring berjalananya waktu dan bagaimana spesies baru dapat terbentuk dari spesies sebelumnya. Teori evolusi Darwin tentang seleksi alam menjadi landasan dari evolusi biologi ini, di mana lingkungan menjadi faktor penentu dalam proses adaptasi dan kelangsungan hidup organisme.

### a. Jenis Evolusi Biologi

#### 1) Mikroevolusi

- ▷ Definisi: Mikroevolusi adalah perubahan kecil dalam frekuensi alel di dalam populasi suatu spesies dari generasi ke generasi.
- ▷ Faktor-faktor: Perubahan ini sering kali terjadi akibat faktor-faktor seperti mutasi genetik, aliran gen, perkawinan yang tidak acak, hanyutan genetik, dan seleksi alam. Mikroevolusi melibatkan perubahan yang dapat diamati dalam skala waktu yang relatif singkat dan biasanya mempengaruhi sifat-sifat tertentu dalam spesies tersebut.
- ▷ Contoh: Perubahan warna pada serangga atau hewan lainnya, yang dapat memberikan keuntungan dalam bertahan hidup di lingkungan tertentu. Studi tentang mikroevolusi membantu para ilmuwan memahami bagaimana variasi genetik terbentuk dan terakumulasi dalam suatu populasi, serta bagaimana perubahan-perubahan ini dapat mempengaruhi adaptasi spesies terhadap lingkungannya.

#### 2) Makroevolusi

- ▷ Definisi: Makroevolusi mengacu pada perubahan besar yang terjadi dalam jangka waktu yang lebih panjang, biasanya melibatkan terbentuknya spesies baru atau kelompok taksonomi yang lebih besar. Proses ini mencakup peristiwa besar dalam sejarah kehidupan, seperti spesiasi, kepunahan massal, dan evolusi kelompok besar organisme, seperti mamalia, burung, atau serangga.
- ▷ Contoh: Makroevolusi lebih difokuskan pada pola-pola besar dan proses sejarah dalam kehidupan di Bumi, seperti asal-usul burung dari dinosaurus atau kemunculan mamalia dari reptil. Bukti-bukti makroevolusi biasanya diperoleh dari studi fosil, analisis filogenetik, dan pengamatan pada kelompok spesies yang memiliki hubungan evolusi yang erat.

Proses mikroevolusi dan makroevolusi berkaitan erat, di mana perubahan-perubahan kecil yang terjadi dalam mikroevolusi, jika terakumulasi dalam waktu yang sangat lama, dapat berkontribusi pada proses makroevolusi.

### b. Jenis Evolusi Berdasarkan Akibat yang Ditimbulkan

#### 1) Evolusi Progresif

- ▷ Definisi: Evolusi progresif adalah jenis evolusi yang menghasilkan perkembangan atau peningkatan dalam kompleksitas dan adaptasi makhluk hidup. Pada evolusi progresif, perubahan yang terjadi cenderung menghasilkan sifat-sifat baru yang lebih kompleks, efisien, dan adaptif, yang memungkinkan organisme untuk bertahan hidup lebih baik di lingkungan yang terus berubah. Proses ini mengarah pada pembentukan spesies atau organisme yang memiliki kemampuan dan struktur yang lebih maju dibandingkan dengan nenek moyangnya.
- ▷ Contoh: Perkembangan otak yang lebih kompleks pada mamalia, evolusi sayap pada burung untuk memudahkan penerbangan, atau adaptasi kaki amfibi menjadi struktur yang lebih efisien

untuk bergerak di darat. Evolusi progresif sering kali dikaitkan dengan kemunculan fitur-fitur baru yang meningkatkan kemampuan bertahan hidup, reproduksi, dan eksplorasi habitat baru.

## 2) Evolusi Regresif

- ▷ Definisi: Evolusi regresif, sebaliknya, adalah jenis evolusi yang menghasilkan penurunan atau penyederhanaan struktur atau fungsi makhluk hidup. Pada evolusi regresif, organisme kehilangan atau mengurangi fungsi atau struktur yang tidak lagi diperlukan untuk bertahan hidup di lingkungan tertentu. Evolusi ini terjadi ketika suatu sifat tidak lagi memberikan keuntungan bagi organisme tersebut, dan seleksi alam cenderung menghilangkan sifat tersebut secara bertahap.
- ▷ Contoh: Pengurangan mata pada ikan gua yang hidup di kegelapan total atau pengurangan struktur kaki pada ular yang berevolusi dari nenek moyang yang berkaki. Pada kasus seperti ini, kehilangan struktur yang tidak berguna justru dapat meningkatkan efisiensi atau menghemat energi, sehingga memberikan keuntungan adaptif bagi spesies tersebut.

## c. Jenis Evolusi Berdasarkan Jumlah Spesies yang Berevolusi

### 1) Evolusi Divergensi

- ▷ Definisi: Evolusi divergensi adalah proses evolusi di mana satu spesies asal atau nenek moyang yang sama berkembang menjadi beberapa spesies yang berbeda karena adaptasi terhadap lingkungan atau kondisi yang berbeda. Evolusi ini terjadi ketika suatu populasi terpisah atau mengalami tekanan lingkungan yang berbeda, sehingga menghasilkan variasi genetik yang signifikan dan spesies baru yang memiliki ciri-ciri khusus yang berbeda dari spesies nenek moyangnya.
- ▷ Contoh: Perkembangan berbagai jenis burung finch di Kepulauan Galapagos. Meskipun semua burung finch ini berasal dari satu nenek moyang yang sama, mereka berevolusi menjadi spesies yang berbeda dengan variasi bentuk paruh yang sesuai dengan jenis makanan dan lingkungan tempat tinggalnya. Evolusi divergensi menyebabkan munculnya keanekaragaman spesies yang beradaptasi dengan habitat yang beragam.

### 2) Evolusi Konvergensi

- ▷ Definisi: Evolusi konvergensi adalah proses evolusi di mana spesies yang tidak memiliki hubungan nenek moyang yang dekat mengembangkan ciri-ciri atau adaptasi yang mirip karena menghadapi tekanan lingkungan atau tantangan yang serupa. Dalam evolusi konvergensi, spesies-spesies yang berevolusi secara independen mengembangkan struktur atau fungsi yang mirip, meskipun secara genetik mereka tidak terkait erat.
- ▷ Contoh: Kemiripan bentuk tubuh pada ikan paus (mamalia laut) dan ikan hiu (ikan bertulang rawan). Kedua organisme ini tidak memiliki hubungan kekerabatan yang dekat, tetapi mereka mengembangkan struktur tubuh yang mirip karena adaptasi terhadap kehidupan di lingkungan laut yang sama. Evolusi konvergensi menunjukkan bagaimana tekanan seleksi alam dapat menghasilkan adaptasi yang serupa pada spesies yang berbeda.

## Contoh Soal

Jelaskan perbedaan utama antara mikroevolusi dan makroevolusi serta berikan masing-masing satu contohnya!

### Jawaban:

Mikroevolusi adalah perubahan kecil dalam frekuensi alel suatu populasi dalam waktu singkat, seperti perubahan warna serangga karena lingkungan.

Makroevolusi adalah perubahan besar dalam jangka panjang yang menghasilkan spesies baru, contohnya burung berevolusi dari dinosaurus.

### Pembahasan:

Mikroevolusi terjadi dalam skala kecil dan biasanya dapat diamati langsung dalam beberapa generasi, sedangkan makroevolusi mencakup proses besar yang memerlukan waktu jutaan tahun. Meskipun berbeda skala, keduanya saling berkaitan karena makroevolusi merupakan akumulasi dari mikroevolusi dalam waktu panjang.



## 2. Teori-teori Besar tentang Evolusi

Teori evolusi adalah konsep ilmiah yang menjelaskan bagaimana organisme hidup mengalami perubahan secara bertahap dari generasi ke generasi. Perubahan ini terjadi melalui mekanisme seleksi alam, variasi genetik, mutasi, dan berbagai proses evolusi lainnya yang menyebabkan munculnya spesies baru dan adaptasi terhadap lingkungan. Teori evolusi telah menjadi dasar dari banyak bidang biologi modern, dan memberikan pemahaman mendalam tentang asal-usul keanekaragaman hayati di Bumi.

### Perkembangan Pemikiran Evolusi Sebelum Teori Darwin

Sebelum Charles Darwin mengajukan teorinya tentang evolusi melalui seleksi alam, pemikiran tentang perubahan dalam organisme telah berkembang selama berabad-abad. Berbagai filsuf dan ilmuwan di masa lalu telah berkontribusi dalam membangun gagasan tentang evolusi, meskipun dengan pendekatan yang berbeda-beda. Berikut adalah beberapa pemikiran penting sebelum Darwin:

**a. Plato (427-347 SM)**

Plato, seorang filsuf Yunani kuno, memperkenalkan konsep bahwa segala sesuatu di dunia memiliki bentuk ideal atau "eidos" yang abadi dan tidak berubah. Meskipun pemikirannya tidak secara langsung mendukung evolusi, konsep tentang bentuk yang ideal ini menjadi dasar dari gagasan mengenai esensi atau ciri khas dari setiap makhluk hidup.

**b. Aristoteles (384-322 SM)**

Aristoteles, murid Plato, mengembangkan konsep "Scala Naturae" atau tangga kehidupan. Dalam pandangannya, semua makhluk hidup diatur dalam hierarki dari yang paling sederhana hingga yang paling kompleks. Aristoteles percaya bahwa spesies bersifat tetap dan tidak berubah. Pemikiran ini menjadi landasan bagi pandangan tentang kehidupan yang tersusun secara hierarkis.

**c. Copernicus (1473-1543) dan Galileo (1564-1642)**

Pada masa Renaisans, pemikiran ilmiah mulai mengalami revolusi dengan temuan bahwa Bumi bukanlah pusat alam semesta. Copernicus memperkenalkan teori heliosentrism pada tahun 1543, diikuti oleh Galileo yang menguatkan teori ini melalui pengamatan astronomi pada tahun 1609-1610. Meskipun pemikiran mereka tidak berhubungan langsung dengan evolusi, perubahan pandangan tentang alam semesta ini membuka jalan bagi pertanyaan kritis tentang pandangan tradisional dan mendorong perkembangan pemikiran ilmiah.

**d. Erasmus Darwin (1731-1802)**

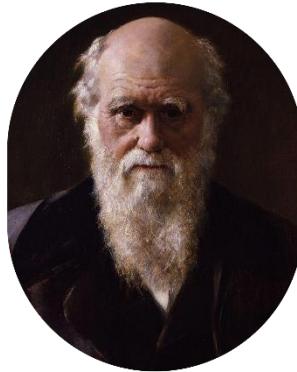
Erasmus Darwin adalah seorang dokter dan filsuf alam yang menyusun gagasan bahwa makhluk hidup mengalami perubahan secara bertahap dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Pada tahun 1794, ia menulis buku Zoonomia, di mana ia menyarankan bahwa semua makhluk hidup mungkin berasal dari nenek moyang yang sama dan mengalami transformasi seiring waktu. Meskipun ia tidak menjelaskan mekanisme perubahan ini, pemikirannya menjadi inspirasi awal bagi cucunya, Charles Darwin.

**e. Baron George Cuvier (1769-1832)**

Cuvier adalah seorang ahli paleontologi dan anatomi yang mengemukakan teori "katastrofisme". Dalam teorinya, Cuvier menyatakan bahwa kehidupan di Bumi mengalami perubahan yang drastis karena bencana alam yang besar, seperti banjir atau gempa bumi, yang menyebabkan kepunahan spesies-spesies tertentu. Temuan fosil oleh Cuvier antara tahun 1796 hingga 1812 memperkuat gagasan bahwa spesies tidak bersifat tetap, meskipun ia menolak ide evolusi bertahap.

## Perjalanan Darwin dalam Penemuan Teori Evolusi

Charles Darwin (1809–1882) adalah seorang ilmuwan alam yang terkenal karena teori evolusi melalui seleksi alam, yang ia rumuskan berdasarkan pengamatan selama perjalanan ekspedisinya ke berbagai belahan dunia. Perjalanan Darwin yang paling signifikan dalam pengembangan teorinya terjadi selama ekspedisi HMS Beagle (1831–1836), ketika ia mengunjungi banyak tempat di belahan bumi bagian selatan, termasuk Kepulauan Galapagos. Dalam perjalannya, Darwin mengumpulkan berbagai data tentang keanekaragaman hayati, variasi spesies, dan adaptasi makhluk hidup terhadap lingkungan yang berbeda. Berikut adalah beberapa penemuan kunci Darwin selama perjalannya:



Charles Darwin - Wikipedia

### a. **Geospiza magnirostris**

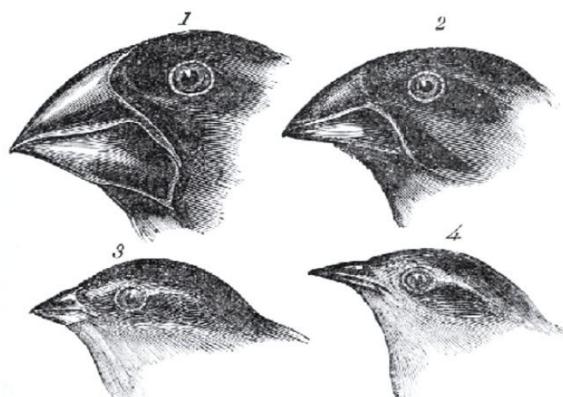
Di Kepulauan Galapagos, Darwin menemukan bahwa burung finch memiliki variasi bentuk paruh yang berbeda di setiap pulau. Salah satu spesies yang ia temukan adalah *Geospiza magnirostris*, atau Finch Paruh Besar. Burung ini memiliki paruh yang kuat dan besar, cocok untuk memecah biji-bijian keras. Pengamatan ini memberikan inspirasi bagi Darwin untuk memikirkan bagaimana variasi adaptif muncul dalam populasi dan bagaimana spesies bisa berevolusi.

### b. **Camarhynchus parvulus**

Darwin juga mencatat adanya variasi lain dari burung finch, yaitu *Camarhynchus parvulus*, atau Finch Paruh Kecil. Spesies ini memiliki paruh yang lebih kecil dan lebih halus, memungkinkan mereka untuk mencari serangga kecil sebagai sumber makanan. Variasi ini memberikan bukti tambahan tentang bagaimana spesies yang sama dapat mengalami perubahan karakteristik tergantung pada ketersediaan makanan dan kondisi lingkungan.

### c. **Camarhynchus pallidus**

Selain itu, Darwin juga menemukan spesies burung finch yang disebut *Camarhynchus pallidus*. Burung ini memiliki paruh yang ramping dan tajam, yang memungkinkannya untuk menggunakan ranting kecil sebagai alat untuk mencari serangga di celah-celah pohon. Penggunaan alat oleh burung ini menjadi salah satu bukti kecerdikan adaptasi spesies dalam menghadapi lingkungan yang penuh tantangan. Pengamatan terhadap burung finch ini menunjukkan kepada Darwin bahwa spesies dapat berubah dan beradaptasi untuk bertahan hidup, dan variasi tersebut diwariskan kepada keturunannya. Inilah yang menjadi dasar pemikirannya tentang seleksi alam, di mana hanya individu yang memiliki sifat-sifat paling sesuai dengan lingkungan yang dapat bertahan dan berkembang biak.



1. *Geospiza magnirostris*  
3. *Geospiza parvula*

2. *Geospiza fortis*  
4. *Certhidea olivacea*

Finches from Galápagos Archipelago

Evolusi paruh burung finch – Kompas.com/Silmi Nurul Utami

## Teori Evolusi Darwin, Adaptasi, dan Seleksi Alam

Teori evolusi yang dirumuskan oleh Charles Darwin berpusat pada konsep seleksi alam, di mana organisme yang memiliki karakteristik yang lebih baik untuk bertahan hidup dan bereproduksi di lingkungannya akan lebih mungkin melanjutkan keturunan. Dalam teori ini, Darwin menjelaskan bahwa variasi dalam sifat-sifat makhluk hidup terjadi secara acak melalui keturunan, dan seleksi alam memilih sifat-sifat yang paling sesuai untuk bertahan hidup dalam lingkungan tertentu. Darwin menggambarkan bahwa perubahan-perubahan kecil yang terjadi pada organisme dapat menyebabkan munculnya spesies baru dari waktu ke waktu. Ia menyebut proses ini sebagai "seleksi alam" (natural selection), yang menjadi mekanisme utama dalam evolusi.

Organisme yang memiliki sifat-sifat yang lebih menguntungkan akan memiliki kemungkinan yang lebih besar untuk bertahan hidup dan berkembang biak, sementara organisme dengan sifat yang kurang sesuai akan cenderung punah. Selain seleksi alam, Darwin juga membahas adaptasi, yaitu kemampuan makhluk hidup untuk berubah dan menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan yang baru atau berubah. Proses adaptasi ini menjadi inti dari perubahan yang diwariskan dalam suatu populasi.

### a. *An Essay on the Principle of Population*

Pemikiran Darwin tentang seleksi alam sangat dipengaruhi oleh karya Thomas Malthus berjudul *An Essay on the Principle of Population* (1798). Dalam esainya, Malthus berpendapat bahwa populasi manusia cenderung tumbuh secara eksponensial ( $2, 4, 8 \dots 2n$ ), sementara sumber daya seperti makanan tumbuh secara linear ( $1, 2, 3, \dots n+1$ ). Ketidakseimbangan ini menyebabkan kompetisi yang ketat untuk sumber daya, yang akhirnya menghasilkan tekanan selektif dalam populasi.

Malthus menyatakan bahwa kelaparan, penyakit, dan perang adalah mekanisme alami yang mengontrol populasi manusia agar tidak melampaui kapasitas sumber daya yang tersedia. Darwin menerapkan gagasan ini pada dunia alam, di mana organisme bersaing untuk mendapatkan makanan, tempat tinggal, dan pasangan. Organisme yang memiliki sifat-sifat yang menguntungkan akan lebih berhasil dalam kompetisi ini, dan sifat-sifat tersebut akan lebih mungkin untuk diwariskan kepada keturunannya.

Pengaruh dari gagasan Malthus ini membantu Darwin merumuskan konsep seleksi alam sebagai mekanisme yang bertanggung jawab atas evolusi. Darwin menyadari bahwa dalam populasi makhluk hidup, individu-individu yang memiliki variasi adaptif yang lebih baik memiliki peluang lebih besar untuk bertahan hidup dan berkembang biak, sehingga mendorong perubahan bertahap dalam suatu spesies.

### b. *Principles of Geology*

Selama perjalanannya dengan HMS Beagle, Charles Darwin membawa dan membaca buku *Principles of Geology* karya Charles Lyell. Buku ini, yang pertama kali diterbitkan pada tahun 1830, memperkenalkan Darwin pada konsep penting dalam geologi yang disebut uniformitarianisme. Konsep ini menyatakan bahwa proses geologi yang membentuk Bumi di masa lalu masih berlangsung hingga saat ini dengan kecepatan yang sama, seperti erosi, sedimentasi, dan aktivitas vulkanik. Prinsip ini bertentangan dengan konsep sebelumnya yang dikenal sebagai catastrophisme, yang menyatakan bahwa perubahan pada Bumi terjadi akibat peristiwa-peristiwa besar dan tiba-tiba, seperti banjir besar atau gempa bumi yang dahsyat.

Charles Lyell berpendapat bahwa perubahan geologis pada Bumi terjadi secara bertahap dan lambat selama jutaan tahun. Ide ini memberikan landasan penting bagi Darwin untuk memahami bahwa perubahan dalam alam, termasuk evolusi makhluk hidup, juga dapat terjadi secara bertahap dalam rentang waktu yang sangat panjang. Darwin menyadari bahwa jika proses geologi dapat membentuk lanskap Bumi secara perlahan, maka mungkin saja proses serupa juga terjadi pada organisme hidup.

Buku Principles of Geology membantu Darwin menyadari pentingnya waktu geologis yang panjang dalam memungkinkan terjadinya perubahan secara perlahan pada makhluk hidup.

Dalam catatan perjalannya, Darwin mengamati bukti-bukti fisik seperti fosil di lapisan batuan yang menunjukkan bahwa kehidupan telah berevolusi selama periode waktu yang sangat lama. Gagasan Lyell tentang uniformitarianisme juga menginspirasi Darwin untuk menyusun pemikirannya tentang bagaimana variasi kecil yang diwariskan dari generasi ke generasi dapat menghasilkan perubahan besar dalam populasi makhluk hidup. Darwin menerapkan prinsip uniformitarianisme dalam teorinya tentang seleksi alam, di mana ia menganggap bahwa tekanan selektif yang berlangsung secara terus-menerus dan konsisten dapat menyebabkan perubahan signifikan pada makhluk hidup selama periode waktu yang panjang. Buku Lyell memberikan kerangka waktu yang diperlukan Darwin untuk memahami dan menjelaskan bagaimana proses evolusi dapat terjadi secara bertahap namun pasti.



### Evolusi Leher Jerapah

Leher jerapah panjang bukan karena dilatih, tapi karena seleksi alam. Jerapah berleher panjang lebih mudah menjangkau makanan dan bertahan hidup. Menariknya, leher jerapah tetap punya jumlah tulang yang sama dengan manusia—tujuh ruas saja.



### Contoh Soal

Bagaimana teori Malthus dan Charles Lyell memengaruhi pemikiran Charles Darwin dalam menyusun teori evolusi?

#### Jawaban:

Pemikiran Malthus tentang persaingan sumber daya membantu Darwin menyadari pentingnya seleksi alam sebagai penyaring sifat-sifat adaptif.

Sementara itu, Charles Lyell melalui konsep uniformitarianisme membuat Darwin memahami bahwa perubahan kecil bisa berdampak besar jika terjadi dalam waktu yang lama.

#### Pembahasan:

Thomas Malthus menyatakan bahwa populasi tumbuh lebih cepat daripada sumber dayanya, sehingga muncul persaingan hidup. Ide ini menginspirasi Darwin untuk merumuskan seleksi alam. Sedangkan Lyell menunjukkan bahwa proses geologi berlangsung lambat namun terus-menerus—paralel dengan proses evolusi yang juga bertahap. Kombinasi dua pemikiran ini menjadi fondasi kuat teori Darwin.



### 3. Lamarck, Weismann, dan Darwin: Perbandingan Gagasan Evolusi

Dalam sejarah perkembangan pemikiran evolusi, terdapat beberapa tokoh utama yang memberikan kontribusi signifikan melalui teori-teori mereka. Di antara para tokoh ini, Jean-Baptiste Lamarck, August Weismann, dan Charles Darwin adalah tiga ilmuwan yang menonjol dengan pandangan dan konsep yang berbeda mengenai proses evolusi dan bagaimana makhluk hidup berubah dari waktu ke waktu.

#### Perbandingan Teori Lamarck dengan Teori Darwin

Lamarck memperkenalkan teori evolusi dengan konsep "warisan sifat-sifat yang didapat" (Inheritance of Acquired Characteristics). Menurut Lamarck, makhluk hidup memiliki kemampuan untuk mengubah sifat fisik atau perilaku mereka sebagai respons terhadap lingkungan yang berubah. Perubahan ini, yang dihasilkan dari penggunaan dan ketidakgunaan organ atau bagian tubuh tertentu, akan diwariskan kepada keturunan mereka.

Sebagai contoh, Lamarck mengemukakan bahwa jerapah pada awalnya memiliki leher yang pendek, tetapi karena sering kali harus mencapai daun di dahan yang tinggi, leher mereka memanjang dari waktu ke waktu. Perubahan ini kemudian diwariskan kepada keturunan mereka, sehingga jerapah-jerapah berikutnya memiliki leher yang panjang. Inti dari teori Lamarck adalah Makhluk hidup secara aktif menyesuaikan diri dengan lingkungannya dan Sifat yang didapat melalui penggunaan organ tubuh dapat diwariskan kepada generasi berikutnya.

Berbeda dengan Lamarck, Charles Darwin memperkenalkan teori "seleksi alam" (Natural Selection) sebagai mekanisme utama evolusi. Dalam teorinya, Darwin berpendapat bahwa makhluk hidup memiliki variasi dalam karakteristik atau sifat bawaan mereka. Beberapa dari sifat-sifat ini memberikan keuntungan dalam bertahan hidup dan berkembang biak dalam lingkungan tertentu.

Makhluk hidup yang memiliki sifat-sifat yang lebih sesuai dengan lingkungan akan lebih mungkin bertahan hidup dan menghasilkan keturunan, yang juga mewarisi sifat-sifat tersebut. Sebagai contoh, menurut Darwin, jerapah yang memiliki variasi alami dalam panjang leher mereka akan lebih mampu mencapai daun di dahan yang tinggi. Jerapah dengan leher yang lebih panjang akan memiliki peluang lebih besar untuk bertahan hidup dan berkembang biak, sehingga sifat ini akan diwariskan ke generasi berikutnya. Inti dari teori Darwin adalah Evolusi terjadi melalui proses seleksi alam dan Variasi dalam sifat bawaan individu merupakan dasar dari proses seleksi.

**Tabel perbandingan Teori Lamarck dan Teori Darwin**

Aspek	Teori Lamarck	Teori Darwin
<b>Mekanisme Evolusi</b>	Warisan sifat yang didapat melalui penggunaan dan ketidakgunaan organ	Seleksi alam berdasarkan variasi bawaan
<b>Asal Usul Variasi</b>	Perubahan terjadi karena makhluk hidup menyesuaikan diri dengan lingkungan	Variasi terjadi secara alami dan acak dalam populasi.
<b>Pewarisan Sifat</b>	Sifat yang didapat dapat diwariskan kepada keturunan.	Sifat bawaan yang menguntungkan diwariskan melalui seleksi alam.
<b>Contoh</b>	Jerapah memanjangkan lehernya untuk mencapai daun tinggi	Jerapah dengan leher lebih panjang lebih mampu bertahan dan berkembang biak

## Perbandingan Teori Weismann dengan Teori Darwin

August Weismann (1834–1914) mengajukan konsep yang dikenal sebagai "teori plasma nutfah" (Germ Plasm Theory). Menurut Weismann, informasi genetik yang menentukan sifat-sifat suatu organisme hanya diwariskan melalui sel-sel kelamin (sperma dan sel telur). Dengan kata lain, hanya perubahan yang terjadi pada sel kelamin yang dapat diwariskan kepada keturunan. Hal ini membantah teori Lamarck yang menyatakan bahwa perubahan dalam sifat-sifat tubuh yang didapat karena penggunaan atau ketidakgunaan organ dapat diwariskan. Weismann menyatakan bahwa tubuh makhluk hidup terdiri dari dua jenis sel, yaitu sel somatik (sel tubuh) yang tidak diwariskan dan sel germinal (sel kelamin) yang mengandung informasi genetik yang diwariskan.



Jean-Baptiste de Lamarck - Wikipedia

Oleh karena itu, perubahan yang terjadi pada sel somatik tidak mempengaruhi pewarisan sifat, karena hanya sel germinal yang berperan dalam pembentukan generasi berikutnya. Charles Darwin mengajukan teori "seleksi alam" (Natural Selection) yang menyatakan bahwa variasi dalam sifat-sifat bawaan di antara individu-individu dalam populasi menyebabkan perbedaan dalam kelangsungan hidup dan kemampuan bereproduksi. Darwin menekankan bahwa variasi alami yang terjadi di antara individu-individu adalah dasar dari evolusi. Dalam proses seleksi alam, sifat-sifat yang lebih sesuai dengan lingkungan memberikan keuntungan bagi individu yang memiliki sifat tersebut, sehingga mereka lebih mungkin bertahan hidup dan mewariskan sifat-sifat tersebut kepada keturunannya.

**Tabel perbandingan Teori Weismann dan Teori Darwin**

Aspek	Teori Weismann	Teori Darwin
<b>Pewarisan Sifat</b>	Sifat hanya diwariskan melalui sel germinal (sel kelamin), bukan melalui perubahan pada sel tubuh.	Sifat diwariskan melalui variasi bawaan dalam populasi
<b>Mekanisme Evolusi</b>	Menekankan pentingnya informasi genetik dalam sel kelamin sebagai sumber pewarisan sifat	Menekankan seleksi alam sebagai mekanisme utama dalam menentukan pewarisan sifat.
<b>Asal Usul Variasi</b>	Variasi terjadi melalui perubahan genetik pada sel kelamin	Variasi terjadi secara alami dan acak dalam populasi

Penelitian Weismann memperkuat teori Darwin dengan memberikan penjelasan yang lebih mendalam tentang mekanisme pewarisan sifat. Weismann menegaskan bahwa hanya perubahan genetik dalam sel kelamin yang dapat diwariskan, yang sesuai dengan konsep Darwin tentang variasi genetik. Penemuan Weismann tentang pentingnya sel germinal menjadi dasar bagi perkembangan ilmu genetika modern, yang kemudian diperkuat oleh penemuan DNA sebagai pembawa informasi genetik. Meskipun Weismann dan Darwin memiliki pendekatan yang berbeda, teori mereka saling melengkapi dan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang evolusi. Teori Darwin tentang seleksi alam menjelaskan mekanisme perubahan dalam populasi, sementara teori Weismann menjelaskan pewarisan sifat yang lebih spesifik melalui sel-sel kelamin.

## Perbandingan Teori Lamarck dengan Teori Weismann

Lamarck berpendapat bahwa makhluk hidup dapat mengubah sifat-sifat mereka sebagai respons terhadap kebutuhan lingkungan. Perubahan ini, yang terjadi karena penggunaan atau ketidakgunaan organ, kemudian diwariskan kepada keturunan. Lamarck menyatakan bahwa leher jerapah memanjang karena mereka secara terus-menerus harus menjangkau daun-daun yang tinggi. Lamarck juga percaya bahwa adaptasi yang terjadi karena penggunaan organ atau bagian tubuh dapat diwariskan kepada keturunan, sehingga keturunan akan memiliki sifat-sifat yang lebih baik untuk bertahan hidup di lingkungan yang sama.

Weismann membantah ide Lamarck dengan melakukan eksperimen terkenal di mana ia memotong ekor tikus selama beberapa generasi dan menunjukkan bahwa keturunan tikus tersebut masih lahir dengan ekor yang utuh. Eksperimen ini menunjukkan bahwa perubahan fisik yang terjadi pada tubuh tidak memengaruhi informasi genetik dalam sel kelamin, sehingga tidak dapat diwariskan.

**Tabel perbandingan Teori Lamarck dan Teori Weismann**

Aspek	Teori Lamarck	Teori Weismann
<b>Mekanisme Pewarisan</b>	Perubahan sifat terjadi karena penggunaan atau ketidakgunaan organ dan diwariskan kepada keturunan	Sifat diwariskan hanya melalui sel germinal (sel kelamin) yang membawa informasi genetik.
<b>Peran Lingkungan</b>	Lingkungan memiliki peran aktif dalam membentuk sifat-sifat organisme melalui adaptasi langsung	Lingkungan tidak mengubah sifat-sifat yang diwariskan, tetapi dapat memberikan tekanan seleksi yang mempengaruhi populasi.
<b>Pewarisan Sifat</b>	Sifat-sifat yang didapat melalui pengalaman atau adaptasi langsung dapat diwariskan	Hanya perubahan dalam sel germinal yang dapat diwariskan, bukan perubahan pada sel somatik

### Contoh Soal

Bandingkan perbedaan pandangan antara Lamarck dan Weismann dalam menjelaskan proses pewarisan sifat!

#### Jawaban:

Lamarck percaya bahwa sifat yang didapat selama hidup, seperti leher panjang karena sering digunakan, dapat diwariskan.

Weismann membantah ini dengan menyatakan bahwa hanya perubahan pada sel kelamin yang bisa diwariskan.

#### Pembahasan:

Lamarck menekankan pentingnya penggunaan organ dalam membentuk sifat baru yang diwariskan. Sebaliknya, Weismann menunjukkan melalui eksperimen bahwa perubahan pada tubuh (sel somatik) tidak memengaruhi keturunan karena hanya sel germinal yang membawa informasi genetik.



## 4. Fenomena Alam yang Mengungkap Evolusi

Evolusi tidak terjadi dalam ruang hampa, melainkan dipengaruhi oleh berbagai fenomena yang terkait dengan interaksi antara organisme dan lingkungannya. Fenomena ini mencakup perubahan genetik yang dipicu oleh lingkungan, adaptasi yang terjadi secara alami, serta proses seleksi alam dan buatan yang mengarahkan perubahan evolusioner dalam populasi. Pemahaman tentang fenomena-fenomena ini memungkinkan kita untuk melihat evolusi sebagai proses dinamis yang terus berlanjut.

### Pengaruh Lingkungan Terhadap Gen

Lingkungan memainkan peran penting dalam menentukan bagaimana gen diekspresikan dan bagaimana variasi genetik muncul dalam populasi. Pengaruh lingkungan terhadap gen dapat dilihat melalui beberapa fenomena, seperti plasticitas fenotip, epigenetika, dan seleksi lingkungan.

#### a. Plasticitas Fenotip

**Definisi:** Kemampuan organisme untuk menunjukkan variasi dalam fenotipnya sebagai respons terhadap perubahan lingkungan, meskipun genotipnya tetap sama.

**Contoh:** Tanaman yang tumbuh di area dengan cahaya terbatas mungkin memiliki daun yang lebih besar untuk menangkap lebih banyak cahaya, dibandingkan tanaman yang tumbuh di bawah sinar matahari penuh.

**Keuntungan:** Memungkinkan organisme untuk beradaptasi dengan perubahan lingkungan tanpa membutuhkan perubahan genetik, meningkatkan peluang kelangsungan hidup.



#### b. Epigenetika

**Definisi:** Modifikasi genetik yang tidak mengubah urutan DNA tetapi mempengaruhi bagaimana gen diekspresikan, sering dipengaruhi oleh faktor lingkungan.

**Contoh:** Paparan stres selama masa hidup seseorang dapat mengubah ekspresi gen yang mengatur respons stres, yang bisa diwariskan ke generasi berikutnya.

**Keuntungan:** Memungkinkan respons adaptif yang cepat terhadap lingkungan yang berubah, memberikan fleksibilitas genetik dalam jangka pendek.

#### c. Seleksi Lingkungan

**Definisi:** Proses di mana lingkungan menentukan individu mana yang lebih cocok untuk bertahan hidup dan bereproduksi berdasarkan karakteristik genetik mereka

**Contoh:** Kupu-kupu Biston betularia yang memiliki warna gelap bertahan lebih baik di lingkungan yang dipenuhi jelaga selama Revolusi Industri di Inggris.

**Keuntungan:** Memungkinkan evolusi adaptif, di mana alel yang memberikan keuntungan dalam lingkungan tertentu menjadi lebih umum dalam populasi.

## Adaptasi dan Seleksi Alam: Sebelum dan Sesudah Revolusi Industri

Adaptasi dan seleksi alam merupakan dua konsep kunci dalam teori evolusi yang menjelaskan bagaimana makhluk hidup berubah dan menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan. Salah satu contoh fenomena yang jelas tentang pengaruh lingkungan terhadap seleksi alam terjadi sebelum dan sesudah Revolusi Industri di Inggris pada abad ke-19.



### a. Sebelum Revolusi Industri

Mayoritas populasi kupu-kupu Biston betularia (kupu-kupu merpepper) memiliki warna sayap terang. Warna ini memberikan kamuflase yang baik di pepohonan yang ditutupi lumut berwarna cerah. Namun, dengan dimulainya Revolusi Industri, polusi udara dari pabrik-pabrik menyebabkan pohon-pohon di daerah perkotaan menjadi gelap karena tertutup jelaga. Hal ini memberikan keuntungan selektif bagi kupu-kupu dengan warna sayap gelap, yang lebih tersamarkan dari predator pada pepohonan yang gelap.

### b. Setelah Revolusi Industri

Frekuensi alel untuk warna gelap meningkat secara signifikan dalam populasi kupu-kupu ini, sebuah fenomena yang dikenal sebagai mekanisme industri. Perubahan lingkungan akibat polusi mengarahkan proses seleksi alam untuk menguntungkan kupu-kupu dengan variasi warna gelap, sementara kupu-kupu dengan warna terang menjadi lebih rentan terhadap predasi.

## Seleksi Alam Berdasarkan Resistensi

- Definisi:** Seleksi alam juga terjadi sebagai hasil dari resistensi terhadap faktor-faktor lingkungan yang dapat membahayakan kehidupan makhluk hidup. Resistensi mengacu pada kemampuan suatu organisme untuk bertahan terhadap kondisi atau zat yang berbahaya, seperti pestisida, antibiotik, atau polutan.
- Contoh pada Bakteri:** Pada awalnya, populasi bakteri mungkin mengandung variasi genetik yang rentan terhadap antibiotik. Namun, ketika antibiotik digunakan secara luas, bakteri yang memiliki mutasi

yang memberikan resistensi terhadap antibiotik lebih mungkin bertahan hidup dan berkembang biak. Akibatnya, frekuensi alel yang mengkode resistensi tersebut meningkat dalam populasi.

- c. **Contoh pada Serangga:** Fenomena ini juga terjadi pada hama serangga yang menjadi resisten terhadap pestisida. Seleksi alam mendukung individu-individu yang memiliki mutasi yang memberikan perlindungan dari efek racun pestisida, sehingga mereka dapat berkembang biak dan menghasilkan keturunan yang juga resisten.

## Seleksi Buatan

- a. **Definisi:** Praktik yang dilakukan oleh manusia untuk memilih sifat-sifat tertentu pada tanaman atau hewan untuk tujuan domestikasi, pertanian, atau pembiakan. Berbeda dengan seleksi alam yang dipandu oleh tekanan lingkungan, seleksi buatan dipandu oleh preferensi manusia.
- b. **Contoh pada Hewan:** Contoh klasik dari seleksi buatan adalah pembiakan anjing. Anjing-anjing dengan karakteristik fisik atau perilaku tertentu dipilih oleh manusia untuk dikawinkan, menghasilkan berbagai ras anjing dengan ciri-ciri khusus, seperti ukuran, bentuk tubuh, warna bulu, dan temperamen. Proses ini telah menghasilkan ratusan ras anjing yang berbeda, dari anjing kecil seperti Chihuahua hingga anjing besar seperti Great Dane.
- c. **Contoh pada Tanaman:** Padi yang dibudidayakan untuk menghasilkan varietas yang lebih tahan hama, lebih produktif, atau lebih mudah dipanen. Dalam konteks seleksi buatan, manusia secara aktif memilih individu-individu yang memiliki sifat-sifat yang diinginkan, mengarahkan evolusi secara langsung untuk memenuhi kebutuhan manusia.



## Biologipedia

### Warna kupu-kupu bisa berubah karena polusi!

Selama Revolusi Industri di Inggris, kupu-kupu Biston betularia yang awalnya berwarna terang berubah menjadi lebih gelap. Hal ini karena pohon-pohon tertutup jela, sehingga kupu-kupu gelap lebih tersamarkan dari pemangsa. Ini adalah contoh nyata bagaimana lingkungan bisa mengarahkan evolusi secara langsung!



## Contoh Soal

Jelaskan bagaimana kupu-kupu Biston betularia menjadi bukti nyata bahwa lingkungan dapat memengaruhi proses evolusi melalui seleksi alam!

### Jawaban:

Kupu-kupu Biston betularia menjadi bukti nyata bahwa lingkungan dapat mengubah frekuensi sifat dalam populasi. Sebelum Revolusi Industri, kupu-kupu berwarna terang mendominasi karena dapat berkamufase di pepohonan cerah. Namun setelah polusi menggelapkan pohon, kupu-kupu gelap lebih tersamarkan dan bertahan hidup lebih baik.

### Pembahasan:

Fenomena ini dikenal sebagai melanisme industri, di mana tekanan lingkungan seperti polusi menyebabkan perubahan dalam dominasi sifat pada populasi. Seleksi alam bekerja dengan memilih individu yang paling cocok dengan kondisi baru, sehingga sifat tersebut makin sering muncul dalam generasi berikutnya.



## 5. Bukti-bukti yang Menunjukkan Jejak Evolusi

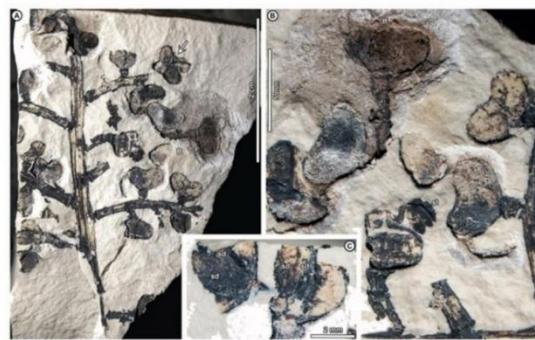
Evolusi makhluk hidup meninggalkan jejak-jejak yang dapat dilacak dan dipelajari oleh para ilmuwan. Petunjuk-petunjuk ini menyediakan bukti nyata tentang bagaimana spesies telah berubah dan berkembang seiring waktu. Bukti-bukti evolusi ini datang dari berbagai sumber, termasuk fosil, perbandingan anatomi, embriologi, fisiologi, biokimia, organ sisa, dan peristiwa domestikasi. Dengan mempelajari petunjuk-petunjuk ini, kita dapat mengungkap kisah panjang perubahan kehidupan di Bumi.

### Fosil

Fosil adalah sisa-sisa atau jejak makhluk hidup yang telah terawetkan dalam bentuk batuan. Fosil terbentuk melalui proses yang panjang dan rumit, di mana organisme yang mati terkubur di bawah lapisan sedimen seperti lumpur, pasir, atau tanah liat. Dalam kondisi yang tepat, bagian tubuh organisme, terutama yang keras seperti tulang, gigi, cangkang, atau kayu, dapat terawetkan.



Ilustrasi Fosil Ikan – [context.id/Crysania Suhartanto](https://context.id/Crysania Suhartanto)



Ilustrasi Fosil Tumbuhan Spurge – [detik.com/edu – Fahri Zulfikar](https://detik.com/edu – Fahri Zulfikar)

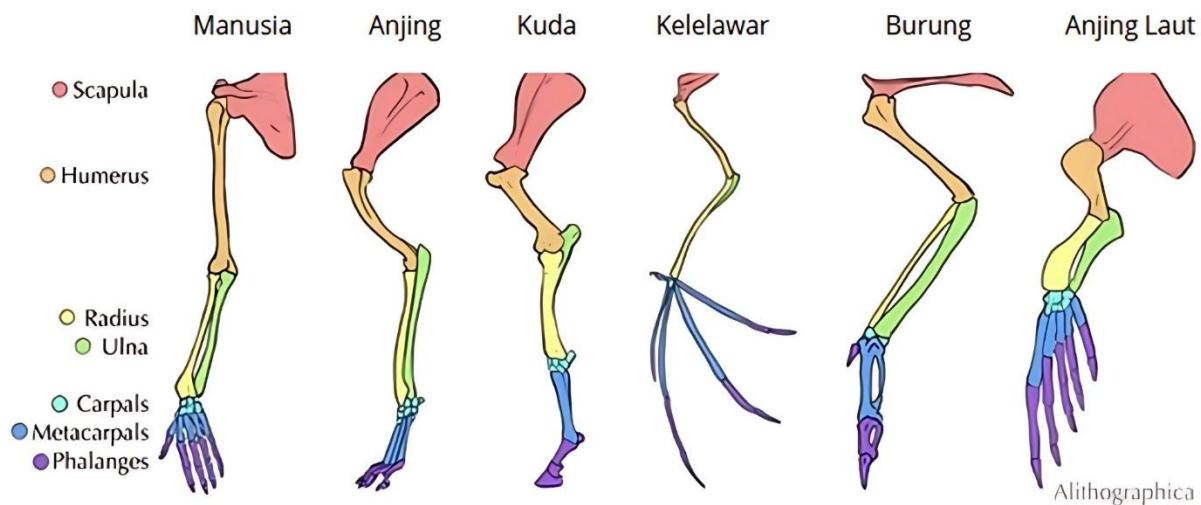
Sedimen yang mengubur organisme kemudian mengalami tekanan dan perubahan kimia yang menyebabkan bagian-bagian tubuh tersebut berubah menjadi fosil. Fosil tidak hanya berupa sisa-sisa tubuh, tetapi juga bisa berupa cetakan atau jejak aktivitas organisme, seperti jejak kaki, liang, atau sisa kotoran yang telah mengalami proses mineralisasi. Namun, fosil yang ditemukan sering kali tidak lengkap atau hanya terdiri dari sebagian kecil dari keseluruhan organisme. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor:

- Pertama, proses pembentukan fosil sendiri sangat selektif dan membutuhkan kondisi lingkungan tertentu seperti penguburan cepat, tekanan tinggi, dan mineral yang cukup untuk mengantikan materi organik. Jika organisme tidak segera dikubur setelah mati, tubuhnya mungkin akan dimakan oleh hewan lain atau terurai oleh mikroorganisme, sehingga tidak ada yang tersisa untuk menjadi fosil.
- Kedua, bagian tubuh yang lembut seperti jaringan otot, kulit, atau organ dalam cenderung lebih cepat terurai dibandingkan bagian keras seperti tulang dan cangkang, sehingga jarang sekali terfosilkan. Selain itu, pergerakan lempeng tektonik dan proses geologis seperti erosi, gempa bumi, dan aktivitas vulkanik dapat merusak atau menggeser lapisan batuan tempat fosil terkubur, mengakibatkan banyak fosil yang rusak atau terfragmentasi.
- Erosi oleh angin, air, atau pergeseran batuan juga dapat menghancurkan lapisan sedimen yang mengandung fosil atau mengikis fosil itu sendiri. Oleh karena itu, fosil yang ditemukan para ilmuwan sering kali hanya berupa potongan-potongan kecil yang harus direkonstruksi dan diinterpretasikan dengan hati-hati untuk memahami bentuk dan sifat dari organisme yang pernah hidup di masa lalu. Kombinasi dari faktor-faktor ini menjelaskan mengapa fosil jarang ditemukan dalam keadaan lengkap dan mengapa rekonstruksi fosil menjadi tantangan dalam paleontologi.

## Perbandingan Anatomi

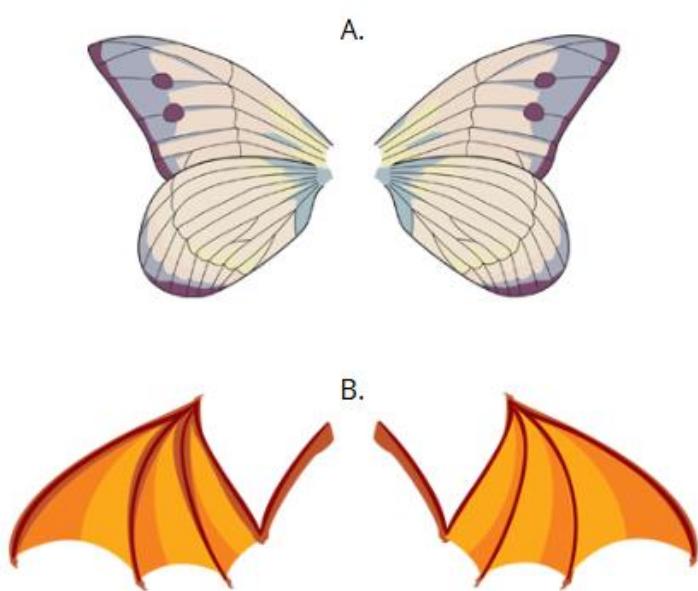
Definisi: Seleksi Perbandingan anatomi adalah salah satu metode penting dalam mempelajari evolusi dan mengungkap hubungan antara berbagai kelompok makhluk hidup. Salah satu konsep kunci dalam perbandingan anatomi adalah homologi, yaitu kesamaan dalam struktur tubuh antara spesies yang berbeda yang menunjukkan adanya nenek moyang bersama. Struktur tubuh yang homolog memiliki bentuk dasar yang sama meskipun telah berkembang untuk fungsi yang berbeda pada tiap spesies. Homologi merujuk pada kesamaan dalam struktur tubuh makhluk hidup yang berasal dari nenek moyang bersama. Kesamaan ini dapat terlihat pada bagian tubuh seperti tulang, otot, atau organ yang memiliki bentuk dasar yang sama namun beradaptasi untuk fungsi yang berbeda dalam spesies yang berbeda.

Contoh: Struktur tulang anggota gerak depan (forelimb) pada manusia, paus, kelelawar, dan kuda. Meskipun fungsi anggota gerak tersebut berbeda—manusia menggunakan tangan untuk memegang, paus menggunakan sirip depan untuk berenang, kelelawar menggunakan sayap untuk terbang, dan kuda menggunakan kaki untuk berlari—semua anggota gerak ini memiliki susunan tulang dasar yang sama, termasuk humerus, radius, ulna, dan tulang-tulang pergelangan.



Selain homologi, dalam perbandingan anatomi juga dikenal konsep analogi, yaitu kesamaan dalam fungsi atau bentuk antara struktur tubuh makhluk hidup yang berbeda tetapi tidak berasal dari nenek moyang bersama. Dalam kasus ini, struktur-struktur yang analog berkembang secara terpisah pada garis keturunan evolusi yang berbeda, namun memiliki fungsi yang serupa karena tekanan seleksi alam yang sama. Fenomena ini dikenal sebagai evolusi konvergen, di mana spesies yang tidak berkerabat mengembangkan ciri-ciri serupa sebagai respons terhadap tantangan lingkungan yang mirip.

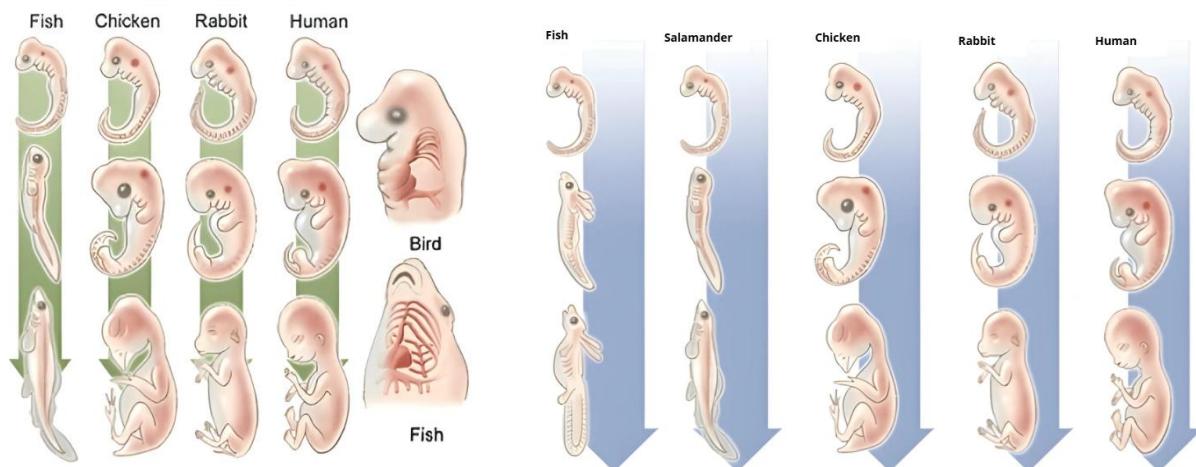
Analogi terkait dengan evolusi konvergensi. Evolusi konvergensi terjadi ketika spesies yang tidak memiliki nenek moyang yang sama (atau memiliki nenek moyang yang sangat jauh berbeda) mengembangkan ciri-ciri yang mirip sebagai respons terhadap tekanan lingkungan yang serupa. Dalam



kasus evolusi konvergensi, struktur analog menunjukkan bagaimana spesies yang tidak berhubungan secara dekat dapat mengembangkan fungsi yang mirip melalui jalur evolusi yang berbeda. Homologi berkaitan erat dengan konsep evolusi divergensi. Evolusi divergensi terjadi ketika spesies yang memiliki nenek moyang yang sama berkembang menjadi spesies-spesies baru yang memiliki ciri-ciri yang berbeda, sebagai hasil dari adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berbeda. Dalam evolusi divergensi, struktur yang homolog menunjukkan bagaimana spesies dengan asal usul yang sama dapat memiliki ciri-ciri dasar yang serupa tetapi kemudian mengalami modifikasi sesuai kebutuhan adaptif masing-masing.

## Perbandingan Embriologi

Perbandingan embriologi adalah studi tentang perkembangan embrio berbagai spesies untuk menemukan kesamaan dan perbedaan pada tahap awal perkembangan. Konsep ini menjadi salah satu bukti kuat dalam teori evolusi karena menunjukkan bagaimana spesies yang berbeda memiliki pola perkembangan embrio yang serupa, yang mengindikasikan adanya nenek moyang bersama.



Perbandingan embriologi – shutterstock.com 1465554971

## Perbandingan Fisiologi

Perbandingan fisiologi adalah studi tentang kesamaan dan perbedaan fungsi-fungsi biologis di antara berbagai spesies. Fisiologi berkaitan dengan cara kerja organ, jaringan, dan sistem dalam tubuh organisme. Melalui perbandingan fisiologi, para ilmuwan dapat mengidentifikasi kesamaan dalam fungsi dasar tubuh antara berbagai spesies, yang menunjukkan adanya hubungan evolusi di antara mereka. Kesamaan dalam proses fisiologis pada spesies yang berbeda seringkali menjadi petunjuk tentang asal usul evolusi yang sama. Salah satu contoh kesamaan fisiologis yang menarik adalah dalam sistem pernapasan pada vertebrata. Misalnya, paru-paru manusia, burung, dan mamalia lainnya memiliki struktur dasar dan mekanisme kerja yang sama untuk pertukaran oksigen dan karbon dioksida. Meskipun ada variasi adaptif yang mencerminkan kebutuhan spesifik setiap spesies (seperti kemampuan burung untuk bernapas secara efisien selama penerbangan), kesamaan dalam struktur paru-paru dan fungsi pertukaran gas menunjukkan adanya asal usul yang sama dalam evolusi.

## Perbandingan Biokimia

Perbandingan biokimia adalah studi tentang kesamaan dan perbedaan pada tingkat molekuler di antara berbagai spesies, terutama yang berkaitan dengan komponen-komponen penting seperti protein, DNA, dan enzim. Konsep ini menjadi salah satu bukti yang paling kuat dan mendalam untuk mendukung teori

evolusi, karena menunjukkan hubungan evolusi yang tidak hanya pada tingkat anatomi atau fisiologi, tetapi juga hingga ke struktur molekuler. Perbandingan biokimia membantu mengungkapkan pola-pola yang menunjukkan bagaimana spesies-spesies yang berbeda berevolusi dari nenek moyang bersama. Konsep homologi molekuler merujuk pada kesamaan urutan asam amino pada protein atau urutan basa pada DNA di antara spesies yang berbeda. Homologi molekuler ini menunjukkan bahwa spesies yang berbeda mewarisi gen yang sama dari nenek moyang bersama. Sebagai contoh, gen yang mengkodekan protein sitokrom c, yang terlibat dalam respirasi seluler, ditemukan memiliki urutan yang hampir identik pada berbagai spesies, termasuk manusia, tikus, dan ragi. Kesamaan ini menunjukkan adanya jalur evolusi yang sama dalam pembentukan protein tersebut.

## Organ Tubuh yang Tersisa

Organ tubuh yang tersisa, atau yang sering disebut sebagai organ vestigial, adalah bagian tubuh yang dulunya memiliki fungsi penting dalam nenek moyang suatu organisme, tetapi kini telah mengalami pengurangan fungsi atau kehilangan fungsinya secara keseluruhan. Keberadaan organ-organ ini memberikan bukti kuat tentang proses evolusi, karena menunjukkan jejak dari perubahan bertahap yang terjadi dalam spesies seiring waktu. Organ tubuh yang tersisa pada manusia adalah:

### a. Apendiks

Apendiks adalah organ kecil berbentuk kantung yang terletak di antara usus halus dan usus besar. Pada nenek moyang manusia, apendiks kemungkinan berfungsi untuk mencerna makanan yang kaya serat seperti tumbuh-tumbuhan, mirip dengan peran apendiks pada hewan herbivora saat ini. Namun, pada manusia modern, apendiks tidak lagi memiliki peran penting dalam sistem pencernaan, dan dianggap sebagai organ vestigial. Meskipun tidak sepenuhnya tidak berguna, beberapa penelitian menunjukkan bahwa apendiks mungkin memiliki peran dalam menjaga sistem kekebalan tubuh.

### b. Tulang Ekor (Coccyx)

Tulang ekor atau coccyx adalah sisa dari ekor yang dimiliki oleh nenek moyang manusia. Pada nenek moyang primata yang lebih awal, ekor berfungsi sebagai alat untuk keseimbangan dan pergerakan. Namun, seiring evolusi, manusia kehilangan fungsi ekor, dan tulang ekor yang tersisa hanya berupa beberapa tulang kecil yang terletak di ujung tulang belakang. Tulang ekor saat ini tidak memiliki fungsi utama selain sebagai titik perlekatan beberapa otot dasar panggul.

### c. Gigi Bungsu (Wisdom Teeth)

Gigi bungsu adalah sekelompok gigi geraham ketiga yang berkembang di bagian belakang mulut. Pada nenek moyang manusia, gigi bungsu berfungsi untuk membantu mengunyah makanan mentah dan berserat, yang merupakan bagian utama dari pola makan mereka. Namun, karena pola makan manusia modern telah berubah, rahang manusia menjadi lebih kecil dan gigi bungsu seringkali tidak memiliki ruang untuk tumbuh. Hal ini menyebabkan masalah pada gigi bungsu yang terjebak atau tumbuh miring, sehingga seringkali perlu dicabut.

### d. Refleks Pilomotor (Goosebumps)

Refleks ini adalah reaksi otomatis di mana otot-otot kecil di sekitar folikel rambut berkontraksi, menyebabkan rambut berdiri dan menghasilkan fenomena yang dikenal sebagai goosebumps. Pada mamalia berbulu, reaksi ini berfungsi untuk menghangatkan tubuh dengan menahan udara lebih dekat ke kulit, atau sebagai reaksi pertahanan untuk membuat hewan terlihat lebih besar. Namun, pada manusia yang memiliki rambut tubuh lebih sedikit, refleks ini tidak lagi memiliki peran yang signifikan dalam perlindungan atau pengaturan suhu.

## Peristiwa Domestikasi

Domestikasi adalah proses di mana manusia mengubah sifat-sifat genetika hewan dan tumbuhan liar untuk memenuhi kebutuhan dan kepentingan manusia. Domestikasi terjadi melalui seleksi buatan, di mana manusia secara selektif memilih individu-individu dengan sifat-sifat tertentu yang diinginkan, seperti hasil panen yang lebih besar, sifat jinak, kemampuan bekerja, atau kemampuan menghasilkan susu dan daging. Proses ini mencakup perubahan genetik yang menyebabkan spesies yang didomestikasi menjadi berbeda dari nenek moyang liarnya.

## Contoh Soal

Mengapa organ vestigial seperti apendiks dan tulang ekor dianggap sebagai bukti evolusi?

### Jawaban:

Organ vestigial dianggap sebagai bukti evolusi karena menunjukkan sisa-sisa struktur yang dulunya memiliki fungsi penting pada nenek moyang, tetapi kini telah berkurang atau hilang fungsinya. Apendiks dan tulang ekor adalah contoh nyata perubahan fungsi tubuh seiring waktu.

### Pembahasan:

Keberadaan organ-organ vestigial menunjukkan bahwa tubuh manusia pernah memiliki struktur yang lebih berguna di masa lalu. Melalui proses evolusi, fungsi organ tersebut menurun karena perubahan lingkungan dan kebutuhan adaptif, sehingga hanya menyisakan jejaknya dalam bentuk organ yang tidak lagi vital.

## Kegiatan Kelompok 1

Pada kegiatan ini kamu akan belajar untuk menungkap ide/gagasanmu tentang teori evolusi yang baru saja kamu pelajari

1. Buatlah kelompok yang beranggotakan 6 orang, lalu kelompok dibagi menjadi tiga kubu, masing-masing mewakili teori evolusi dari Lamarck, Weismann, dan Darwin
2. Setiap kelompok mempelajari teori evolusi tokoh yang diwakili.
3. Siapkan argumen kuat yang mendukung teori tersebut, termasuk kelebihannya.
4. Lakukan debat mini yang terarah antar kelompok, lalu bersama keunggulan dan kekurangan masing-masing teori



## 6. Mekanisme Evolusi

Evolusi adalah proses perubahan yang terjadi pada makhluk hidup dari generasi ke generasi, yang menghasilkan keanekaragaman hayati yang kita lihat saat ini. Mekanisme evolusi merujuk pada faktor-faktor dan proses biologis yang menyebabkan perubahan genetik dalam populasi makhluk hidup seiring berjalannya waktu. Dalam teori evolusi modern, beberapa mekanisme utama yang berperan dalam evolusi meliputi mutasi, hanyutan genetik, aliran gen, seleksi alam, perkawinan tidak acak, serta isolasi reprodiktif. Mekanisme-mekanisme ini bekerja baik secara sendiri-sendiri maupun secara bersama-sama untuk mempengaruhi frekuensi alel (varian dari suatu gen) dalam suatu populasi. Frekuensi alel yang berubah dari waktu ke waktu ini merupakan inti dari proses evolusi. Misalnya, seleksi alam mengarahkan perubahan berdasarkan tekanan lingkungan, sedangkan mutasi menyediakan bahan mentah bagi evolusi dengan menciptakan variasi genetik baru.

### Mutasi Gen

Mutasi gen adalah perubahan yang terjadi pada urutan DNA atau materi genetik suatu organisme. Mutasi merupakan salah satu mekanisme penting dalam evolusi karena menciptakan variasi genetik baru dalam populasi. Variasi ini adalah bahan mentah bagi proses evolusi, karena menyediakan basis bagi seleksi alam untuk bertindak. Meskipun sebagian besar mutasi mungkin tidak memiliki efek yang signifikan atau bahkan bisa merugikan, beberapa mutasi dapat memberikan keuntungan adaptif dan meningkatkan peluang bertahan hidup dan berkembang biak dari individu yang mengalaminya. Mutasi memiliki dampak yang sangat penting dalam proses evolusi. Meskipun sebagian besar mutasi netral atau merugikan, beberapa mutasi dapat memberikan keuntungan adaptif dalam kondisi tertentu.

Contoh dari mutasi yang menguntungkan adalah resistensi terhadap penyakit tertentu atau kemampuan mencerna zat baru yang sebelumnya tidak dapat dicerna oleh spesies tertentu. Mutasi yang menguntungkan ini meningkatkan peluang individu untuk bertahan hidup dan berkembang biak, sehingga frekuensi alel mutan dalam populasi dapat meningkat dari waktu ke waktu melalui seleksi alam. Salah satu contoh mutasi yang berperan dalam evolusi adalah mutasi hemoglobin pada manusia, yang menghasilkan sifat sel sabit (sickle cell trait). Mutasi ini menyebabkan perubahan pada bentuk hemoglobin, yang mengakibatkan beberapa individu memiliki sel darah merah berbentuk sabit. Meskipun sifat ini dapat menyebabkan gangguan kesehatan dalam kondisi homozigot, sifat heterozigot (dengan satu alel normal dan satu alel sel sabit) memberikan resistensi terhadap malaria. Akibatnya, frekuensi alel ini cenderung lebih tinggi di daerah-daerah yang endemik malaria.

### Hukum Hardy-Weinberg

Hukum Hardy-Weinberg adalah prinsip fundamental dalam genetika populasi yang menjelaskan bagaimana frekuensi alel dan genotipe dalam suatu populasi tetap konstan dari generasi ke generasi, asalkan tidak ada faktor-faktor evolusi yang bekerja. Prinsip ini diajukan oleh dua ilmuwan, yaitu G. H. Hardy dan Wilhelm Weinberg, secara independen pada tahun 1908. Hukum ini memberikan dasar matematis untuk memahami bagaimana frekuensi alel dan genotipe dipertahankan dalam populasi yang besar dan mengalami perkawinan acak.

Hukum Hardy-Weinberg menyatakan bahwa dalam kondisi keseimbangan Hardy-Weinberg, frekuensi alel dan genotipe dalam suatu populasi tetap konstan dari satu generasi ke generasi berikutnya, asalkan populasi tersebut memenuhi beberapa asumsi dasar. Hukum ini menyatakan bahwa jika frekuensi alel untuk dua alel (A dan a) adalah  $p$  dan  $q$ , maka frekuensi genotipe AA, Aa, dan aa dalam populasi dapat dihitung sebagai berikut:

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

$$p + q = 1$$

- ▷  $p^2$  adalah frekuensi genotipe AA (homozigot dominan),
- ▷  $2pq$  adalah frekuensi genotipe Aa (heterozigot),
- ▷  $q^2$  adalah frekuensi genotipe aa (homozigot resesif).
- ▷  $p$  adalah frekuensi alel dominan
- ▷  $q$  adalah frekuensi alel resesif

Hukum Hardy-Weinberg berlaku jika populasi memenuhi beberapa asumsi berikut:

- ▷ Ukuran populasi yang besar: Populasi harus cukup besar sehingga tidak terjadi hanyutan genetik secara signifikan.
- ▷ Perkawinan acak: Tidak ada preferensi atau diskriminasi dalam pemilihan pasangan untuk reproduksi.
- ▷ Tidak ada mutasi: Tidak ada perubahan alel yang disebabkan oleh mutasi.
- ▷ Tidak ada migrasi: Tidak ada masuknya (imigrasi) atau keluarnya (emigrasi) alel dari populasi.
- ▷ Tidak ada seleksi alam: Tidak ada perbedaan dalam kelangsungan hidup atau reproduksi antara individu dengan genotipe yang berbeda.

Jika salah satu dari asumsi ini tidak terpenuhi, maka frekuensi alel dan genotipe dalam populasi tidak akan tetap konstan dan akan berubah dari waktu ke waktu.

## Perubahan Kesetimbangan Frekuensi Alel dan Genotipe dalam Populasi

Frekuensi alel dan genotipe dalam suatu populasi dapat mengalami perubahan seiring waktu akibat berbagai mekanisme evolusi. Perubahan ini merupakan dasar dari evolusi biologis, di mana perbedaan dalam kelangsungan hidup dan reproduksi individu-individu menyebabkan perubahan dalam susunan genetik populasi. Ketika kesetimbangan Hardy-Weinberg tidak terpenuhi, berarti ada faktor-faktor yang menyebabkan perubahan kesetimbangan frekuensi alel dan genotipe dalam populasi tersebut. Beberapa mekanisme utama yang menyebabkan perubahan frekuensi alel dan genotipe adalah hanyutan genetik, aliran gen, mutasi, perkawinan yang tidak acak, dan seleksi alam. Mekanisme-mekanisme ini dapat bekerja secara terpisah atau bersama-sama untuk mempengaruhi frekuensi genetik dalam populasi.

### a. Hanyutan Genetik (Genetic Drift)

Hanyutan genetik adalah variasi acak dalam frekuensi alel yang terjadi karena peristiwa acak yang mempengaruhi individu dalam populasi. Perubahan ini bukan hasil dari tekanan seleksi atau adaptasi terhadap lingkungan, tetapi lebih karena peristiwa kebetulan, seperti siapa yang bertahan hidup dan berkembang biak, atau peristiwa bencana alam yang mengurangi jumlah populasi secara drastis. Efek hanyutan genetik menjadi lebih signifikan pada populasi kecil, di mana perubahan kecil dalam jumlah individu dapat menghasilkan dampak besar pada frekuensi alel. Hanyutan genetik bekerja melalui dua mekanisme utama:

#### ▷ Efek Bottleneck (Bottleneck Effect)

Efek bottleneck terjadi ketika populasi mengalami pengurangan jumlah individu secara drastis akibat bencana alam, wabah penyakit, perburuan, atau peristiwa lain yang mengurangi populasi secara signifikan. Pengurangan populasi ini menyebabkan sebagian besar variasi genetik hilang, karena hanya sebagian kecil individu yang bertahan hidup dan melanjutkan keturunan. Ketika populasi pulih kembali, variasi genetik pada populasi yang baru terbentuk akan lebih rendah

dibandingkan populasi asli. Contoh Efek Bottleneck adalah Cheetah di Afrika telah mengalami beberapa kali efek bottleneck dalam sejarah evolusinya, terutama akibat perburuan dan bencana alam. Sebagai hasil dari bottleneck ini, populasi cheetah modern memiliki variasi genetik yang sangat rendah, yang dapat menyebabkan kerentanan terhadap penyakit dan gangguan reproduksi.

▷ **Efek Pendiri (Founder Effect)**

Efek pendiri terjadi ketika sekelompok kecil individu meninggalkan populasi utama dan membentuk populasi baru di lokasi yang berbeda atau terisolasi. Karena kelompok pendiri ini hanya membawa sebagian kecil dari variasi genetik populasi asal, populasi baru cenderung memiliki frekuensi alel yang berbeda dari populasi aslinya. Efek ini sering terjadi pada koloni-koloni baru yang terisolasi, seperti di pulau-pulau atau daerah terpencil. Contoh Efek Pendiri adalah Populasi manusia di Pulau Tristan da Cunha di Atlantik Selatan adalah contoh klasik dari efek pendiri. Populasi ini didirikan oleh sekelompok kecil pendatang, yang membawa alel tertentu yang langka dalam populasi utama. Akibatnya, alel ini menjadi lebih umum di populasi baru, meskipun jarang ditemukan di populasi asli.

**b. Aliran Gen (Gene Flow)**

Aliran gen atau gene flow adalah perpindahan alel dari satu populasi ke populasi lain melalui migrasi individu atau melalui penyebaran gamet. Aliran gen memainkan peran penting dalam evolusi karena memungkinkan pertukaran genetik antara populasi yang berbeda, yang dapat meningkatkan variasi genetik dalam populasi dan mengurangi perbedaan genetik antar populasi. Aliran gen berfungsi sebagai penghubung genetik antara populasi-populasi yang berbeda, yang membantu mempertahankan keragaman genetik dan mencegah spesiasi. Aliran gen terjadi ketika individu dari satu populasi bermigrasi ke populasi lain dan berkembang biak, membawa alel baru ke dalam populasi tersebut. Proses ini juga bisa terjadi melalui perpindahan gamet seperti serbuk sari pada tanaman, yang dapat disebarluaskan oleh angin, air, atau hewan penyerbuk ke populasi yang berbeda. Ketika alel baru diperkenalkan, frekuensi alel dalam populasi penerima dapat berubah, yang dapat mempengaruhi adaptasi dan kemampuan bertahan populasi tersebut.

**c. Mutasi**

Mutasi adalah perubahan acak pada urutan DNA dalam suatu organisme, yang menghasilkan alel baru dan berkontribusi pada variasi genetik dalam populasi. Mutasi merupakan mekanisme penting dalam evolusi karena menciptakan sumber baru dari variasi genetik yang menjadi dasar dari seleksi alam, hanyutan genetik, dan mekanisme evolusi lainnya. Meskipun banyak mutasi bersifat netral atau merugikan, beberapa mutasi dapat memberikan keuntungan adaptif dalam kondisi tertentu, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi kelangsungan hidup dan reproduksi individu dalam populasi.

**d. Perkawinan yang Tidak Acak**

Perkawinan yang tidak acak (*non-random mating*) adalah kondisi di mana individu-individu dalam suatu populasi tidak memilih pasangan secara acak, melainkan memiliki preferensi tertentu dalam memilih pasangan. Preferensi ini dapat didasarkan pada kemiripan fisik, kedekatan genetik, atau sifat-sifat lain yang dianggap menguntungkan. Perkawinan yang tidak acak dapat mempengaruhi frekuensi genotipe dalam suatu populasi tanpa mengubah frekuensi alel, namun tetap berdampak pada keseimbangan Hardy-Weinberg. Perkawinan yang tidak acak menyebabkan peningkatan atau penurunan proporsi individu dengan genotipe tertentu dalam populasi. Terdapat dua jenis utama perkawinan yang tidak acak, yaitu perkawinan assortatif (*assortative mating*) dan perkawinan disassortatif (*disassortative mating*).

▷ **Perkawinan Asortatif (Assortative Mating)**

Perkawinan asortatif terjadi ketika individu lebih cenderung memilih pasangan yang memiliki sifat-sifat fisik atau genetik yang mirip dengan dirinya. Perkawinan asortatif ini meningkatkan proporsi homozigot dalam populasi karena alel-alel yang serupa lebih mungkin dipertemukan dalam individu hasil perkawinan. Pada manusia, perkawinan asortatif sering kali terjadi berdasarkan tinggi badan, di mana individu dengan tinggi badan yang serupa lebih cenderung untuk memilih satu sama lain sebagai pasangan. Hal ini juga dapat terjadi pada warna kulit, tingkat pendidikan, atau kecenderungan perilaku tertentu. Efeknya adalah peningkatan frekuensi genotipe homozigot untuk alel yang berkaitan dengan sifat-sifat tersebut.

▷ **Perkawinan Disasortatif (Disassortative Mating)**

Perkawinan disasortatif terjadi ketika individu lebih cenderung memilih pasangan yang memiliki sifat-sifat yang berbeda atau berlawanan dari dirinya. Hal ini meningkatkan frekuensi genotipe heterozigot dalam populasi, karena alel yang berbeda lebih mungkin dipertemukan. Pada beberapa spesies hewan, seperti ikan guppy, jantan dengan pola warna tertentu cenderung memilih betina yang memiliki pola warna yang berbeda. Strategi ini bertujuan untuk meningkatkan variasi genetik dalam keturunan mereka. Pada manusia, perkawinan disasortatif kadang terjadi berdasarkan golongan darah, di mana individu dengan golongan darah yang berbeda cenderung lebih mungkin untuk memilih satu sama lain sebagai pasangan.

**e. Seleksi Alam**

Seleksi alam adalah mekanisme utama dalam proses evolusi yang diusulkan oleh Charles Darwin dan Alfred Russel Wallace. Seleksi alam terjadi ketika individu-individu dengan sifat-sifat tertentu memiliki tingkat kelangsungan hidup dan kemampuan reproduksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan individu lain yang tidak memiliki sifat-sifat tersebut. Mekanisme ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa individu yang lebih baik beradaptasi dengan lingkungannya lebih mungkin untuk bertahan hidup, berkembang biak, dan mewariskan sifat-sifat yang menguntungkan tersebut kepada keturunannya. Seleksi alam dapat terjadi dalam berbagai bentuk berdasarkan dampaknya pada distribusi sifat dalam populasi, yaitu:

▷ **Seleksi Stabilisasi (Stabilizing Selection)**

Jenis seleksi ini mendukung individu dengan sifat-sifat menengah, sehingga mengurangi variasi sifat ekstrem dalam populasi. Misalnya, berat badan bayi manusia yang lahir cenderung berada dalam rentang yang optimal; bayi dengan berat terlalu rendah atau terlalu tinggi memiliki risiko kelangsungan hidup yang lebih rendah.

▷ **Seleksi Arah (Directional Selection)**

Seleksi arah mendukung salah satu ekstrem dalam rentang sifat, menyebabkan pergeseran distribusi sifat ke arah tersebut. Contohnya adalah resistensi terhadap pestisida pada serangga, di mana individu dengan gen resisten lebih mungkin bertahan dan berkembang biak.

▷ **Seleksi Disruptif (Disruptive Selection)**

Seleksi ini mendukung kedua ekstrem dalam rentang sifat, tetapi mengurangi frekuensi sifat menengah. Misalnya, pada burung finch di Kepulauan Galapagos, paruh yang sangat besar atau sangat kecil memiliki keuntungan dalam memakan jenis makanan tertentu, sedangkan burung dengan paruh sedang tidak memiliki keuntungan yang jelas.

## **Terbentuknya Spesies Baru**

Spesiasi adalah proses evolusi di mana suatu populasi berevolusi menjadi dua atau lebih spesies baru yang berbeda. Terbentuknya spesies baru merupakan hasil dari akumulasi perubahan genetik yang cukup signifikan sehingga populasi yang berbeda tidak lagi dapat saling kawin atau menghasilkan keturunan yang subur. Proses spesiasi adalah hasil dari kombinasi berbagai mekanisme evolusi, seperti isolasi geografi, seleksi alam, aliran gen, dan mutasi.

Spesiasi adalah proses di mana suatu populasi makhluk hidup mengalami perubahan genetik yang menyebabkan terbentuknya spesies baru. Hal ini terjadi ketika populasi menjadi terisolasi secara genetik, sehingga tidak dapat saling kawin atau menghasilkan keturunan yang subur dengan populasi lain. Ada beberapa jenis spesiasi berdasarkan mekanisme terjadinya, di antaranya spesiasi alopatrik, spesiasi simpatrik, spesiasi parapatrik, dan spesiasi peripatrik.

### **a. Spesiasi Alopatrik (*Allopatric Speciation*)**

Spesiasi alopatrik adalah proses spesiasi yang terjadi ketika suatu populasi terpisah oleh penghalang geografis, seperti pegunungan, sungai, atau lautan. Penghalang geografis ini menyebabkan populasi yang terpisah mengalami isolasi genetik, di mana mereka tidak dapat saling bertukar gen. Akibatnya, setiap populasi berevolusi secara independen melalui seleksi alam, mutasi, dan hanyutan genetik. Seiring waktu, akumulasi perbedaan genetik menyebabkan populasi tersebut berkembang menjadi spesies yang berbeda. Salah satu contoh klasik spesiasi alopatrik adalah terbentuknya spesies burung finch di Kepulauan Galapagos. Burung-burung finch di berbagai pulau terisolasi oleh laut, sehingga tidak dapat saling bertukar gen. Setiap populasi finch berkembang secara terpisah, menghasilkan variasi dalam bentuk paruh yang disesuaikan dengan jenis makanan yang tersedia di setiap pulau.

### **b. Spesiasi Simpatrik (*Sympatric Speciation*)**

Spesiasi simpatrik terjadi ketika spesies baru terbentuk dalam populasi yang berada di wilayah geografis yang sama. Hal ini dapat terjadi karena perbedaan dalam preferensi perkawinan, adaptasi terhadap mikrohabitat yang berbeda, atau perubahan genetik yang mengakibatkan isolasi reproduktif di dalam populasi. Meskipun populasi tidak terpisah secara fisik, perbedaan perilaku atau adaptasi menyebabkan individu dalam populasi berkembang menjadi spesies yang berbeda. Pada ikan cichlid di Danau Victoria, spesiasi simpatrik terjadi karena perbedaan preferensi perkawinan berdasarkan warna. Betina cichlid memilih pasangan berdasarkan warna jantan yang berbeda, yang menyebabkan terbentuknya spesies baru di wilayah yang sama.

### **c. Spesiasi Parapatrik (*Parapatric Speciation*)**

Spesiasi parapatrik terjadi ketika dua populasi yang berbatasan mengalami perbedaan adaptasi terhadap lingkungan yang berbeda. Meskipun tidak sepenuhnya terpisah, populasi ini memiliki daerah kontak yang sempit di mana individu-individu dari kedua populasi bertemu. Karena perbedaan kondisi lingkungan, seleksi alam menyebabkan populasi ini berkembang menjadi spesies yang berbeda perkawinan berdasarkan warna. Betina cichlid memilih pasangan berdasarkan warna jantan yang berbeda, yang menyebabkan terbentuknya spesies baru di wilayah yang sama.

### **d. Spesiasi Peripatrik (*Peripatric Speciation*)**

Spesiasi peripatrik mirip dengan spesiasi alopatrik, tetapi terjadi ketika sekelompok kecil individu berpindah ke wilayah baru dan membentuk populasi terisolasi. Ukuran populasi yang kecil menyebabkan efek hanyutan genetik yang kuat, yang bersama dengan seleksi alam mengarah pada pembentukan spesies baru.

Proses spesiasi melibatkan isolasi reproduktif, di mana individu dari populasi yang berbeda tidak dapat saling kawin atau menghasilkan keturunan yang subur. Isolasi reproduktif dapat terjadi melalui beberapa mekanisme:



### DNA Bisa Salah Copy, Tapi Justru Itu yang Bikin Evolusi Jalan

Kadang, saat sel membelah, DNA bisa membuat 'typo' alias kesalahan salin. Tapi jangan salah, kesalahan kecil ini bisa jadi tiket perubahan besar. Kalau 'typo' itu ternyata berguna. Misalnya membuat burung punya paruh yang lebih kuat maka sifat itu bisa diwariskan. Inilah yang disebut mutasi, bahan bakar utama bagi evolusi



#### a. Isolasi Geografi

Isolasi ekogeografi adalah bentuk isolasi reproduktif yang terjadi ketika dua populasi terpisah oleh penghalang geografis, seperti pegunungan, sungai, gurun, atau laut, sehingga tidak ada aliran gen di antara mereka. Ketika populasi terpisah oleh batasan geografis, mereka tidak dapat bertukar gen secara bebas, dan masing-masing populasi berkembang secara independen. Isolasi ekogeografi adalah mekanisme utama yang mengarah pada spesiasi alopatrik. Ketika dua populasi dari spesies yang sama terpisah oleh penghalang geografis, isolasi ekogeografi menyebabkan berkurangnya atau hilangnya aliran gen antar populasi. Seiring waktu, masing-masing populasi mungkin mengalami tekanan selektif yang berbeda, yang mendorong adaptasi terhadap kondisi lingkungan masing-masing. Proses ini mempercepat akumulasi variasi genetik yang berbeda, yang pada akhirnya dapat menyebabkan pembentukan spesies baru.

#### b. Isolasi Habitat

Isolasi habitat adalah bentuk isolasi reproduktif yang terjadi ketika dua populasi dari spesies yang sama hidup di habitat yang berbeda dalam wilayah geografis yang sama, sehingga jarang atau tidak pernah bertemu untuk kawin. Isolasi ini dapat terjadi meskipun tidak ada penghalang geografis yang memisahkan populasi, tetapi perbedaan preferensi habitat menghalangi mereka untuk bertemu dan saling berkembang biak. Isolasi habitat sering kali menyebabkan spesiasi simpatrik, di mana spesies baru terbentuk dalam wilayah yang sama. Isolasi habitat terjadi ketika dua populasi dari spesies yang sama memilih habitat yang berbeda untuk bertahan hidup, berkembang biak, atau mencari makanan. Perbedaan habitat ini menyebabkan individu-individu dari kedua populasi jarang atau tidak pernah bertemu untuk kawin, yang pada akhirnya mengarah pada isolasi genetik. Meskipun dua populasi dapat hidup dalam wilayah yang sama, perbedaan preferensi habitat mereka dapat menyebabkan perubahan genetik yang cukup besar untuk membentuk spesies baru.

#### c. Isolasi Musim

Isolasi musim, atau yang dikenal juga sebagai isolasi temporal, adalah bentuk isolasi reproduktif yang terjadi ketika dua populasi atau spesies berkembang biak pada waktu yang berbeda, baik dalam hal musim, periode hari, atau bahkan siklus perkawinan yang berbeda. Isolasi ini mencegah individu dari populasi yang berbeda untuk bertemu dan kawin, sehingga menghalangi aliran gen antar populasi. Isolasi musim dapat terjadi meskipun dua populasi atau spesies berbagi habitat yang sama. Isolasi musim adalah mekanisme isolasi reproduktif di mana dua populasi yang berada di wilayah yang sama tidak dapat kawin karena waktu perkawinan atau reproduksi yang berbeda. Perbedaan dalam waktu kawin ini bisa berupa musim yang berbeda, waktu aktivitas yang berbeda dalam satu hari (siang atau malam), atau siklus perkawinan yang tidak sinkron. Karena perbedaan ini, dua populasi tersebut jarang atau tidak pernah bertemu untuk kawin, sehingga aliran gen terhenti.

**d. Isolasi Perilaku**

Isolasi perilaku adalah bentuk isolasi reproduktif yang terjadi ketika dua populasi atau spesies tidak kawin karena perbedaan dalam perilaku, terutama perilaku kawin. Perilaku kawin yang berbeda ini dapat mencakup sinyal visual, suara, tarian kawin, atau perilaku khusus lainnya yang menjadi pemicu untuk mengenali pasangan yang tepat. Isolasi perilaku mencegah perkawinan antar individu yang memiliki perilaku berbeda, bahkan jika mereka berada di habitat yang sama atau berbagi wilayah geografis. Isolasi perilaku terjadi ketika individu dalam populasi yang berbeda tidak mengenali satu sama lain sebagai pasangan potensial karena perbedaan dalam sinyal kawin atau perilaku tertentu. Sinyal-sinyal ini, yang bisa berupa nyanyian, tarian, pola warna, atau bau, berfungsi untuk menarik pasangan yang sesuai dan mengidentifikasi individu dari spesies atau populasi yang sama.

**e. Isolasi Mekanik**

Isolasi mekanik adalah bentuk isolasi reproduktif yang terjadi ketika perbedaan fisik atau anatomi antara individu dari populasi atau spesies yang berbeda menghalangi terjadinya perkawinan atau fertilisasi. Isolasi mekanik biasanya melibatkan perbedaan dalam struktur alat reproduksi atau morfologi tubuh yang menghambat proses perkawinan atau transfer gamet. Mekanisme ini mencegah kawin silang antar individu yang berbeda secara anatomi, sehingga menjaga perbedaan genetik antar populasi atau spesies. Isolasi mekanik adalah mekanisme isolasi reproduktif yang mencegah terjadinya perkawinan atau fertilisasi karena ketidaksesuaian morfologi tubuh atau alat reproduksi. Perbedaan ini bisa terjadi karena evolusi spesifik dari alat kelamin, ukuran tubuh, atau struktur lain yang berperan dalam proses reproduksi. Isolasi mekanik dapat mencegah percampuran gen antar populasi atau spesies, meskipun mereka hidup di habitat yang sama.

**Contoh Soal**

Mengapa mutasi gen dianggap sebagai "bahan mentah" evolusi dan bagaimana dampaknya terhadap kelangsungan hidup suatu spesies?

**Jawaban:**

Mutasi gen dianggap sebagai bahan mentah evolusi karena menciptakan variasi genetik baru dalam populasi. Variasi ini memberikan dasar bagi seleksi alam untuk bertindak, sehingga individu dengan mutasi yang menguntungkan memiliki peluang lebih besar untuk bertahan hidup dan berkembang biak.

**Pembahasan:**

Mutasi memperkenalkan alel baru yang bisa bersifat netral, merugikan, atau menguntungkan tergantung lingkungan. Dalam kondisi tertentu, mutasi yang menguntungkan dapat membantu individu beradaptasi dan meningkatkan kelangsungan spesies. Misalnya, mutasi sel sabit memberikan resistensi terhadap malaria di daerah endemik, sehingga alel tersebut tetap lestari dalam populasi.



## 7. Teori Asal Mula Kehidupan: Molekul hingga Makhluk Hidup

Salah satu pertanyaan mendasar dalam biologi adalah bagaimana kehidupan pertama kali muncul di Bumi. Asal mula kehidupan telah menjadi subjek perdebatan ilmiah dan filosofis selama berabad-abad, dengan berbagai teori yang diajukan untuk menjelaskan proses awal terbentuknya makhluk hidup. Meskipun tidak ada konsensus yang pasti tentang bagaimana kehidupan dimulai, para ilmuwan telah mengusulkan berbagai hipotesis dan teori berdasarkan bukti ilmiah yang tersedia. Teori asal mula kehidupan berusaha menjelaskan bagaimana materi organik sederhana dapat berkembang menjadi molekul kompleks dan akhirnya menjadi bentuk kehidupan pertama yang mampu bereplikasi dan beradaptasi dengan lingkungannya. Proses ini mencakup pembentukan senyawa organik dasar, penggabungan senyawa-senyawa ini menjadi struktur yang lebih kompleks, dan pengembangan kemampuan untuk mereplikasi dan berevolusi.

### Teori Abiogenesis

Teori Abiogenesis, yang juga dikenal sebagai teori generatio spontanea, adalah gagasan bahwa kehidupan dapat muncul secara spontan dari bahan tak hidup. Teori ini merupakan salah satu konsep paling awal yang diusulkan untuk menjelaskan asal mula kehidupan di Bumi. Pada masa-masa awal ilmu pengetahuan, para filsuf dan ilmuwan percaya bahwa makhluk hidup dapat muncul secara langsung dari benda mati melalui proses yang tidak sepenuhnya dipahami. Konsep abiogenesis telah ada sejak zaman Yunani Kuno, di mana filsuf Aristoteles (384-322 SM) percaya bahwa makhluk hidup dapat muncul secara spontan dari bahan tak hidup seperti lumpur, tanah, atau bahan organik yang membusuk. Dia berpendapat bahwa ada prinsip vital dalam benda mati yang dapat memicu terbentuknya kehidupan baru. Pemikiran ini diterima secara luas selama berabad-abad dan menjadi dasar bagi banyak pandangan ilmiah pada masa itu.

### Teori Biogenesis

Teori Biogenesis adalah gagasan ilmiah yang menyatakan bahwa makhluk hidup hanya dapat berasal dari makhluk hidup lain. Teori ini muncul sebagai respons terhadap dan juga menentang teori abiogenesis, yang menyatakan bahwa makhluk hidup bisa muncul secara spontan dari benda mati. Teori biogenesis mengklaim bahwa semua bentuk kehidupan, baik itu mikroorganisme hingga makhluk kompleks, berasal dari organisme yang sudah ada sebelumnya. Teori biogenesis muncul sebagai hasil dari serangkaian penemuan yang menentang konsep abiogenesis. Para ilmuwan di masa lalu mengamati bahwa kehidupan tidak muncul secara spontan dari bahan tak hidup, tetapi selalu berasal dari makhluk hidup lain. Beberapa percobaan penting yang mendukung teori biogenesis antara lain:

#### a. Percobaan Francesco Redi

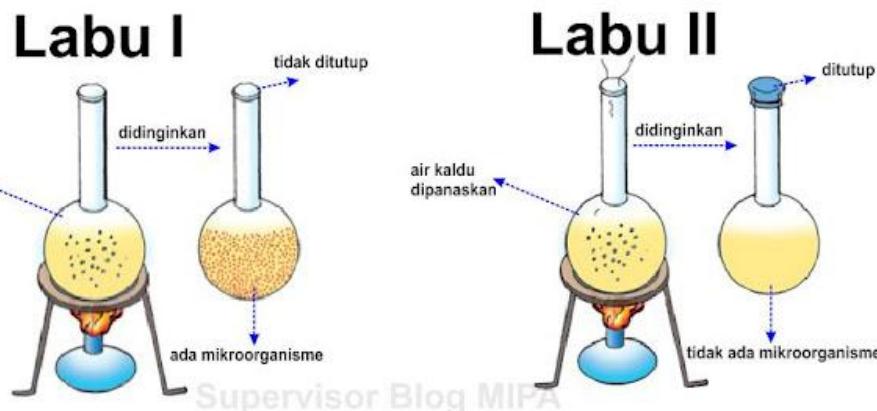
Francesco Redi (1626-1697) adalah seorang ilmuwan dan dokter asal Italia yang dikenal sebagai salah satu pionir dalam menentang teori generatio spontanea (abiogenesis). Pada abad ke-17, teori ini masih menjadi keyakinan umum di kalangan ilmuwan, yang percaya bahwa makhluk hidup seperti lalat dapat muncul secara spontan dari benda mati seperti daging yang membusuk. Francesco Redi menjadi salah satu ilmuwan pertama yang melakukan eksperimen sistematis untuk menguji kebenaran teori ini. Dalam percobaannya, Redi menggunakan tiga kelompok wadah berisi potongan daging mentah. Kelompok pertama dibiarkan terbuka sepenuhnya sehingga lalat dapat dengan bebas mendarat di atas daging. Kelompok kedua ditutup dengan kain kasa yang memungkinkan udara masuk, tetapi menghalangi lalat untuk mendarat langsung di atas daging. Sedangkan kelompok ketiga ditutup rapat dengan penutup padat yang sepenuhnya menghalangi lalat dan udara. Setelah beberapa hari, Redi menemukan bahwa larva lalat muncul di atas daging pada wadah yang terbuka,

karena lalat dapat bertelur langsung di atas daging tersebut. Pada wadah yang ditutup dengan kain kasa, tidak ada larva yang muncul di daging, tetapi Redi mengamati adanya telur lalat pada permukaan kain kasa, menunjukkan bahwa lalat hanya bisa bertelur di atas kain kasa tetapi tidak bisa mencapai daging. Sementara itu, pada wadah yang tertutup rapat, tidak ada larva atau telur yang muncul, yang menegaskan bahwa tidak ada lalat yang mendarat di daging. Dari hasil percobaannya, Redi menyimpulkan bahwa larva lalat tidak muncul dari daging yang membusuk, melainkan berasal dari telur lalat yang diletakkan oleh lalat dewasa.



Ilustrasi percobaan Francesco Redi – biologijk.com – Supervisor Blog MIPA

#### b. Percobaan Lazzaro Spallanzani

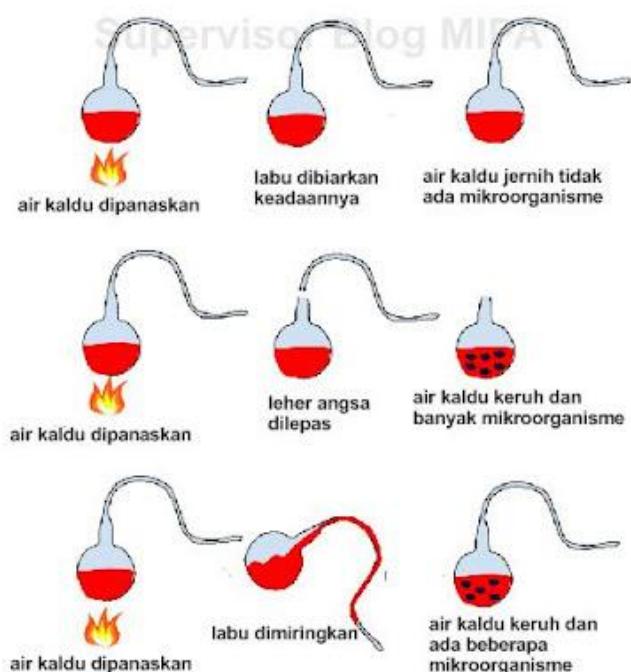


Ilustrasi percobaan Lazzaro Spallanzani – biologijk.com – Supervisor Blog MIPA

Lazzaro Spallanzani (1729-1799) adalah seorang biologawan dan pendeta asal Italia yang melanjutkan upaya menentang teori generatio spontanea atau abiogenesis. Pada abad ke-18, meskipun percobaan Francesco Redi telah menunjukkan bahwa makhluk hidup tidak muncul secara spontan dari benda mati, masih banyak ilmuwan yang percaya bahwa mikroorganisme dapat muncul secara spontan dalam cairan atau kaldu yang dibiarkan terbuka. Untuk menguji gagasan ini, Spallanzani merancang serangkaian eksperimen cermat untuk membuktikan bahwa mikroorganisme berasal dari kontaminasi luar dan bukan dari cairan itu sendiri. Dalam eksperimennya, Spallanzani merebus kaldu daging untuk membunuh mikroorganisme yang mungkin ada di dalamnya, kemudian menempatkan kaldu tersebut dalam dua wadah. Satu wadah dibiarkan terbuka, sementara wadah lainnya ditutup rapat untuk mencegah masuknya mikroorganisme dari udara. Setelah beberapa hari, Spallanzani mengamati bahwa kaldu dalam wadah yang tertutup rapat tetap steril dan tidak menunjukkan adanya tanda-tanda pertumbuhan mikroorganisme. Sebaliknya, kaldu dalam wadah yang terbuka segera terkontaminasi dan dipenuhi oleh mikroorganisme. Hasil ini memberikan bukti kuat bahwa mikroorganisme tidak muncul secara spontan, melainkan berasal dari udara luar. Spallanzani menyimpulkan bahwa kehidupan mikroba dihasilkan dari kontaminasi luar dan bukan dari kaldu yang

secara spontan melahirkan kehidupan. Penelitiannya ini memperkuat teori biogenes, yang menyatakan bahwa semua makhluk hidup berasal dari makhluk hidup lain. Meskipun eksperimen Spallanzani memberikan bukti kuat terhadap teori biogenes, kritik terhadap percobaannya masih muncul, terutama dari ilmuwan yang berargumen bahwa menutup wadah secara rapat mungkin telah menghalangi masuknya "udara segar" yang dianggap esensial untuk menciptakan kehidupan. Eksperimen Spallanzani menjadi dasar penting dalam memahami asal mula kehidupan mikroba dan membuka jalan bagi eksperimen Louis Pasteur yang kemudian membuktikan secara definitif bahwa kehidupan mikroba tidak muncul secara spontan. Meskipun Spallanzani tidak sepenuhnya mengakhiri perdebatan mengenai teori abiogenesis pada masanya, kontribusinya memberikan fondasi yang kuat untuk penelitian ilmiah selanjutnya dalam mikrobiologi dan perkembangan teori biogenes yang akhirnya menjadi konsep utama dalam biologi modern.

### c. Percobaan Louis Pasteur



Ilustrasi percobaan Lazzaro Spallanzani – biologijk.com – Supervisor Blog MIPA

Louis Pasteur (1822-1895) adalah seorang ilmuwan Prancis yang terkenal dengan penemuan-penemuan revolusionernya di bidang mikrobiologi. Pasteur memainkan peran penting dalam menentang teori generatio spontanea (abiogenesis) dengan eksperimen cermat yang akhirnya membuktikan bahwa kehidupan tidak muncul secara spontan dari benda mati. Pada pertengahan abad ke-19, meskipun percobaan yang dilakukan oleh Francesco Redi dan Lazzaro Spallanzani telah membantah abiogenesis untuk organisme makroskopis, masih banyak ilmuwan yang percaya bahwa mikroorganisme seperti bakteri dapat muncul secara spontan di dalam cairan. Pasteur merancang sebuah eksperimen inovatif yang dikenal sebagai eksperimen labu leher angsa untuk membuktikan bahwa teori tersebut salah. Dalam eksperimen ini, Pasteur menggunakan labu kaca dengan leher panjang yang melengkung seperti leher angsa. Dia mengisi labu tersebut dengan kudu daging dan kemudian memanaskannya hingga mendidih untuk membunuh mikroorganisme yang mungkin ada di dalam kudu. Leher angsa yang panjang dan melengkung memungkinkan udara masuk, tetapi menghalangi partikel debu dan mikroorganisme yang terbawa udara. Pasteur kemudian membiarkan labu tersebut dalam kondisi terbuka di laboratoriumnya selama beberapa waktu. Hasilnya, kudu tetap steril dan tidak menunjukkan tanda-tanda pertumbuhan mikroorganisme. Namun, ketika Pasteur mematahkan leher labu sehingga udara yang mengandung partikel debu dan mikroorganisme dapat

masuk, kaldu dengan cepat menjadi terkontaminasi. Eksperimen Pasteur secara definitif menunjukkan bahwa mikroorganisme tidak muncul secara spontan, melainkan berasal dari partikel dan mikroorganisme yang ada di udara. Dengan eksperimen ini, Pasteur berhasil membantah teori abiogenesis dan memperkuat teori biogenesis, yang menyatakan bahwa kehidupan hanya bisa berasal dari kehidupan sebelumnya. Penemuan ini tidak hanya mengubah pandangan tentang asal mula kehidupan, tetapi juga memiliki implikasi yang luas dalam ilmu kedokteran dan mikrobiologi. Pasteur memperkenalkan konsep sterilisasi dan pasteurisasi yang digunakan untuk membunuh mikroorganisme dalam makanan dan minuman, serta menemukan teknik vaksinasi yang efektif. Eksperimen Louis Pasteur adalah tonggak penting dalam sejarah biologi, yang menandai akhir dari teori abiogenesis dan awal dari pemahaman modern tentang mikroorganisme dan reproduksi biologis. Keberhasilan eksperimen ini membuktikan pentingnya metode ilmiah yang cermat dan terkontrol dalam membantah hipotesis yang sudah lama diterima. Pasteur tidak hanya membuktikan bahwa kehidupan tidak muncul secara spontan, tetapi juga membuka jalan bagi perkembangan teknik-teknik laboratorium modern yang masih digunakan hingga saat ini.

Hasil percobaan ini muncul teori omne vivum ex ovo, omne ovum ex vivo, dan omne vivum ex vivo. Ketiga frasa Latin ini memiliki arti penting dalam memahami konsep biogenesis, yang menyatakan bahwa kehidupan hanya dapat berasal dari kehidupan sebelumnya. Frasa "omne vivum ex ovo" berarti semua kehidupan berasal dari telur. Istilah ini digunakan untuk menekankan bahwa setiap makhluk hidup, terutama hewan, berkembang dari telur yang telah dibuahi, yang merupakan bentuk awal dari kelahiran atau pembentukan kehidupan baru. Lanjutan dari pemahaman ini adalah frasa "omne ovum ex vivo", yang berarti setiap telur berasal dari makhluk hidup, menggarisbawahi bahwa telur sebagai awal kehidupan tidak muncul secara spontan, tetapi dihasilkan oleh organisme induk yang hidup. Sementara itu, frasa "omne vivum ex vivo" berarti semua kehidupan berasal dari makhluk hidup, yang merupakan inti dari teori biogenesis. Frasa ini menegaskan bahwa semua bentuk kehidupan dihasilkan dari organisme hidup yang sudah ada, menolak sepenuhnya gagasan abiogenesis yang menyatakan bahwa kehidupan dapat muncul dari benda mati. Ketiga frasa ini secara bersama-sama menggambarkan pemahaman ilmiah modern tentang reproduksi dan asal mula kehidupan, yang menekankan kesinambungan antara generasi organisme hidup.

## Teori Khas, Kosmozoan, dan Katalisme

Selain teori abiogenesis dan biogenesis, ada beberapa teori lain yang mencoba menjelaskan asal mula kehidupan di Bumi, yaitu teori khas, teori kosmozoan, dan teori katalisme. Ketiga teori ini menawarkan pandangan yang berbeda tentang bagaimana kehidupan pertama kali muncul, masing-masing dengan pendekatan yang unik berdasarkan bukti ilmiah yang terbatas dan spekulasi pada masanya.

### a. Teori Khas

Teori Khas atau yang dikenal juga sebagai teori penciptaan spesial adalah pandangan yang menyatakan bahwa kehidupan di Bumi diciptakan secara langsung oleh kekuatan supranatural atau entitas ilahi. Teori ini meyakini bahwa makhluk hidup tidak muncul melalui proses alamiah atau evolusi, tetapi melalui tindakan kreatif yang dilakukan oleh pencipta dengan sengaja dan penuh kehendak. Konsep ini telah menjadi bagian dari banyak tradisi agama dan kepercayaan di seluruh dunia, dan sering kali dikaitkan dengan cerita-cerita penciptaan dalam kitab suci agama seperti Alkitab, Al-Quran, dan teks-teks agama lainnya. Teori khas didasarkan pada keyakinan bahwa kehidupan, termasuk manusia dan seluruh makhluk hidup lainnya, memiliki asal mula yang disengaja dan bukan merupakan hasil dari peristiwa alamiah acak. Dalam berbagai agama dan tradisi, diyakini bahwa kekuatan ilahi menciptakan kehidupan dalam bentuknya yang sekarang, atau dalam bentuk dasar yang kemudian berkembang tanpa perubahan besar seiring waktu. Keyakinan ini umumnya menolak gagasan bahwa kehidupan muncul dari benda mati atau melalui proses evolusi bertahap.

### **b. Teori Kosmozoan**

Teori Kosmozoan, yang juga dikenal sebagai teori panspermia, adalah gagasan bahwa kehidupan di Bumi tidak berasal dari proses internal di planet ini, melainkan dibawa dari luar angkasa melalui partikel atau mikroorganisme yang ada di meteorit, komet, atau debu kosmik. Teori ini menawarkan perspektif yang berbeda tentang asal mula kehidupan dengan mengalihkan fokus dari Bumi ke alam semesta yang lebih luas. Panspermia berasal dari bahasa Yunani, yaitu *pan* (semua) dan *sperma* (benih), yang berarti "benih kehidupan di mana-mana. Teori kosmozoan pertama kali diusulkan oleh Svante Arrhenius, seorang ilmuwan Swedia, pada awal abad ke-20. Arrhenius menyarankan bahwa mikroorganisme atau spora dapat bertahan hidup dalam kondisi keras di luar angkasa dan menyebar antar planet atau antar bintang melalui tekanan radiasi. Teori ini didasarkan pada asumsi bahwa kehidupan di Bumi mungkin telah "ditaburkan" dari tempat lain di alam semesta melalui meteorit atau komet yang membawa mikroorganisme atau molekul organik kompleks.

### **c. Teori Kataklisma**

Teori Kataklisma adalah teori yang menyatakan bahwa asal mula kehidupan di Bumi mungkin dipicu oleh peristiwa-peristiwa bencana alam besar atau perubahan drastis dalam kondisi lingkungan planet. Kata kataklisma sendiri berasal dari bahasa Yunani yang berarti bencana besar, dan teori ini berfokus pada bagaimana peristiwa bencana seperti tabrakan meteorit, letusan gunung berapi masif, dan perubahan iklim ekstrem dapat menciptakan kondisi yang mendukung terbentuknya senyawa-senyawa dasar kehidupan atau bahkan kehidupan itu sendiri. Teori ini muncul sebagai respons terhadap pengamatan geologis dan astronomis yang menunjukkan bahwa Bumi pernah mengalami peristiwa-peristiwa kataklismik di masa lalu. Salah satu hipotesis utama yang terkait dengan teori ini adalah gagasan bahwa tabrakan meteorit besar, yang membawa senyawa organik atau memicu perubahan atmosfer, bisa menjadi pemicu terbentuknya kehidupan di Bumi. Para pendukung teori ini berpendapat bahwa kondisi ekstrem yang dihasilkan dari peristiwa kataklismik dapat mendorong reaksi kimia yang mengarah pada pembentukan molekul organik kompleks.

## **Teori Evolusi Biokimia**

Asal mula kehidupan di Bumi adalah salah satu misteri terbesar yang terus diteliti oleh para ilmuwan. Di antara berbagai teori yang mencoba menjelaskan fenomena ini, teori evolusi biokimia memberikan pendekatan ilmiah dengan berfokus pada proses kimia yang mungkin terjadi di Bumi primitif. Teori ini menyatakan bahwa kehidupan tidak muncul secara tiba-tiba, melainkan merupakan hasil dari serangkaian reaksi kimia yang melibatkan molekul-molekul sederhana yang ada di lingkungan awal Bumi. Proses-proses tersebut diyakini mengarah pada pembentukan senyawa organik kompleks yang pada akhirnya menjadi blok bangunan dasar dari kehidupan. Teori evolusi biokimia didukung oleh berbagai eksperimen dan pengamatan ilmiah yang menunjukkan bahwa kondisi di Bumi purba memungkinkan terjadinya reaksi kimia yang membentuk senyawa organik seperti asam amino, nukleotida, dan komponen dasar lainnya. Eksperimen terkenal yang dilakukan oleh Stanley Miller dan Harold Urey pada tahun 1953 menjadi landasan penting bagi teori ini, dengan menunjukkan bahwa molekul organik dapat terbentuk secara alami dari gas-gas yang diperkirakan ada di atmosfer awal Bumi.

### **a. Teori Evolusi Biokimia Menurut Alexander Ivanovich**

Alexander Ivanovich Oparin (1894-1980) adalah seorang ahli biokimia asal Rusia yang terkenal dengan teorinya tentang asal mula kehidupan yang dikenal sebagai teori evolusi biokimia. Pada tahun 1924, Oparin mengajukan hipotesis bahwa kehidupan di Bumi muncul melalui proses evolusi kimia secara bertahap. Teorinya berfokus pada gagasan bahwa atmosfer awal Bumi terdiri dari gas-gas sederhana seperti metana ( $\text{CH}_4$ ), ammonia ( $\text{NH}_3$ ), hidrogen ( $\text{H}_2$ ), dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Menurut Oparin, di bawah pengaruh energi seperti sinar matahari, radiasi ultraviolet, atau aktivitas vulkanik, gas-gas ini dapat bereaksi membentuk senyawa organik sederhana. Oparin menyatakan bahwa di lautan purba,

senyawa-senyawa organik sederhana ini dapat terakumulasi dan membentuk "sup purba" (primordial soup). Dalam lingkungan lautan ini, senyawa organik sederhana seperti asam amino dapat bergabung membentuk molekul yang lebih kompleks, termasuk protein dan nukleotida. Proses ini terjadi melalui reaksi kimia yang didorong oleh energi dari sumber-sumber eksternal seperti kilat dan radiasi matahari.

**b. Teori Evolusi Biokimia Menurut Harold Urey**

Harold Urey (1893-1981) adalah seorang ahli kimia asal Amerika Serikat yang memainkan peran penting dalam memperkuat konsep teori evolusi biokimia melalui pemikirannya tentang komposisi atmosfer awal Bumi dan kemampuannya untuk membentuk senyawa organik. Pada tahun 1950-an, Urey mengusulkan bahwa atmosfer awal Bumi sangat berbeda dari atmosfer modern. Ia menyatakan bahwa atmosfer purba lebih bersifat reduktif, yang artinya didominasi oleh gas-gas sederhana seperti metana ( $\text{CH}_4$ ), ammonia ( $\text{NH}_3$ ), hidrogen ( $\text{H}_2$ ), dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ), serta hampir tidak ada oksigen bebas. Pemikiran Urey tentang kondisi atmosfer purba ini menjadi landasan bagi eksperimen yang dilakukan oleh Stanley Miller, salah satu mahasiswanya. Bersama-sama, Urey dan Miller merancang sebuah eksperimen yang terkenal pada tahun 1953, yang kemudian dikenal sebagai eksperimen Miller-Urey. Dalam eksperimen ini, mereka menciptakan simulasi kondisi atmosfer awal Bumi dengan mencampurkan gas-gas metana, ammonia, hidrogen, dan uap air dalam sebuah alat yang tertutup rapat. Campuran ini kemudian diberi percikan listrik untuk meniru efek kilat yang diperkirakan sering terjadi di atmosfer awal Bumi.

**c. Teori Evolusi Biokimia Menurut Stanley Miller**

Eksperimen Stanley Miller pada tahun 1953 merupakan salah satu percobaan penting yang memberikan dukungan kuat terhadap teori evolusi biokimia. Percobaan ini dilakukan oleh Stanley Miller di bawah bimbingan Harold Urey, bertujuan untuk meniru kondisi atmosfer awal Bumi yang diperkirakan bersifat reduktif, terdiri dari gas-gas seperti metana, ammonia, hidrogen, dan uap air. Dalam eksperimen tersebut, Miller merancang alat laboratorium yang mencampurkan gas-gas ini dan memicu reaksi kimia melalui percikan listrik yang menyerupai kilat. Setelah beberapa hari, hasil eksperimen menunjukkan terbentuknya senyawa organik sederhana seperti asam amino, yang merupakan komponen dasar kehidupan. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa molekul organik dapat terbentuk secara alami dalam kondisi atmosfer awal Bumi, memperkuat gagasan bahwa kehidupan mungkin muncul dari proses kimia yang berlangsung secara bertahap. Meskipun masih ada perdebatan mengenai komposisi pasti atmosfer awal Bumi, eksperimen ini dianggap sebagai tonggak penting dalam memahami asal mula kehidupan dan menjadi dasar bagi penelitian lebih lanjut di bidang biokimia dan evolusi. Stanley Miller merancang sebuah alat laboratorium tertutup yang meniru atmosfer awal Bumi. Alat ini terdiri dari dua tabung utama yang dihubungkan dengan rangkaian kaca. Salah satu tabung berisi air yang dipanaskan hingga mendidih untuk menghasilkan uap air, sementara tabung lainnya diisi dengan campuran gas metana, ammonia, dan hidrogen. Campuran gas ini kemudian diberi percikan listrik bertegangan tinggi untuk meniru efek kilat, yang pada masa itu dianggap sebagai salah satu sumber energi utama di atmosfer awal Bumi. Air yang menguap kemudian dicampur dengan gas-gas tersebut di ruang reaksi, di mana percikan listrik memicu reaksi kimia. Uap air dan gas yang bereaksi kemudian didinginkan sehingga mengembun kembali menjadi cairan, yang dikumpulkan di dalam bejana terpisah untuk dianalisis. Setelah eksperimen berlangsung selama seminggu, Miller menganalisis cairan yang terkumpul dan menemukan bahwa beberapa senyawa organik sederhana, termasuk asam amino, telah terbentuk. Asam amino adalah blok bangunan dasar untuk protein, yang merupakan komponen esensial dalam sel hidup. Penemuan ini sangat mengejutkan pada masanya, karena menunjukkan bahwa senyawa dasar kehidupan dapat terbentuk secara alami di bawah kondisi yang menyerupai atmosfer awal Bumi.

### Contoh Soal

Jelaskan perbedaan utama antara teori abiogenesis dan teori biogenesis serta sebutkan salah satu bukti ilmiah yang mendukung teori biogenesis!

#### Jawaban:

Teori abiogenesis menyatakan bahwa kehidupan muncul secara spontan dari benda mati, sedangkan teori biogenesis menyatakan bahwa kehidupan hanya dapat berasal dari kehidupan sebelumnya. Salah satu bukti ilmiah yang mendukung teori biogenesis adalah percobaan Louis Pasteur yang menggunakan labu leher angsa untuk menunjukkan bahwa mikroorganisme berasal dari udara, bukan muncul spontan dari kaldu.

#### Pembahasan:

Perbedaan antara kedua teori ini terletak pada asal mula kehidupan. Abiogenesis mengandalkan konsep generasi spontan yang tidak terbukti secara ilmiah, sedangkan biogenesis didukung oleh eksperimen terkontrol. Percobaan Louis Pasteur menjadi penentu dalam membantah abiogenesis karena menunjukkan bahwa tanpa kontaminasi udara, kaldu tetap steril. Hal ini menegaskan bahwa kehidupan tidak bisa muncul begitu saja dari benda mati.

### Kegiatan Kelompok 2

Pada kegiatan ini, kamu dan kelompokmu akan menunjukkan peran seleksi alam dalam menentukan kelangsungan hidup suatu populasi, mengamati bagaimana variasi individu memengaruhi peluang bertahan hidup dan menjelaskan keterkaitan antara adaptasi, seleksi alam, dan evolusi.

1. Buatlah kelompok yang beranggotakan 4 orang, lalu siapkan alat dan bahan berikut:
  - ▷ Beras merah, kacang hijau, dan kacang hitam (sebagai model individu dengan warna berbeda)
  - ▷ Kain putih dan kain hitam (sebagai simulasi lingkungan)
  - ▷ Stopwatch
  - ▷ Pinset atau sumpit (simulasi alat pencari makan/predator)
  - ▷ Gelas plastik atau wadah kecil
2. Bentangkan kain putih di atas meja (lingkungan terang) dan kain hitam di atas meja lain (lingkungan gelap)
3. Sebarkan campuran beras merah, kacang hijau, dan kacang hitam secara merata di atas kedua kain
4. Salah satu anggota kelompok bertugas sebagai "predator" yang mengambil butiran dengan pinset selama 30 detik
5. Hitung sisa masing-masing jenis butiran setelah simulasi berlangsung
6. Ulangi beberapa kali untuk melihat tren populasi
7. Diskusikan pertanyaan berikut, lalu buatlah kesimpulan dari kegiatan yang baru saja kamu lakukan.
  - a. Individu berwarna apa yang lebih mudah terlihat dan dimakan?
  - b. Individu berwarna apa yang lebih banyak tersisa di tiap lingkungan?
  - c. Apa hubungan hasil simulasi ini dengan konsep adaptasi dan seleksi alam?
  - d. Bagaimana hasil ini bisa menjelaskan proses evolusi di alam nyata?

## Rangkuman

Evolusi telah membahas secara mendalam tentang konsep dasar evolusi, teori-teori yang dikemukakan oleh berbagai ilmuwan, serta fenomena-fenomena yang berkaitan dengan evolusi. Evolusi merupakan perubahan bertahap yang terjadi pada makhluk hidup dari generasi ke generasi, yang memungkinkan spesies untuk beradaptasi dan bertahan hidup dalam lingkungan yang selalu berubah. Berbagai teori yang dikemukakan oleh ilmuwan seperti Lamarck, Darwin, dan Weismann memberikan landasan pemahaman kita tentang proses evolusi dan seleksi alam, meskipun dengan pendekatan dan penekanan yang berbeda. Dari teori-teori tersebut, dapat disimpulkan bahwa mekanisme-mekanisme seperti mutasi, seleksi alam, aliran gen, dan perkawinan yang tidak acak berperan penting dalam menentukan frekuensi alel dalam suatu populasi, yang akhirnya membentuk spesies baru. Petunjuk adanya evolusi ditemukan dari berbagai sumber, termasuk fosil, perbandingan anatomi dan embriologi, serta bukti biokimia. Fenomena adaptasi, seleksi alam, dan domestikasi juga menunjukkan bagaimana evolusi terjadi dalam skala mikro dan makro, baik melalui evolusi konvergensi maupun divergensi. Pemahaman tentang evolusi juga membuka wawasan tentang proses asal mula kehidupan melalui evolusi biokimia, di mana berbagai teori dari Oparin, Urey, dan eksperimen Miller memberikan bukti dan dukungan terhadap pembentukan senyawa organik di Bumi purba.

## Latihan Soal

1. Teori evolusi yang menyatakan bahwa sifat yang diperoleh selama hidup dapat diwariskan kepada keturunannya dikemukakan oleh...
  - a. Charles Darwin
  - b. Alfred Russel Wallace
  - c. Jean-Baptiste Lamarck
  - d. Gregor Mendel
  - e. August Weismann
2. Mekanisme yang dapat menyebabkan perubahan frekuensi alel dalam suatu populasi secara acak adalah...
  - a. Seleksi alam
  - b. Perkawinan tidak acak
  - c. Mutasi
  - d. Aliran gen
  - e. Hanyutan genetik (genetic drift)
3. Petunjuk evolusi yang didasarkan pada persamaan struktur tubuh makhluk hidup yang berbeda asal namun memiliki fungsi yang sama disebut...
  - a. Organ homolog
  - b. Organ analog
  - c. Organ vestigial
  - d. Perbandingan embriologi
  - e. Bukti biokimia
4. Seleksi alam menurut teori Darwin terjadi karena...
  - a. Setiap individu memiliki peluang hidup yang sama
  - b. Lingkungan tidak memengaruhi kelangsungan hidup spesies
  - c. Individu yang paling kuat pasti akan bertahan
  - d. Individu yang memiliki sifat adaptif akan lebih mungkin bertahan dan bereproduksi
  - e. Semua variasi pasti akan diwariskan ke keturunannya
5. Evolusi konvergen ditunjukkan oleh...
  - a. Paus dan lumba-lumba yang memiliki leluhur yang sama
  - b. Sayap kelelawar dan tangan manusia yang memiliki struktur tulang serupa

- c. Sayap burung dan sayap serangga yang memiliki fungsi sama tetapi struktur berbeda
  - d. Kaki depan kuda dan sirip ikan paus yang menunjukkan kesamaan leluhur
  - e. Paru-paru manusia dan insang ikan
6. Salah satu bukti dari evolusi yang diperoleh melalui penelitian embriologi adalah...
- a. Fosil makhluk purba
  - b. Organ tubuh yang tidak berkembang sempurna
  - c. Persamaan tahapan perkembangan embrio beberapa vertebrata
  - d. Perbedaan jumlah kromosom pada setiap spesies
  - e. Struktur protein dan enzim antarspesies
7. Eksperimen yang dilakukan oleh Miller-Urey pada tahun 1953 memberikan bukti bahwa...
- a. Kehidupan berasal dari planet lain yang menyerupai Bumi
  - b. Senyawa organik sederhana dapat terbentuk dari senyawa anorganik di Bumi purba
  - c. Mutasi genetik menyebabkan munculnya spesies baru
  - d. Fosil merupakan satu-satunya bukti asal mula kehidupan
  - e. Proses seleksi buatan lebih cepat menghasilkan spesies baru daripada seleksi alam

**Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!**



## Referensi

- Campbell, N. A., Reece, J. B., & Mitchell, L. G. (2005). Biology. Benjamin Cummings.
- Carroll, S. B. (2005). Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom. W. W. Norton & Company.
- Darwin, C. (1859). On the Origin of Species by Means of Natural Selection. John Murray.
- Dawkins, R. (1976). The Selfish Gene. Oxford University Press.
- Dawkins, R. (1986). The Blind Watchmaker: Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe Without Design. W. W. Norton & Company.
- Futuyma, D. J. (2013). Evolution. Sinauer Associates.
- Gould, S. J. (2002). The Structure of Evolutionary Theory. Harvard University Press.
- Mayr, E. (1963). Animal Species and Evolution. Harvard University Press.
- Miller, S. L. (1953). A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. *Science*, 117(3046), 528-529.
- Oparin, A. I. (1924). The Origin of Life on Earth. Moscow: ONTI.
- Ridley, M. (2003). Evolution. Blackwell Publishing.
- Smith, J. M., & Szathmáry, E. (1997). The Major Transitions in Evolution. Oxford University Press.
- Stanley, S. M. (1979). Macroevolution: Pattern and Process. W. H. Freeman.
- Strickberger, M. W. (2005). Evolution. Jones and Bartlett Publishers.
- Urey, H. C. (1952). On the Early Chemical History of the Earth and the Origin of Life. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38(4), 351-363.
- Wallace, A. R. (1870). Contributions to the Theory of Natural Selection. Macmillan.
- Watson, J. D., & Crick, F. H. C. (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature*, 171, 737-738.
- Weismann, A. (1889). Essays Upon Heredity and Kindred Biological Problems. Clarendon Press.
- Wilson, E. O. (1992). The Diversity of Life. Belknap Press of Harvard University Press.
- Zimmer, C. (2013). The Tangled Bank: An Introduction to Evolution. Roberts & Company Publishers