

# ILMU BIOMEDIK

The background of the cover features a large, detailed image of a microscope on the right side, and a glowing blue DNA double helix structure on the left side. The overall color scheme is light blue and white, with a soft, out-of-focus background.

**Penulis:**

Siti Ruqayyah; Dara Juliana; Fahmi Rizal; Vicha Nur Fatanah; Diani Sri Hidayati; Nurhidayanti; Suwarny; Erawati; Pancawati Ariami; Gabriella Gita Febriana; Huntari Harahap

# **ILMU BIOMEDIK**

Siti Ruqayyah; Dara Juliana; Fahmi Rizal; Vicha Nur  
Fatanah; Diani Sri Hidayati; Nurhidayanti; Suwarny;  
Erawati; Pancawati Ariami; Gabriella Gita Febriana;  
Huntari Harahap

**Editor: Regina Rengsi Putri Wahyuni**



**PT. Mustika Sri Rosadi**

# **Ilmu Biomedik**

## **Penulis:**

Siti Ruqayyah; Dara Juliana; Fahmi Rizal; Vicha Nur Fatanah;  
Diani Sri Hidayati; Nurhidayanti; Suwarny; Erawati; Pancawati  
Ariami; Gabriella Gita Febriana; Huntari Harahap

**Editor:** Regina Rengsi Putri Wahyuni

**Layout:** Tim PT. Mustika Sri Rosadi

**Desain Sampul:** Tim PT. Mustika Sri Rosadi

**ISBN:** 978-634-7535-90-0 (PDF)

**Cetakan Pertama:** 28 Mei 2026

Hak Cipta 2026 (sesuaikan)

---

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

---

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan  
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh **Penerbit Mustika Sri Rosadi**

**Anggota IKAPI No. 544/JBA/2026**

Alamat:

Citra Indah City, Bukit Heliconia, Kec. Jonggol, Kab. Bogor.

Email: [mars.mustikasrirosadi@gmail.com](mailto:mars.mustikasrirosadi@gmail.com)

Website: [mustikamars.com](http://mustikamars.com)

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya buku ajar *Ilmu Biomedik* ini. Buku ini disusun sebagai sumber pembelajaran yang membahas konsep dasar ilmu biomedik secara sistematis, mulai dari struktur dan fungsi sel, biomolekul, genetika, mikrobiologi, imunologi, hingga aplikasi biomedik dalam diagnostik klinis dan perkembangan teknologi kesehatan.

Materi dalam buku ini dirancang untuk membantu mahasiswa memahami keterkaitan ilmu dasar kedokteran dan kesehatan dengan perkembangan ilmu biomedik modern. Setiap bab dilengkapi latihan soal sebagai sarana evaluasi dan penguatan pemahaman konsep.

Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, maupun tenaga kesehatan dalam mendukung proses pembelajaran dan pengembangan ilmu pengetahuan di bidang kesehatan.

Bogor, 28 Mei 2026

Penulis

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
BAB 1. PENGANTAR ILMU BIOMEDIK - Siti Ruqayyah.....	1
A. Pendahuluan .....	1
B. Definisi dan Ruang Lingkup Ilmu Biomedik.....	3
C. Peran dan Signifikansi Ilmu Biomedik dalam Bidang Kesehatan dan Kedokteran .....	6
D. Hubungan Ilmu Biomedik dengan Ilmu Dasar .....	8
E. Konsep Dasar Struktur dan Fungsi Tubuh Manusia .....	10
F. Tonggak Sejarah Perkembangan Ilmu Biomedik.	12
G. Bidang- Bidang Utama dalam Ilmu Biomedik.....	13
H. Kontribusi Ilmu Biomedik dalam Ilmu Kesehatan	14
I. Latihan Soal .....	17
BAB 2. STRUKTUR DAN FUNGSI SEL - Dara Juliana.....	21
A. Pendahuluan .....	21
B. Pengertian dan Teori Sel.....	22
C. Struktur Sel: Komponen dan Organela.....	24
D. Fungsi Sel dalam Proses Kehidupan.....	27
E. Perbedaan Sel Prokariotik dan Eukariotik .....	29
F. Latihan Soal .....	32

BAB 3. BIOMOLEKUL DAN METABOLISME SEL - Fahmi Rizal .....	35
A. Pendahuluan .....	35
B. Karbohidrat dalam Proses Metabolisme.....	37
C. Lipid dalam Proses Metabolisma.....	40
D. Protein dalam Proses Metabolisme .....	42
E. Asam Nukleat dalam Proses Metabolisme .....	44
F. Latihan Soal .....	45
BAB 4. ENZIM DAN REGULASI BOKIMIA - Vicha Nur Fatanah .....	49
A. Pendahuluan .....	49
B. Struktur, Mekanisme Kerja Enzim dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kerja Enzim .....	51
C. Reaksi Biokimia dalam Tubuh .....	58
D. Latihan Soal .....	64
BAB 5. GENETIKA DAN REGULASI GEN - Diani Sri Hidayati .....	67
A. Pendahuluan .....	67
B. Konsep Dasar Genetika .....	67
C. Hukum Pewarisan Sifat (Hukum Mendel).....	69
D. Perkembangan dan Aplikasi Genetika .....	70
E. Regulasi Gen .....	71
F. Regulasi Gen pada Eukariot.....	72
G. Peran Regulasi Gen dalam Penyakit.....	75
H. Perkembangan Teknologi dalam Studi Regulasi Gen .....	75
I. Latihan Soal .....	76

BAB 6. BIOLOGI MOLEKULER - Nurhidayanti.....	79
A. Pendahuluan .....	79
B. Ruang Lingkup Materi .....	80
C. Latihan Soal .....	90
BAB 7. MIKROBIOLOGI DASAR - Suwarny .....	94
A. Pendahuluan .....	94
B. Pengantar: Dunia Mikroorganisme .....	95
C. Klasifikasi Umum Mikroorganisme.....	96
D. Patogenisitas, Virulensi, dan Mekanisme Infeksi	102
E. Karakteristik Kelompok Mikroorganisme Patogen .....	106
F. Rantai Infeksi dan Prinsip Pencegahan.....	112
G. Resistensi Antimikroba: Tantangan Kesehatan Global.....	114
H. Latihan Soal .....	116
BAB 8. IMUNOLOGI DASAR - Erawati.....	120
A. Pendahuluan .....	120
B. Komponen Sistem Imun .....	122
C. Sel-Sel Sistem Imun.....	125
D. Antigen dan Antibodi .....	128
E. Mekanisme Respon Imun .....	129
F. Sistem Komplemen.....	130
G. Memori Immunologis .....	131
H. Gangguan Sistem Imun.....	134
I. Aplikasi Immunologi dalam Biomedik.....	134
J. Kesimpulan .....	136
K. Latihan Soal .....	136

BAB 9. ONKOLOGI DASAR - Pancawati Ariami .....	139
A. Pendahuluan .....	139
B. Mekanisme Terjadinya Kanker dan Prinsip Pencegahan .....	142
C. Mutasi Gen, Epigenetik, dan Distegulasi Jalur Sinyal .....	146
D. Hallmarks of Cancer .....	148
E. Invasi, Angiogenesis, dan Metastasis .....	151
F. Prinsip Pencegahan Primer, Sekunder, dan Tersier .....	154
G. Aplikasi Mikroskopis: Spektrum Lesi Pra-kanker ke Kanker Invasif.....	156
H. Ringkasan .....	161
I. Latihan Soal .....	162
BAB 10. BIOMEDIK DALAM DIAGNOSTIK KLINIS - Gabriella Gita Febriana.....	166
A. Pendahuluan .....	166
B. Dasar Biomolekuler dalam Penyakit.....	166
C. Teknologi Diagnostik Berbasis Nukleat.....	168
D. Immunoassay dan Diagnostik Protein .....	170
E. Bionstrumentasi dan Point-of-Care Testing.....	174
F. Teknologi Pencitraan Medis ( <i>Imaging</i> ).....	175
G. Latihan Soal .....	177
BAB 11. ETIKA DAN PERKEMBANGAN ILMU BIOMEDIK - Huntari Harahap .....	182
A. Pendahuluan .....	182

B. Isu Etik dalam Ilmu Biomedik: Fondasi Moral Sains .....	184
D. Perkembangan Teknologi Kesehatan: Harapan di Era Digital .....	196
E. Latihan Soal .....	200
DAFTAR PUSTAKA.....	205
BIOGRAFI PENULIS .....	222
BIOGRAFI EDITOR .....	241
KUNCI JAWABAN .....	243
SINOPSIS .....	245

## DAFTAR TABEL

Tabel 7. 1 Perbandingan Klasifikasi Umum Mikroorganisme .....	96
Tabel 7. 2 Komponen Struktural Sel Bakteri, Fungsi, dan Relevansi Klinisnya.....	98
Tabel 7. 3 Bakteri Patogen Utama dan Karakteristik..	106
Tabel 7. 4 Protozoa Patogen Utama, dan Mekanisme Infeksi .....	110
Tabel 7. 5 Enam Mata Rantai Infeksi dan Strategi Pemutusan Secara Klinis.....	113
Tabel 8. 1 Molekul dan Fungsi MHC.....	126
Tabel 8. 2 Sel-sel Sistem Imun .....	133
Tabel 8. 3 Tipe dan Mekanisme Alergi .....	134
Tabel 9. 1 Template Pencatatan Temuan (Sederhana) .....	156
Tabel 9. 2 Contoh Pencatatan: Payudara (ADH – DCIS – Karsinoma Invasif).....	157
Tabel 9. 3 Contoh Pencatatan: Kolon (Adenoma – Adenokarsinoma) .....	159

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Sel (OpenStax, 2022).....	24
Gambar 4. 1 Induce fit & lock and key model.....	55
Gambar 4. 2 Mekanisme Reaksi Enzim (Iqbal, A. & Ali, S., 2025).....	57
Gambar 5. 1 Tahap inisiasi transkripsi.....	74
Gambar 7. 1 Fase Pertumbuhan Bakteri (Sumber: <a href="https://www.instagram.com/p/DVvh5iGgtQV/?igsh=MTg1azJxaWR2MmJ5Zg==">https://www.instagram.com/p/DVvh5iGgtQV/?igsh=MTg1azJxaWR2MmJ5Zg==</a> ).....	102
Gambar 7. 2 Segitiga Epidemiologi (Sumber: Adaptasi dari Gordis, L., 2014).....	103
Gambar 7. 3 Ilustrasi Postulat Koch.....	105
Gambar 8. 1 Komponen sistem Imun Adaptif.....	125
Gambar 8. 2 Komponen sistem Imun Adaptif.....	127
Gambar 8. 3 Aktivitas Sel T.....	127
Gambar 8. 4 Antibodi.....	129
Gambar 8. 5 Jalur Aktivasi Komplemen Klasik.....	130
Gambar 8. 6 Jalur Aktivasi Komplemen Alternatif.....	130
Gambar 8. 7 Organ Sistem Limpa.....	132
Gambar 8. 8 Imunoterapi Modern.....	135
Gambar 9. 1 Kerusakan DNA.....	143
Gambar 9. 2 Interpretasi laporan patologi dan komunikasi klinis.....	153

# **BAB 1. PENGANTAR ILMU BIOMEDIK**

---

## **A. Pendahuluan**

### 1. Tujuan Pembelajaran

Bab ini disusun sebagai fondasi awal dalam memahami ilmu biomedik sebagai disiplin ilmu yang menjadi dasar bagi pendidikan kedokteran dan ilmu kesehatan. Ilmu biomedik tidak hanya berperan sebagai kumpulan konsep teoritis, tetapi juga sebagai kerangka berpikir ilmiah yang mengintegrasikan berbagai cabang ilmu untuk menjelaskan fenomena biologis dalam konteks kesehatan dan penyakit.

Setelah mempelajari Bab 1 ini, mahasiswa diharapkan memiliki kemampuan berikut:

- a. Memahami definisi dan ruang lingkup ilmu biomedik secara komprehensif.
- b. Mengidentifikasi peran ilmu biomedik dalam bidang kesehatan dan kedokteran.
- c. Menjelaskan hubungan antara ilmu dasar (biologi, kimia, fisika) dengan ilmu biomedik.
- d. Menguraikan konsep dasar struktur dan fungsi tubuh manusia sebagai landasan ilmu biomedik.
- e. Menelusuri perkembangan dan sejarah ilmu biomedik serta kontribusinya dalam dunia medis modern.

- f. Memahami prinsip metode ilmiah yang digunakan dalam penelitian biomedik.
  - g. Mengidentifikasi bidang-bidang utama dalam ilmu biomedik (misalnya biokimia, anatomi, fisiologi, mikrobiologi, dan patologi) sebagai satu kesatuan sistem ilmu.
  - h. Menunjukkan sikap ilmiah yang kritis, objektif, dan beretika.
2. Capaian Pembelajaran

Capaian pembelajaran dalam bab ini dirancang berdasarkan taksonomi pembelajaran yang mencakup ranah kognitif dan afektif. Hal ini bertujuan agar mahasiswa tidak hanya memahami konsep, tetapi juga mampu mengaplikasikan dan menganalisisnya dalam konteks nyata.

Setelah mengikuti dan menyelesaikan pembelajaran pada Bab 1 ini, diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan konsep dan ruang lingkup ilmu biomedik secara sistematis (C2 – *Understanding*).
- b. Mengaitkan peran ilmu biomedik dengan praktik kesehatan/klinis (C3 – *Applying*).
- c. Menganalisis kontribusi ilmu biomedik dalam perkembangan ilmu kedokteran (C4 – *Analyzing*).

- d. Mengidentifikasi dan memahami metode ilmiah dalam penelitian biomedik (C2–C3).
- e. Menunjukkan pemahaman terhadap etika dasar dalam penelitian biomedik (A2 – *Affective Domain*).

## **B. Definisi dan Ruang Lingkup Ilmu Biomedik**

Ilmu biomedik merupakan disiplin ilmu yang berkembang pesat seiring kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi. Secara umum, ilmu biomedik dapat didefinisikan sebagai cabang ilmu yang mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu kehidupan untuk memahami mekanisme biologis yang mendasari kondisi normal (fisiologis) dan kondisi penyakit (patologis) pada manusia (*Institute of Biomedical Science [IBMS], 2023*).

Dalam perspektif yang lebih luas, ilmu biomedik berfungsi sebagai jembatan antara ilmu dasar dan ilmu klinis, di mana pengetahuan yang diperoleh dari penelitian dasar diterjemahkan menjadi aplikasi klinis melalui pendekatan translasi (*translational science*). Pendekatan ini memungkinkan hasil penelitian laboratorium digunakan secara langsung dalam praktik medis untuk meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan (Jameson *et al.*, 2018).

Ilmu biomedik memiliki beberapa karakteristik utama yang membedakannya dari cabang ilmu

lainnya. Karakteristik ini menjadikan ilmu biomedik sebagai bidang yang terus berkembang seiring kemajuan teknologi kesehatan.

1. Bersifat interdisipliner

Ilmu biomedik mengintegrasikan berbagai bidang ilmu yang memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap mekanisme biologis (Bishop, 2020), antara lain:

- a. Biokimia.
- b. Genetika dan genomik.
- c. Mikrobiologi dan imunologi.
- d. Fisiologi dan anatomi.

2. Berbasis Molekuler dan Seluler

Fokus utama ilmu biomedik adalah proses biologis pada tingkat molekul dan sel, seperti ekspresi gen, regulasi protein, dan metabolisme sel yang memungkinkan pemahaman mendalam mengenai mekanisme penyakit (Alberts *et al.*, 2022).

3. Berorientasi Translasi (*Translational Science*)

Ilmu biomedik berperan dalam mengubah hasil penelitian dasar menjadi aplikasi klinis, seperti:

- a. Pengembangan obat baru.
- b. Teknologi diagnostik.
- c. Terapi inovatif.

#### 4. Berbasis Bukti (*Evidence-Based*)

Setiap konsep dan praktik dalam ilmu biomedik harus didasarkan pada data ilmiah yang valid, metode penelitian yang terstandar, dan analisis yang objektif.

Ruang lingkup ilmu biomedik mencakup berbagai bidang yang saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Secara umum, bidang-bidang utama tersebut meliputi:

1. Biologi sel dan molekuler; mempelajari struktur dan fungsi sel, serta mekanisme molekuler yang mengatur aktivitas sel.
2. Biokimia; mengkaji reaksi kimia dalam sistem biologis, termasuk metabolisme dan fungsi enzim.
3. Genetika dan genomik; mempelajari pewarisan sifat dan variasi genetik dalam populasi manusia.
4. Anatomi dan fisiologi; menjelaskan struktur tubuh manusia dan fungsi masing-masing sistem organ.
5. Mikrobiologi, virologi, dan parasitologi; mengkaji mikroorganisme penyebab penyakit dan interaksinya dengan tubuh manusia.
6. Imunologi; mempelajari sistem pertahanan tubuh terhadap infeksi dan penyakit.
7. Patologi dan patofisiologi; menjelaskan perubahan struktur dan fungsi tubuh akibat penyakit.

8. Farmakologi; mempelajari efek obat terhadap tubuh serta mekanisme kerja obat.

Bidang-bidang tersebut menunjukkan bahwa ilmu biomedik mencakup pemahaman dari tingkat molekuler hingga sistem tubuh manusia secara menyeluruh, menjadikan ilmu biomedik sebagai disiplin ilmu yang komprehensif dan dinamis (Alberts *et al.*, 2022).

### **C. Peran dan Signifikansi Ilmu Biomedik dalam Bidang Kesehatan dan Kedokteran**

Ilmu biomedik memiliki kontribusi yang sangat signifikan dalam sistem pelayanan kesehatan modern. Peran ini tidak hanya terbatas pada aspek teoritis, tetapi juga mencakup aplikasi praktis dalam diagnosis, terapi, dan pencegahan penyakit. Sebagian besar keputusan klinis saat ini didasarkan pada data objektif yang diperoleh dari analisis biomedik, seperti pemeriksaan darah, jaringan, dan *biomarker* spesifik (IBMS, 2023).

#### **1. Peran dalam Diagnosis Penyakit**

Ilmu biomedik menjadi dasar dalam pengambilan keputusan klinis modern melalui data hasil berbagai pemeriksaan diagnostik yang objektif dan terukur (IBMS, 2023), terutama melalui:

a. Pemeriksaan laboratorium klinik, seperti:

1) Analisis darah (hematologi, kimia klinik).

- 2) Pemeriksaan urin dan cairan tubuh lainnya.
  - b. Diagnostik molekuler, seperti:
    - 1) *Polymerase Chain Reaction* (PCR).
    - 2) *Sequencing* DNA.
  - c. Identifikasi *biomarker* penyakit, misalnya:
    - 1) HbA1c untuk diabetes.
    - 2) Troponin untuk infark miokard.
2. Peran dalam Pengembangan Terapi
- Kemajuan ilmu biomedik telah memungkinkan pengembangan berbagai terapi medis inovatif, antara lain:
- a. Terapi obat berbasis molekuler; yang menargetkan jalur biologis spesifik.
  - b. Terapi gen (*gene therapy*); untuk memperbaiki kelainan genetik.
  - c. Terapi sel punca (*stem cell therapy*); untuk regenerasi jaringan.
  - d. Pengobatan presisi (*personalized medicine*); yang disesuaikan dengan profil genetik individu.

Pendekatan ini memungkinkan intervensi medis yang lebih efektif, spesifik terhadap penyebab penyakit, dan personal sehingga mengurangi efek samping yang dapat timbul (Jameson *et al.*, 2018).

### 3. Peran dalam Pencegahan Penyakit

Pemahaman mekanisme penyakit memungkinkan intervensi preventif dilakukan secara lebih tepat sasaran melalui peran ilmu biomedik dalam:

- a. Identifikasi faktor risiko penyakit.
- b. Program skrining dan deteksi dini.
- c. Pengembangan vaksin.
- d. Edukasi kesehatan berbasis bukti.

## **D. Hubungan Ilmu Biomedik dengan Ilmu Dasar**

Ilmu biomedik tidak dapat berdiri sendiri sebagai disiplin ilmu yang otonom, melainkan berkembang dari integrasi tiga ilmu dasar utama, yaitu biologi, kimia, dan fisika. Ketiga bidang ini membentuk fondasi konseptual yang memungkinkan pemahaman menyeluruh terhadap mekanisme kehidupan manusia, baik dalam kondisi normal maupun patologis. Integrasi ini menjadikan ilmu biomedik sebagai ilmu yang bersifat holistik dan analitis sekaligus (Guyton & Hall, 2021).

Biologi memberikan dasar pemahaman mengenai struktur dan fungsi makhluk hidup. Dalam konteks biomedik, biologi berperan dalam menjelaskan organisasi kehidupan dari tingkat sel hingga organisme, memahami proses fisiologis seperti metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi, serta mengkaji interaksi antara organisme dengan

lingkungannya. Cabang biologi yang berkontribusi besar terhadap biomedik meliputi biologi sel, biologi molekuler, genetika, hingga ekologi kesehatan.

Kimia, khususnya biokimia, berperan dalam menjelaskan proses molekuler yang terjadi dalam tubuh manusia. Reaksi kimia dalam tubuh mencakup metabolisme karbohidrat, lipid, dan protein, sintesis dan degradasi biomolekul, serta aktivitas enzim dan regulasi metabolik. Sebagai contoh, gangguan metabolisme glukosa pada diabetes melitus merupakan hasil dari disfungsi jalur biokimia yang kompleks. Oleh karena itu, pemahaman kimia sangat penting dalam pengembangan obat dan terapi (Bishop, 2020).

Fisika memberikan penjelasan mengenai fenomena biofisik dalam tubuh manusia, antara lain mekanika aliran darah (hemodinamika), transmisi impuls saraf, difusi gas dalam sistem respirasi, dan prinsip kerja alat diagnostik misalnya MRI dan CT scan. Pendekatan biofisika memungkinkan analisis kuantitatif terhadap fungsi tubuh dan mendukung pengembangan teknologi medis modern.

Integrasi ilmu dasar dalam biomedik menghasilkan berbagai disiplin turunan, seperti:

1. Biokimia yang merupakan penerapan kimia dalam sistem biologis.

2. Biofisika; penerapan prinsip fisika dalam tubuh manusia.
3. Biologi molekuler yang mempelajari integrasi biologi dan kimia dalam memahami DNA dan protein.
4. Bioinformatika; integrasi biologi dengan teknologi informasi dan ilmu komputer.
5. *Biomedical engineering*; integrasi biologi dengan ilmu teknik.

Pendekatan interdisipliner ini memungkinkan analisis mekanisme penyakit secara lebih mendalam, pengembangan teknologi diagnostik dan terapeutik, dan inovasi dalam bidang kesehatan. Sebagai contoh, penemuan struktur DNA oleh Watson dan Crick tidak hanya merupakan pencapaian biologi, tetapi juga hasil integrasi kimia dan fisika struktural, yang kemudian membuka jalan bagi perkembangan genetika medis modern (Alberts *et al.*, 2022).

#### **E. Konsep Dasar Struktur dan Fungsi Tubuh Manusia**

Tubuh manusia tersusun dalam suatu organisasi hierarkis yang kompleks, dimulai dari tingkat sel, jaringan, organ, sistem organ, hingga organisme secara keseluruhan. Pemahaman hierarki ini sangat penting dalam ilmu biomedik karena memungkinkan analisis hubungan antara struktur dan fungsi secara menyeluruh (Alberts *et al.*, 2015).

Sel adalah unit terkecil kehidupan yang menjadi dasar semua struktur biologis. Semua organisme hidup tersusun atas satu atau lebih sel, dan setiap sel memiliki komponen utama seperti membran sel, sitoplasma, dan materi genetik (DNA).

Sel memiliki fungsi utama meliputi metabolisme, sintesis protein, replikasi, dan respons terhadap lingkungan. Selain itu, sel-sel dalam organisme multiseluler bekerja secara terkoordinasi dan terspesialisasi untuk membentuk jaringan dan organ.

Sel-sel dengan fungsi serupa akan membentuk jaringan, seperti jaringan epitel, otot, saraf, dan ikat. Jaringan-jaringan ini kemudian membentuk organ, yang memiliki fungsi spesifik (misalnya jantung, paru-paru, hati).

Organ-organ tersebut bekerja secara terintegrasi dalam sistem organ, seperti sistem kardiovaskular, sistem respirasi, sistem saraf, dan sistem pencernaan. Hubungan antara struktur dan fungsi sangat penting dalam memahami fisiologi dan patologi. Misalnya, perubahan struktur jaringan dapat menyebabkan gangguan fungsi organ (Kierszenbaum & Tres, 2025).

Prinsip fundamental dalam biomedik menyatakan bahwa struktur menentukan fungsi (*structure determines function*). Artinya, bentuk dan susunan suatu struktur biologis akan memengaruhi fungsinya. Sebagai contoh, bentuk eritrosit yang bikonkaf

meningkatkan efisiensi pertukaran gas, sedangkan struktur alveolus paru-paru memaksimalkan difusi oksigen dan karbon dioksida. Perubahan struktur, seperti kerusakan jaringan, dapat menyebabkan gangguan fungsi organ dan memicu terjadinya penyakit (Kierszenbaum & Tres, 2025).

## **F. Tonggak Sejarah Perkembangan Ilmu Biomedik**

Perkembangan ilmu biomedik merupakan hasil akumulasi pengetahuan selama berabad-abad, yang didorong oleh penemuan ilmiah dan kemajuan teknologi.

### **1. Perkembangan Awal**

Beberapa tonggak penting dimulai dari penemuan mikroskop oleh Antonie van Leeuwenhoek, teori sel oleh Schleiden dan Schwann, hingga penemuan mikroorganisme sebagai penyebab penyakit oleh Louis Pasteur dan Robert Koch, yang menjadi dasar bagi perkembangan mikrobiologi dan patologi.

### **2. Era Biologi Molekuler**

Perkembangan besar terjadi pada abad ke-20 dengan lahirnya biologi molekuler, yang merevolusi pemahaman tentang kehidupan, termasuk penemuan struktur DNA oleh Watson dan Crick, konsep *central dogma* (DNA → RNA → protein), dan pengembangan teknologi

rekombinan DNA. Biologi molekuler memberikan kerangka penting untuk memahami fungsi sel dan mekanisme penyakit pada tingkat molekuler (Alberts *et al.*, 2022).

### 3. Era Teknologi Biomedik Modern

Kemajuan teknologi telah mendorong perkembangan ilmu biomedik yang memungkinkan diagnosis dan terapi menjadi lebih akurat dan personal, seperti *Polymerase Chain Reaction* (PCR), *sequencing* DNA, terapi gen, *stem cell therapy*, dan *artificial intelligence* dalam kesehatan. Dengan demikian, perkembangan ilmu biomedik telah mengubah praktik kedokteran dari pendekatan empiris menjadi lebih presisi dan berbasis data ilmiah (Ke, 2020).

## **G. Bidang- Bidang Utama dalam Ilmu Biomedik**

Ilmu biomedik mencakup berbagai bidang utama yang saling terintegrasi dalam menjelaskan mekanisme kehidupan dan penyakit. Biokimia mempelajari proses kimia dalam sel, sementara anatomi dan fisiologi menjelaskan struktur dan fungsi tubuh secara makroskopis dan sistemik. Genetika dan biologi molekuler berperan dalam memahami pewarisan sifat dan regulasi ekspresi gen.

Selain itu, mikrobiologi mempelajari mikroorganisme penyebab penyakit, sedangkan imunologi mengkaji sistem pertahanan tubuh terhadap patogen. Patologi berfungsi sebagai penghubung antara ilmu dasar dan praktik klinis dengan mempelajari perubahan struktural dan fungsional akibat penyakit. Pendekatan integratif antar bidang ini memungkinkan pemahaman yang komprehensif mengenai kesehatan dan penyakit, serta menjadi dasar dalam pengembangan strategi diagnosis dan terapi yang efektif.

#### **H. Kontribusi Ilmu Biomedik dalam Ilmu Kesehatan**

Ilmu biomedik memberikan dasar ilmiah yang fundamental bagi mahasiswa bidang kesehatan dalam memahami mekanisme biologis tubuh manusia. Pengetahuan ini menjadi fondasi dalam mempelajari ilmu klinis, seperti diagnosis penyakit, terapi, dan pencegahan. Selain itu, ilmu biomedik juga mendorong pendekatan pembelajaran berbasis masalah (*problem-based learning*), di mana mahasiswa dilatih untuk mengintegrasikan ilmu dasar dengan kasus klinis nyata.

Dalam praktik klinis, ilmu biomedik berperan dalam interpretasi hasil laboratorium, penentuan diagnosis berbasis biomarker, serta pemilihan terapi yang tepat. Pendekatan ini dikenal sebagai *evidence-*

*based medicine* (EBM), yang mengintegrasikan bukti ilmiah terbaik dengan keahlian klinis dan preferensi pasien (Tumbelaka, 2002).

Selain itu, ilmu biomedik membuka berbagai peluang karier, seperti peneliti, analis laboratorium, akademisi, profesional di industri farmasi dan bioteknologi, serta konsultan kesehatan dan kebijakan publik. Perkembangan teknologi juga menciptakan bidang baru seperti bioinformatika dan bioteknologi medis, yang semakin memperluas kontribusi ilmu biomedik dalam sistem kesehatan modern.

#### 1. Metode Ilmiah dalam Penelitian Biomedik

Metode ilmiah merupakan pendekatan sistematis yang digunakan untuk memperoleh pengetahuan melalui observasi, eksperimen, dan analisis data secara objektif. Dalam konteks biomedik, metode ini digunakan untuk memahami mekanisme penyakit dan mengembangkan intervensi terapeutik.

Langkah-langkah metode ilmiah meliputi identifikasi masalah, studi literatur, penyusunan hipotesis, desain dan pelaksanaan penelitian, pengumpulan dan analisis data, penarikan kesimpulan, hingga publikasi hasil penelitian. Desain penelitian biomedik dapat berupa penelitian eksperimental (misalnya uji klinis),

observasional (kohort, kasus-kontrol), laboratoris (*in vitro*, *in vivo*), maupun epidemiologis, yang masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan, tergantung tujuan penelitian (Universitas Gadjah Mada, 2022). Pendekatan *evidence-based medicine* menjadi standar dalam praktik kedokteran modern karena mengintegrasikan bukti ilmiah terbaik dengan praktik klinis.

## 2. Etika dan Sikap Ilmiah dalam Ilmu Biomedik

Etika biomedik merupakan aspek penting yang mengatur praktik penelitian dan pelayanan kesehatan agar berjalan secara bertanggung jawab. Prinsip utama etika biomedik meliputi *autonomy*, *beneficence*, *non-maleficence*, dan *justice*, yang menjadi dasar dalam pengambilan keputusan medis (Wardana, 2021).

Dalam penelitian, standar etika internasional seperti Deklarasi Helsinki dan pedoman CIOMS harus dipatuhi, termasuk kewajiban memperoleh persetujuan etik sebelum penelitian dilakukan. Hal ini bertujuan untuk melindungi hak dan keselamatan subjek penelitian.

Selain itu, integritas ilmiah menjadi pilar utama dalam menjaga kepercayaan terhadap hasil penelitian. Sikap ilmiah seperti kejujuran, objektivitas, keterbukaan terhadap bukti baru,

dan tanggung jawab profesional harus dimiliki oleh setiap peneliti. Perkembangan teknologi, seperti kecerdasan buatan dan bioteknologi, juga menuntut adanya pendekatan etika yang adaptif dan berbasis bukti (Ke, 2020).

### **I. Latihan Soal**

1. Ilmu biomedik paling tepat didefinisikan sebagai:
  - A. Ilmu yang mempelajari penyakit menular saja
  - B. Ilmu yang mengkaji aspek klinis tanpa dasar laboratorium
  - C. Ilmu yang mempelajari mekanisme biologis dan molekuler tubuh manusia dalam kondisi normal dan patologis
  - D. Ilmu yang hanya berfokus pada pengobatan tradisional
  - E. Ilmu yang mempelajari interaksi sosial dalam kesehatan
2. Ruang lingkup ilmu biomedik mencakup bidang berikut, kecuali:
  - A. Biokimia
  - B. Fisiologi
  - C. Mikroekonomi
  - D. Immunologi
  - E. Patologi

3. Seorang dokter menggunakan hasil pemeriksaan laboratorium untuk menentukan diagnosis penyakit pasien. Peran ilmu biomedik dalam kasus ini adalah:
  - A. Sebagai dasar kebijakan kesehatan Masyarakat
  - B. Mendukung diagnosis berbasis data biologis
  - C. Menggantikan peran dokter sepenuhnya
  - D. Mengurangi kebutuhan teknologi medis
  - E. Menghilangkan kebutuhan anamnesis
4. Hubungan antara ilmu biomedik dengan ilmu dasar adalah:
  - A. Ilmu biomedik tidak memerlukan ilmu dasar
  - B. Ilmu dasar merupakan landasan bagi pengembangan ilmu biomedik
  - C. Ilmu dasar hanya digunakan dalam penelitian non-medis
  - D. Ilmu biomedik menggantikan ilmu dasar sepenuhnya
  - E. Ilmu dasar hanya relevan pada tingkat sekolah
5. Kerusakan pada tingkat sel yang menyebabkan gangguan fungsi organ menunjukkan bahwa:
  - A. Struktur tidak berhubungan dengan fungsi
  - B. Fungsi organ tidak bergantung pada sel
  - C. Struktur dan fungsi tubuh saling berkaitan erat
  - D. Organ bekerja secara independent
  - E. Sel tidak memiliki peran penting

6. Perkembangan teknologi seperti PCR dan sequencing DNA menunjukkan bahwa ilmu biomedik:
  - A. Tidak mengalami perubahan signifikan
  - B. Hanya berkembang di bidang klinis
  - C. Berkontribusi besar dalam diagnosis dan penelitian penyakit
  - D. Tidak relevan dengan genetika
  - E. Terbatas pada penelitian hewan
7. Langkah pertama dalam metode ilmiah adalah:
  - A. Menarik Kesimpulan
  - B. Mengumpulkan data
  - C. Mengajukan hipotesis
  - D. Mengidentifikasi dan merumuskan masalah
  - E. Menganalisis hasil
8. Seorang peneliti merancang eksperimen untuk menguji efek obat baru terhadap sel kanker. Kegiatan ini termasuk:
  - A. Observasi tanpa tujuan
  - B. Penerapan metode ilmiah dalam penelitian biomedik
  - C. Aktivitas klinis rutin
  - D. Praktik tanpa dasar ilmiah
  - E. Analisis sosial Kesehatan

9. Jika suatu penelitian tidak mengikuti prinsip etika (misalnya tanpa persetujuan subjek), maka dampaknya adalah:
- A. Hasil penelitian tetap valid sepenuhnya
  - B. Penelitian lebih cepat selesai
  - C. Integritas dan keabsahan penelitian diragukan
  - D. Tidak berpengaruh pada ilmu biomedik
  - E. Data menjadi lebih akurat
10. Sikap ilmiah yang penting dalam mempelajari ilmu biomedik adalah:
- A. Mengabaikan data yang tidak sesuai hipotesis
  - B. Mengutamakan opini pribadi
  - C. Bersikap objektif, jujur, dan kritis terhadap data
  - D. Menghindari diskusi ilmiah
  - E. Menolak perkembangan ilmu baru

## **BAB 2. STRUKTUR DAN FUNGSI SEL**

---

### **A. Pendahuluan**

#### 1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu memahami, menjelaskan, dan menganalisis struktur serta fungsi sel sebagai unit dasar kehidupan, serta keterkaitan antara komponen sel dengan proses biologis yang berlangsung di dalamnya.

#### 2. Capaian Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menguraikan pengertian sel dan teori sel sebagai dasar ilmu biologi.
- b. Menjelaskan struktur sel dan fungsi masing-masing organel.
- c. Menganalisis fungsi sel dalam berbagai proses kehidupan seperti metabolisme dan reproduksi.
- d. Membandingkan karakteristik sel prokariotik dan eukariotik.
- e. Menjelaskan hubungan antara struktur dan fungsi sel dalam menjaga kehidupan organisme.

## **B. Pengertian dan Teori Sel**

Sel merupakan unit struktural, fungsional, dan hereditas terkecil dari makhluk hidup yang menjadi dasar seluruh sistem kehidupan. Semua organisme, baik uniseluler maupun multiseluler, tersusun atas sel yang menjalankan fungsi-fungsi vital seperti metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi. Dalam perspektif biologi modern, sel dipandang sebagai sistem kompleks yang terorganisasi secara dinamis, di mana berbagai komponen molekuler bekerja secara terkoordinasi untuk mempertahankan kehidupan (Wan, 2024). Dengan demikian, sel tidak hanya berfungsi sebagai unit struktural, tetapi juga sebagai pusat aktivitas biokimia yang mendukung keberlangsungan hidup organisme.

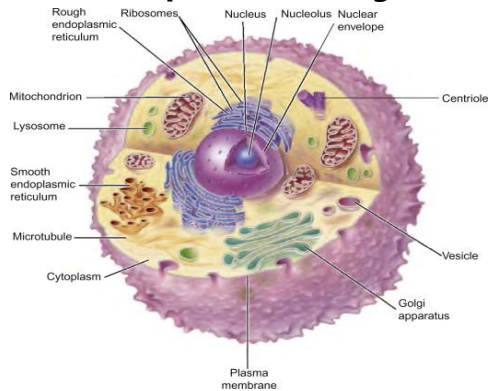
Konsep sel berkembang seiring kemajuan teknologi, khususnya dalam bidang mikroskopi dan biologi molekuler. Teori sel pertama kali dirumuskan pada abad ke-19 dan menjadi dasar bagi perkembangan biologi modern. Teori ini menyatakan bahwa semua makhluk hidup tersusun atas satu atau lebih sel, sel merupakan unit dasar kehidupan, dan semua sel berasal dari sel yang telah ada sebelumnya. Prinsip ini kemudian diperkuat dan diperluas melalui penelitian modern yang mengaitkan teori sel dengan proses-proses patologis dan mekanisme penyakit pada tingkat seluler (Buja, 2021). Hal ini menunjukkan

bahwa teori sel tidak hanya relevan dalam biologi dasar, tetapi juga dalam bidang kedokteran dan biomedis.

Dalam perkembangan selanjutnya, teori sel mengalami penyempurnaan menjadi teori sel modern. Teori ini menambahkan bahwa sel mengandung materi genetik berupa DNA yang diwariskan selama proses pembelahan sel, serta seluruh reaksi metabolisme berlangsung di dalam sel. Selain itu, sel memiliki kesamaan komposisi kimia dan mekanisme dasar dalam penggunaan energi, yang menunjukkan kesatuan prinsip kehidupan pada semua organisme (Hasanah, Syarif & Fadillah, 2025). Pendekatan ini diperkuat oleh perkembangan biologi molekuler yang menempatkan sel sebagai pusat regulasi genetik dan ekspresi protein.

Lebih lanjut, kajian terbaru dalam biologi sel menunjukkan bahwa sel merupakan sistem yang sangat kompleks dan adaptif, dengan interaksi yang luas antara struktur subseluler dan jaringan metabolik. Penelitian modern menekankan bahwa sel tidak hanya bersifat statis, tetapi mampu merespons perubahan lingkungan melalui mekanisme regulasi yang canggih, termasuk komunikasi antar sel dan adaptasi terhadap stres biologis (Wan, 2024). Hal ini memperluas pemahaman bahwa sel merupakan unit kehidupan yang dinamis dan terintegrasi.

### C. Struktur Sel: Komponen dan Organela



Gambar 2. 1. Struktur Sel (OpenStax, 2022)

Sel merupakan sistem biologis yang kompleks yang tersusun atas berbagai komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk mempertahankan kehidupan. Secara umum, struktur sel terdiri atas tiga bagian utama, yaitu membran sel, sitoplasma, dan inti sel (nukleus). Membran sel berfungsi sebagai batas selektif yang mengatur pertukaran zat antara lingkungan internal dan eksternal sel. Struktur membran yang tersusun atas bilayer fosfolipid dengan protein integral dan perifer memungkinkan terjadinya transport aktif maupun pasif, serta berperan dalam komunikasi seluler (Lodish et al., 2021). Peran membran ini sangat penting dalam menjaga homeostasis sel dan memungkinkan sel merespons perubahan lingkungan secara dinamis.

Sitoplasma merupakan matriks cair yang mengisi ruang di dalam sel dan menjadi tempat berlangsungnya berbagai reaksi metabolisme. Di dalam sitoplasma terdapat organela sel yang memiliki fungsi spesifik. Salah satu organel penting adalah mitokondria yang berfungsi sebagai pusat produksi energi melalui proses respirasi seluler. Struktur mitokondria yang memiliki membran ganda dan lipatan krista meningkatkan efisiensi produksi ATP sebagai sumber energi utama sel (Spinelli & Haigis, 2018; Vyas et al., 2020). Selain itu, ribosom berperan dalam sintesis protein dengan menerjemahkan informasi genetik dari RNA, sedangkan retikulum endoplasma (RE) berfungsi dalam sintesis dan transport protein serta lipid, tergantung pada jenisnya, yaitu RE kasar dan RE halus.

Badan Golgi merupakan organel yang berperan dalam modifikasi, pengemasan, dan distribusi protein ke berbagai bagian sel atau ke luar sel. Organel ini bekerja secara sinergis dengan retikulum endoplasma dalam jalur sekresi protein. Selain itu, lisosom memiliki fungsi dalam pencernaan intraseluler dengan mengandung enzim hidrolitik yang mampu menguraikan molekul kompleks. Pada sel tumbuhan, terdapat organel tambahan seperti kloroplas yang berfungsi dalam fotosintesis dan

vakuola yang berperan dalam penyimpanan serta menjaga tekanan turgor sel (Taiz et al., 2022).

Inti sel (nukleus) merupakan pusat pengendali aktivitas sel yang mengandung materi genetik berupa DNA. Nukleus dikelilingi oleh membran inti yang berfungsi melindungi DNA dan mengatur lalu lintas molekul antara inti dan sitoplasma. Di dalam nukleus terdapat nukleolus yang berperan dalam sintesis ribosom. Perkembangan terbaru dalam biologi sel menunjukkan bahwa organisasi nukleus sangat dinamis dan berperan penting dalam regulasi ekspresi gen serta diferensiasi sel (Misteli, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa struktur inti tidak hanya bersifat statis, tetapi juga berperan aktif dalam mengatur fungsi seluler.

Secara keseluruhan, struktur sel menunjukkan adanya hubungan erat antara bentuk dan fungsi. Setiap organel memiliki struktur khusus yang mendukung perannya masing-masing dalam menjaga keberlangsungan hidup sel. Interaksi antar organel memungkinkan sel menjalankan fungsi biologis secara efisien dan terkoordinasi. Gangguan pada salah satu komponen sel dapat menyebabkan disfungsi yang berdampak pada kesehatan organisme, sehingga pemahaman mengenai struktur sel menjadi sangat penting dalam bidang biologi, kedokteran, dan bioteknologi (Alberts et al., 2022).

#### **D. Fungsi Sel dalam Proses Kehidupan**

Sel merupakan unit dasar kehidupan yang tidak hanya berperan sebagai penyusun struktur organisme, tetapi juga sebagai pusat berbagai aktivitas biologis yang kompleks. Fungsi utama sel mencakup proses metabolisme, pertumbuhan, respons terhadap rangsangan, komunikasi seluler, serta reproduksi. Semua fungsi ini berlangsung secara terintegrasi melalui koordinasi berbagai komponen seluler, sehingga memungkinkan organisme untuk mempertahankan kelangsungan hidupnya (Alberts et al., 2022).

Salah satu fungsi utama sel adalah metabolisme, yaitu keseluruhan reaksi kimia yang terjadi di dalam sel, yang meliputi proses anabolisme dan katabolisme. Anabolisme merupakan proses pembentukan molekul kompleks dari molekul sederhana yang membutuhkan energi, sedangkan katabolisme adalah proses pemecahan molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana dengan menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan dalam proses ini umumnya berupa adenosin trifosfat (ATP) yang digunakan untuk berbagai aktivitas seluler (Berg et al., 2019). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa regulasi metabolisme sel sangat dinamis dan berperan penting dalam adaptasi sel terhadap

perubahan lingkungan, termasuk kondisi stres dan kekurangan nutrisi (Pavlova & Thompson, 2021).

Selain metabolisme, sel juga memiliki kemampuan untuk tumbuh dan berkembang. Pertumbuhan sel terjadi melalui peningkatan ukuran dan jumlah komponen seluler, sedangkan perkembangan melibatkan diferensiasi sel menjadi tipe sel yang memiliki fungsi khusus. Proses diferensiasi ini diatur oleh ekspresi gen yang spesifik, yang memungkinkan sel menjalankan fungsi tertentu dalam organisme multiseluler, seperti sel saraf yang berfungsi dalam penghantaran impuls atau sel otot yang berperan dalam kontraksi (Trapnell, 2020). Kemampuan ini menunjukkan bahwa sel tidak hanya bersifat statis, tetapi juga memiliki fleksibilitas dalam menyesuaikan fungsi sesuai kebutuhan organisme.

Fungsi penting lainnya adalah respons terhadap rangsangan dan komunikasi antar sel. Sel mampu mendeteksi perubahan lingkungan melalui reseptor yang terdapat pada membran sel, kemudian merespons melalui jalur transduksi sinyal yang kompleks. Komunikasi seluler ini sangat penting dalam mengatur berbagai proses fisiologis, termasuk pertumbuhan, sistem imun, dan koordinasi antar jaringan (Lodish et al., 2021). Studi terkini menunjukkan bahwa gangguan pada sistem komunikasi sel dapat menyebabkan berbagai

penyakit, seperti kanker dan gangguan imun (Hanahan, 2022).

Sel juga memiliki kemampuan untuk bereproduksi melalui proses pembelahan sel, yaitu mitosis dan meiosis. Mitosis menghasilkan dua sel anak yang identik secara genetik, yang berperan dalam pertumbuhan dan perbaikan jaringan. Sementara itu, meiosis menghasilkan sel gamet dengan setengah jumlah kromosom, yang penting dalam reproduksi seksual dan menjaga keberagaman genetik (Morgan, 2020). Proses ini dikontrol secara ketat oleh siklus sel untuk memastikan bahwa pembelahan berlangsung secara akurat.

Secara keseluruhan, fungsi sel dalam proses kehidupan menunjukkan bahwa sel merupakan sistem yang sangat kompleks dan terorganisasi. Setiap fungsi yang dijalankan sel saling berkaitan dan berkontribusi terhadap keberlangsungan hidup organisme. Oleh karena itu, pemahaman tentang fungsi sel menjadi dasar penting dalam berbagai bidang ilmu, termasuk biologi, kedokteran, dan bioteknologi.

## **E. Perbedaan Sel Prokariotik dan Eukariotik**

Sel merupakan unit dasar kehidupan yang secara umum dibedakan menjadi dua tipe utama, yaitu sel prokariotik dan sel eukariotik. Perbedaan keduanya

terletak pada kompleksitas struktur, keberadaan organel bermembran, serta organisasi materi genetik. Sel prokariotik merupakan tipe sel yang lebih sederhana dan tidak memiliki inti sejati, sedangkan sel eukariotik memiliki struktur yang lebih kompleks dengan inti sel yang jelas dan organel bermembran (Alberts et al., 2022).

Sel prokariotik umumnya ditemukan pada organisme seperti bakteri dan archaea. Ciri utama sel ini adalah tidak adanya membran inti, sehingga materi genetik berupa DNA berada langsung di dalam sitoplasma pada daerah yang disebut nukleoid. Selain itu, sel prokariotik tidak memiliki organel bermembran seperti mitokondria atau retikulum endoplasma. Struktur selnya relatif sederhana, namun tetap mampu menjalankan fungsi kehidupan seperti metabolisme dan reproduksi melalui pembelahan biner (Madigan et al., 2021).

Sebaliknya, sel eukariotik ditemukan pada organisme seperti hewan, tumbuhan, jamur, dan protista. Sel ini memiliki inti sejati yang dibatasi oleh membran inti, sehingga materi genetik tersimpan secara lebih terorganisasi. Selain itu, sel eukariotik memiliki berbagai organel bermembran, seperti mitokondria, badan Golgi, retikulum endoplasma, dan pada tumbuhan terdapat kloroplas. Keberadaan organel ini memungkinkan terjadinya pembagian

fungsi yang lebih kompleks dan efisien dalam sel (Lodish et al., 2021).

Perbedaan lain yang mencolok adalah ukuran dan tingkat kompleksitas. Sel prokariotik umumnya berukuran lebih kecil (sekitar 0,5–5  $\mu\text{m}$ ), sedangkan sel eukariotik lebih besar (sekitar 10–100  $\mu\text{m}$ ). Selain itu, proses reproduksi juga berbeda, di mana sel prokariotik bereproduksi secara aseksual melalui pembelahan biner, sedangkan sel eukariotik dapat mengalami mitosis dan meiosis. Perbedaan ini mencerminkan tingkat evolusi dan adaptasi masing-masing tipe sel terhadap lingkungan (Koonin, 2020).

Secara keseluruhan, perbedaan antara sel prokariotik dan eukariotik menunjukkan adanya variasi tingkat organisasi kehidupan. Sel prokariotik merepresentasikan bentuk kehidupan yang lebih sederhana namun efisien, sedangkan sel eukariotik menunjukkan kompleksitas yang lebih tinggi dengan pembagian kerja antar organel. Pemahaman mengenai perbedaan ini sangat penting dalam bidang biologi, khususnya dalam kajian evolusi, mikrobiologi, dan bioteknologi.

## **F. Latihan Soal**

1. Sel merupakan unit terkecil kehidupan yang mampu menjalankan fungsi kehidupan. Pernyataan ini sesuai dengan konsep:
  - A. Teori evolusi
  - B. Teori sel
  - C. Teori atom
  - D. Teori genetika
  - E. Teori metabolisme
2. Organel yang berfungsi sebagai pusat pengendali aktivitas sel adalah:
  - A. Mitokondria
  - B. Ribosom
  - C. Nukleus
  - D. Lisosom
  - E. Retikulum endoplasma
3. Fungsi utama mitokondria dalam sel adalah:
  - A. Sintesis protein
  - B. Penyimpanan air
  - C. Produksi energi (ATP)
  - D. Pencernaan intraseluler
  - E. Transport zat
4. Struktur sel yang berperan dalam sintesis protein adalah:
  - A. Badan Golgi
  - B. Ribosom
  - C. Lisosom

- D. Vakuola
  - E. Sentriol
5. Perbedaan utama antara sel prokariotik dan eukariotik adalah:
- A. Ukuran sel
  - B. Bentuk sel
  - C. Keberadaan membran sel
  - D. Keberadaan inti sejati
  - E. Jumlah ribosom
6. Organel yang berfungsi dalam modifikasi dan pengemasan protein adalah:
- A. Retikulum endoplasma kasar
  - B. Badan Golgi
  - C. Nukleolus
  - D. Mitokondria
  - E. Peroxisom
7. Sel prokariotik memiliki ciri khas yaitu:
- A. Memiliki inti sejati
  - B. Memiliki organel bermembran
  - C. Tidak memiliki membran sel
  - D. Materi genetik tidak dibatasi membran inti
  - E. Ukuran lebih besar dari sel eukariotik
8. Proses difusi dan osmosis merupakan bagian dari fungsi sel dalam hal:
- A. Reproduksi
  - B. Metabolisme
  - C. Transportasi zat

- D. Ekskresi
  - E. Sintesis protein
9. Organel yang banyak ditemukan pada sel tumbuhan dan berfungsi dalam fotosintesis adalah:
- A. Mitokondria
  - B. Kloroplas
  - C. Lisosom
  - D. Ribosom
  - E. Sentriol
10. Hubungan antara struktur dan fungsi sel menunjukkan bahwa:
- A. Semua sel memiliki fungsi yang sama
  - B. Struktur tidak memengaruhi fungsi
  - C. Fungsi sel bergantung pada bentuk dan organelnya
  - D. Sel hanya berfungsi untuk reproduksi
  - E. Organel tidak memiliki peran khusus

## **BAB 3. BIOMOLEKUL DAN METABOLISME SEL**

---

### **A. Pendahuluan**

1. Tujuan Pembelajaran  
Mahasiswa mampu menjelaskan biomolekul dan metabolisme sel
2. Capaian Pembelajaran  
Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:
  - a. Menguraikan karbohidrat, lipid, protein dan asam nukleat dalam proses metabolisme
  - b. Menjelaskan karbohidrat, lipid, protein dan asam nukleat dalam proses metabolisme

Kehidupan, dengan segala keindahan dan kompleksitasnya, adalah konsekuensi dari sinergi yang kuat antara beberapa hal luar biasa yang dikenal sebagai biomolekul. Komponen-komponen fundamental ini berfungsi sebagai blok bangunan bagi beragam makhluk hidup yang menakjubkan. Molekul-molekul ini—karbohidrat, lipid, protein, dan asam nukleat—membentuk dasar biologi dan berfungsi sebagai blok bangunan untuk semua operasi kehidupan. Selain sebagai zat kimia, biomolekul juga

berfungsi sebagai pembangun mesin seluler, pembawa informasi genetik, penghasil energi, dan pengatur integritas struktural. Biomolekul, juga dikenal sebagai molekul biologis, adalah istilah umum untuk molekul yang ditemukan dalam organisme yang dibutuhkan untuk satu atau lebih proses biologis tipikal, seperti pembelahan sel, morfogenesis, atau perkembangan. Makromolekul besar (atau poliamin) seperti protein, karbohidrat, lipid, dan asam nukleat adalah contoh biomolekul, begitu pula molekul kecil seperti metabolit primer, metabolit sekunder, dan produk alami. Bahan biologis adalah istilah yang lebih umum untuk jenis bahan ini. Biomolekul merupakan komponen penting dari organisme hidup; biomolekul ini seringkali bersifat endogen, artinya diproduksi di dalam organisme (Shah, 2023).

Biomolekul, yang sering disebut sebagai molekul biologis atau makromolekul, adalah konstituen fundamental dari semua organisme hidup. Struktur kecil dan rumit ini memainkan peran penting dalam proses kehidupan, mulai dari penyimpanan dan transfer energi hingga pengkodean informasi genetik. Struktur dan fungsi biomolekul sangat penting dalam bidang seperti biokimia, di mana para peneliti menyelidiki

mekanisme rumit yang mendasari proses kehidupan (Parks, 2022).

Biomolekul sangat penting untuk kehidupan. Molekul-molekul ini terlibat dalam struktur, fungsi, dan pengaturan semua organisme hidup. Dari bakteri terkecil hingga hewan terbesar, biomolekul memainkan peran penting dalam menjaga integritas dan fungsionalitas semua sistem biologis (Tripto, 2023).

Metabolisme sel adalah proses dinamis yang mengubah metabolit yang tersedia dari lingkungan menjadi biomassa dan produk lainnya. Metabolisme sel pada umumnya melibatkan ribuan reaksi biokimia dan metabolit (Fuxian, 2023).

## **B. Karbohidrat dalam Proses Metabolisme**

Metabolisme karbohidrat mengacu pada proses biokimia di mana sel memperoleh energi dari karbohidrat dan menghasilkan zat perantara yang dibutuhkan untuk biosintesis. Glukosa adalah karbohidrat utama yang digunakan oleh sebagian besar organisme, berfungsi sebagai sumber energi penting untuk jaringan seperti otak, sel darah merah, dan otot rangka. Jalur metabolisme untuk pemanfaatan karbohidrat sangat diatur untuk memastikan ketersediaan energi, mempertahankan

kadar glukosa darah, dan memenuhi kebutuhan spesifik jaringan. Glikolisis, pemecahan glukosa di sitoplasma menjadi piruvat, merupakan jalur utama untuk pembentukan ATP. Proses ini terdiri dari sepuluh langkah yang dikatalisis secara enzimatik, menghasilkan dua molekul ATP dan dua molekul NADH per molekul glukosa dalam kondisi aerobik. Dalam kondisi anaerobik, piruvat diubah menjadi laktat, meregenerasi  $\text{NAD}^+$  untuk mempertahankan aliran glikolisis. Piruvat yang dihasilkan oleh glikolisis memasuki mitokondria untuk diubah menjadi asetil-CoA, yang masuk ke siklus Krebs, yang pada akhirnya mengarah pada fosforilasi oksidatif dan produksi ATP tambahan. Glukoneogenesis adalah sintesis glukosa dari prekursor non-karbohidrat seperti laktat, gliserol, dan asam amino. Jalur ini terutama terjadi di hati dan ginjal dan sangat penting untuk menjaga kadar glukosa darah selama puasa atau olahraga intensif. Glukoneogenesis berbagi beberapa enzim dengan glikolisis tetapi juga menggunakan enzim unik untuk melewati langkah-langkah yang tidak dapat dibalik, memastikan aliran metabolit searah. Metabolisme glikogen menyediakan penyimpanan jangka pendek dan cepat mobilisasi glukosa. Glikogenesis adalah proses sintesis glikogen, sedangkan glikogenolisis melibatkan pemecahannya untuk melepaskan glukosa-1-fosfat untuk produksi energi atau

pemeliharaan glukosa darah. Pengaturan metabolisme glikogen dikendalikan oleh hormon seperti insulin, yang merangsang sintesis glikogen, dan glukagon serta epinefrin, yang mendorong pemecahan glikogen. Jalur pentosa fosfat (PPP) memiliki dua tujuan: menghasilkan NADPH untuk reaksi biosintesis reduktif dan menghasilkan ribosa-5-fosfat untuk sintesis nukleotida. PPP beroperasi di sitoplasma dan terintegrasi dengan glikolisis, memungkinkan sel untuk menyeimbangkan produksi energi dengan kebutuhan anabolik. Pengaturan enzimatik dan kontrol hormonal sangat penting untuk menjaga homeostasis metabolisme karbohidrat. Enzim-enzim kunci seperti heksokinase, fosfofruktokinase, piruvat kinase, glukosa-6-fosfatase, dan glikogen sintase diatur secara ketat oleh efektor alosterik, modifikasi kovalen, dan mekanisme transkripsi. Hormon mengkoordinasikan kadar glukosa sistemik, memungkinkan organ untuk beradaptasi dengan kebutuhan energi selama makan, puasa, dan stres. Metabolisme karbohidrat sangat penting untuk fungsi fisiologis seperti pasokan energi, termogenesis, dan keseimbangan redoks. Disregulasi jalur ini dikaitkan dengan gangguan metabolisme termasuk diabetes melitus, hipoglikemia, obesitas, dan kelainan metabolisme bawaan. Kemajuan dalam biologi molekuler,

metabolomik, dan penelitian klinis telah memungkinkan karakterisasi yang tepat dari metabolisme karbohidrat, memberikan wawasan untuk strategi terapeutik, intervensi nutrisi, dan manajemen penyakit metabolik (El-Masry, 2023).

### **C. Lipid dalam Proses Metabolisma**

Lipid, yang umumnya dikenal sebagai lemak, memainkan peran penting dalam simfoni rumit proses biokimia yang mengatur fisiologi manusia. Meskipun sering disalahpahami karena hubungannya dengan penambahan berat badan, lipid sangat diperlukan untuk menjaga kesehatan optimal. Lipid mencakup beragam kelompok molekul, termasuk trigliserida, fosfolipid, dan steroid. Trigliserida, jenis lipid yang paling melimpah, berfungsi sebagai molekul penyimpanan energi utama tubuh. Terdiri dari gliserol dan tiga asam lemak, trigliserida disimpan di jaringan adiposa dan dilepaskan selama periode kebutuhan energi. Fosfolipid, komponen penting dari membran sel, memiliki struktur unik dengan kepala hidrofilik dan ekor hidrofobik. Sifat amfipatik ini memungkinkan fosfolipid untuk membentuk lapisan ganda lipid yang membentuk membran sel, memberikan penghalang yang memisahkan lingkungan internal dan eksternal sel. Steroid, kelas lipid lainnya, termasuk hormon seperti

kolesterol, estrogen, dan testosteron. Kolesterol, yang sering dikaitkan karena hubungannya dengan penyakit kardiovaskular, berfungsi sebagai prekursor untuk sintesis hormon vital dan asam empedu, menekankan peran pentingnya dalam proses fisiologis (Eliza, 2023).

Metabolisme lipid sangat penting untuk berbagai fungsi vital, termasuk penyimpanan energi, regulasi hormon, neurotransmisi, dan pengangkutan nutrisi yang larut dalam lemak. Lipid berfungsi sebagai sumber energi yang sangat efisien, menyediakan 9 kkal per gram—jauh lebih banyak daripada protein dan karbohidrat. Tubuh dapat menyimpan hingga 100.000 kkal energi sebagai lipid, memungkinkan kelangsungan hidup tanpa makanan selama 30–40 hari dengan asupan air yang cukup. Lipid biokimia ini sebagian besar disimpan dalam sel, terutama di jaringan adiposa, sejenis jaringan ikat. Lipid melindungi organ vital seperti limpa, hati, jantung, dan ginjal dengan melindungi organ-organ tersebut dari kerusakan. Lipid dalam darah diserap oleh sel-sel hati, yang mendistribusikannya ke berbagai bagian tubuh dalam jumlah yang sesuai. Hati memainkan peran sentral dalam metabolisme lipid, bertindak sebagai reservoir penyimpanan sekunder untuk kelebihan lemak. Ketika asupan energi melebihi pengeluaran, kelebihan tersebut disimpan sebagai

trigliserida di jaringan adiposa dan hepatosit. Siklus metabolisme juga melibatkan siklus asam sitrat, siklus urea, dan siklus Krebs. Metabolisme lipid memainkan peran penting dalam berbagai proses seluler yang penting untuk menjaga homeostasis, seperti sintesis membran dan penyimpanan energi dalam bentuk trigliserida (TG). Asam lemak (FA) adalah lipid vital yang membentuk elemen struktural utama lipid membran, termasuk gliserofosfolipid (GPL) dan sfingolipid. Selain itu, asam lemak berfungsi sebagai sumber energi utama melalui proses seperti beta-oksidasi yang dimediasi mitokondria dan siklus asam trikarboksilat (TCA), juga dikenal sebagai siklus asam sitrat (Sethi, dkk., 2025).

#### **D. Protein dalam Proses Metabolisme**

Metabolisme protein adalah proses biokimia penting yang mencakup pencernaan, penyerapan, sintesis, dan pemecahan protein di dalam tubuh. Protein adalah makromolekul penting yang terdiri dari asam amino, yang berfungsi sebagai bahan pembangun jaringan, enzim, hormon, dan berbagai komponen seluler. Metabolisme protein memastikan bahwa tubuh menjaga keseimbangan nitrogen, mendukung perbaikan jaringan, menghasilkan senyawa vital, dan menyediakan energi bila diperlukan. Pengaturan metabolisme protein yang

tepat sangat penting untuk pertumbuhan, fungsi kekebalan tubuh, dan homeostasis fisiologis secara keseluruhan. Proses ini dimulai dengan konsumsi protein makanan, yang terutama berasal dari sumber hewani dan nabati, termasuk daging, susu, kacang-kacangan, dan biji-bijian. Setelah dikonsumsi, protein dipecah di lambung oleh aksi asam klorida dan enzim pepsin, yang mendenaturasi dan menghidrolisis protein menjadi rantai peptida yang lebih kecil. Peptida ini selanjutnya dicerna di usus kecil oleh enzim seperti tripsin, kimotripsin, dan peptidase, menghasilkan asam amino bebas dan peptida kecil yang diserap ke dalam aliran darah melalui lapisan usus. Setelah diserap, asam amino masuk ke hati melalui vena porta, di mana asam amino tersebut digunakan untuk sintesis protein segera, diubah menjadi molekul aktif biologis lainnya, atau dideaminasi untuk produksi energi. Sintesis protein melibatkan perakitan asam amino menjadi protein baru yang dibutuhkan untuk perbaikan otot, aktivitas enzim, respons imun, dan berbagai komponen seluler struktural

dan fungsional. Proses anabolik ini diatur oleh hormon seperti insulin dan hormon pertumbuhan, yang merangsang penyerapan dan penggabungan asam amino ke dalam jaringan tubuh, terutama

setelah makan atau selama periode pertumbuhan dan pemulihan (Krieger, 2025).

## **E. Asam Nukleat dalam Proses Metabolisme**

Sebagai komponen setiap sel, asam nukleat diperlukan untuk semua bentuk kehidupan. Asam deoksiribonukleat (DNA) dan asam ribonukleat (RNA), dua bentuk asam nukleat yang terjadi secara alami, adalah dua jenisnya. Biopolimer, yang terjadi secara alami, berulang kali menyusun monomer (membentuk polimer) yang kemudian membentuk nukleotida, yang kemudian membentuk asam nukleat, adalah blok penyusun asam nukleat. Memahami struktur nukleotida yang membentuk asam nukleat sangat penting untuk memahami struktur asam nukleat. Proses transfer fosforil mendominasi dalam metabolisme asam nukleat. Ini termasuk proses kimia yang digunakan oleh polimerase DNA dan RNA untuk mengkatalisis produksi DNA dan RNA. Dalam proses ini, sebuah molekul pirofosfat dihasilkan ketika gugus hidroksil di ujung 3' untai RNA atau DNA menyerang -fosfat dari (deoksi)ribonukleotida trifosfat NTP yang masuk untuk menghasilkan ikatan fosfodiester baru. Dalam pemutusan DNA dan RNA, transfer fosforil serupa terjadi, dengan pengecualian bahwa tulang punggung asam nukleat yang diserang, dan

nukleofilnya adalah molekul air atau gula hidroksil. Fosfat 5' dan hidroksil 3' adalah produk pemutusan ketika molekul air adalah nukleofilnya. Produk akhir 5' terhubung secara kovalen ke ribonukleotida ketika gugus hidroksil 2' atau 3' dari ribonukleotida adalah nukleofil, seperti pada penyambungan RNA, yang dikatalisis oleh ribozim penyambung diri kelompok I dan kelompok II. Transposisi DNA atau ligasi ekson, yang keduanya penting dalam penyambungan RNA, dapat terjadi jika nukleofil adalah gugus hidroksil 3' terminal dari untai DNA atau RNA (Francis, 2023).

#### **F. Latihan Soal**

1. Kompleksitas kehidupan dari sinergi yang kuat antara beberapa hal luar biasa, disebut dengan
  - A. Biomolekul
  - B. Makromolekul
  - C. Molekul
  - D. Komponen
  - E. Blok
2. Molekul yang ditemukan dalam organisme yang dibutuhkan untuk satu atau lebih proses biologis tipikal, seperti pembelahan sel, morfogenesis, atau perkembangan disebut
  - A. Biomolekul
  - B. Makromolekul
  - C. Molekul

- D. Komponen
  - E. Blok
3. Yang merupakan contoh dari makromolekul besar, kecuali
    - A. Protein
    - B. Karbohidrat
    - C. Lipid
    - D. Asam Nukleat
    - E. Metabolit Primer
  4. Pada proses glikolisis, terjadi proses pemecahan glukosa menjadi piruvat yang berlangsung pada
    - A. Mitokondria
    - B. Sitoplasma
    - C. Inti sel
    - D. Ribosom
    - E. Retikulum Endoplasma
  5. Sintesis glukosa dari prekursor non-karbohidrat seperti laktat, gliserol dan asam amino disebut
    - A. Glukolisis
    - B. Asam Piruvat
    - C. Glukoneogenesis
    - D. Genesis
    - E. Asam laktat
  6. Proses pemecahan untuk melepaskan glukosa 1-fosfat untuk produksi energi atau pemeliharaan glukosa darah disebut
    - A. Glikogenesis

- B. Glikogenolisis
  - C. Glikogen
  - D. Glukagon
  - E. Glukosa
7. Lipogenesis umumnya terjadi di...
- A. Ginjal
  - B. Usus halus
  - C. Paru-paru
  - D. Hati dan jaringan adiposa
  - E. Usus Besar
8. Dalam metabolisme, protein dapat dipecah menjadi asam amino. Asam amino ini kemudian dapat digunakan untuk...
- A. Membentuk glukosa melalui glikolisis
  - B. Membentuk energi melalui siklus Krebs
  - C. Disimpan sebagai lemak tanpa proses lanjutan
  - D. Langsung digunakan sebagai enzim
  - E. Deaminasi untuk proses energi
9. Peran utama RNA dalam proses metabolisme sel adalah...
- A. Menyimpan informasi genetik jangka Panjang
  - B. Mengkatalisis reaksi metabolisme
  - C. Membawa informasi genetik dari DNA untuk sintesis protein
  - D. Menghasilkan energi dalam bentuk ATP
  - E. Mentransmisikan kode genetic

10. Molekul berikut yang termasuk turunan asam nukleat dan berperan langsung dalam metabolisme energi adalah...
- A. Glukosa
  - B. ATP
  - C. Asam lemak
  - D. Enzim
  - E. Protein

## **BAB 4. ENZIM DAN REGULASI BIOKIMIA**

---

### **A. Pendahuluan**

#### **1. Tujuan Pembelajaran**

Mahasiswa mampu menjelaskan tentang enzim dan regulasi Biokimia

#### **2. Capaian Pembelajaran**

Pada akhir pembelajaran pada topik ini, Mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Menjelaskan pengertian enzim
- b. Menjelaskan struktur enzim
- c. Menjelaskan mekanisme reaksi enzim
- d. Menjelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim
- e. Menjelaskan regulasi biokimia

#### **3. Pengantar**

Buku ini disusun sebagai upaya untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai konsep dasar dalam ilmu biomedik. Salah satu topik yang memiliki peran penting dalam berbagai proses kehidupan adalah enzim dan regulasi biokimia. Topik dalam bab ini akan membahas tentang pengertian enzim, struktur enzim, mekanisme reaksi enzim, faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim, dan regulasi biokimia.

Enzim sangat penting bagi kehidupan makhluk hidup. Enzim terdapat pada manusia, hewan, tumbuhan dan mikroorganisme. Hampir semua reaksi dalam makhluk hidup merupakan hasil dari aktivitas enzimatik. Enzim merupakan protein yang memiliki sifat sebagai biokatalisator yang memiliki kemampuan sebagai katalis dalam reaksi biologis secara spesifik. Sebagai contoh Adalah enzim amilase dalam saliva manusia yang memecah pati menjadi maltosa. Ketidakhadiran enzim amilase akan menyebabkan proses pencernaan karbohidrat berjalan sangat lambat dan tidak efisien. Beberapa jenis enzim juga membutuhkan kofaktor untuk mengaktifkan reaksi enzimatik (Whitaker, 2003).

Sebagian besar enzim bersifat sangat spesifik terhadap substratnya. Spesifisitas ini memungkinkan enzim hanya mengkatalisis reaksi tertentu, yang penting dalam menjaga keteraturan metabolisme sel (Voet et al., 2016). Selain itu, terdapat juga enzim yang memerlukan kofaktor atau koenzim, seperti ion logam atau molekul organik kecil, untuk dapat berfungsi secara optimal (Murray et al., 2018).

## **B. Struktur, Mekanisme Kerja Enzim dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kerja Enzim**

### **1. Struktur Enzim**

Struktur enzim merupakan aspek yang sangat penting karena secara langsung dapat menentukan fungsi, spesifisitas, serta aktivitas katalitik enzim. Enzim pada umumnya adalah protein globular yang memiliki bentuk tiga dimensi kompleks. Hubungan antara struktur dan fungsi enzim bersifat sangat erat, sehingga perubahan kecil pada struktur dapat menyebabkan perubahan atau bahkan hilangnya aktivitas enzim (Nelson & Cox, 2021). Struktur enzim terbagi atas, struktur primer, sekunder, tersier, dan kuartener, serta dilengkapi dengan komponen penting seperti situs aktif, kofaktor dan gugus prostetik .

#### **a. Struktur Primer**

Struktur primer adalah urutan linear asam amino dalam rantai polipeptida yang dihubungkan oleh ikatan peptida. Urutan ini ditentukan oleh kode genetik dalam DNA dan bersifat sangat spesifik untuk setiap enzim (Alberts et al., 2022).

Ikatan peptida terbentuk melalui reaksi kondensasi antara gugus karboksil dari satu asam amino dan gugus amino dari asam

amino lainnya. Meskipun terlihat sederhana, struktur primer sangat penting karena menentukan bagaimana protein akan terbentuk menjadi struktur yang lebih kompleks. Perubahan satu asam amino saja (mutasi) dapat menyebabkan perubahan besar pada fungsi enzim. Contohnya, pada penyakit tertentu, substitusi pada satu asam amino dapat menyebabkan enzim kehilangan aktivitasnya.

b. Struktur Sekunder

Struktur sekunder merupakan pengaturan lokal dari rantai polipeptida yang distabilkan oleh ikatan hidrogen antara atom oksigen karbonil dan atom hidrogen amida pada tulang punggung protein (Berg et al., 2019).

Bentuk utama struktur sekunder adalah:

- Alfa-heliks( $\alpha$ -helix)

Struktur spiral yang distabilkan oleh ikatan hidrogen intramolekuler. Gugus samping asam amino mengarah ke luar, sehingga memungkinkan interaksi dengan lingkungan.

- Beta-sheet( $\beta$ -sheet)

Struktur lembaran yang dapat tersusun paralel atau antiparalel. Stabilitasnya juga

berasal dari ikatan hidrogen antar rantai polipeptida.

Struktur sekunder memberikan stabilitas awal dan menjadi dasar pembentukan struktur tiga dimensi enzim.

c. Struktur Tersier

Struktur tersier adalah bentuk tiga dimensi keseluruhan dari satu rantai polipeptida. Struktur ini terbentuk akibat interaksi antar gugus samping (R-group) dari asam amino (Voet et al., 2016).

Jenis interaksi yang berperan antara lain:

- Ikatan hidrogen
- Ikatan ionik (interaksi elektrostatik)
- Interaksi hidrofobik
- Ikatan disulfida (antara residu sistein)

Struktur tersier membentuk lipatan kompleks yang menciptakan situs aktif dan menentukan fungsi enzim. Pada tahap ini, enzim telah memiliki bentuk fungsional yang memungkinkan interaksi dengan substrat. Struktur tersier juga bersifat dinamis, artinya dapat mengalami perubahan konformasi selama proses katalisis, terutama dalam model induced fit.

#### d. Struktur Kuartener

Struktur kuartener terdapat pada enzim yang tersusun dari lebih dari satu rantai polipeptida (subunit). Interaksi antar subunit ini membentuk kompleks protein yang fungsional (Garrett & Grisham, 2017).

Setiap subunit dapat memiliki peran tertentu, misalnya:

- Subunit katalitik
- Subunit regulatori

Contoh enzim dengan struktur kuartener adalah hemoglobin (meskipun bukan enzim, sering dijadikan contoh protein multimerik). Pada enzim, struktur ini sering berperan dalam regulasi aktivitas, seperti pada enzim alosterik.

#### e. Situs Aktif

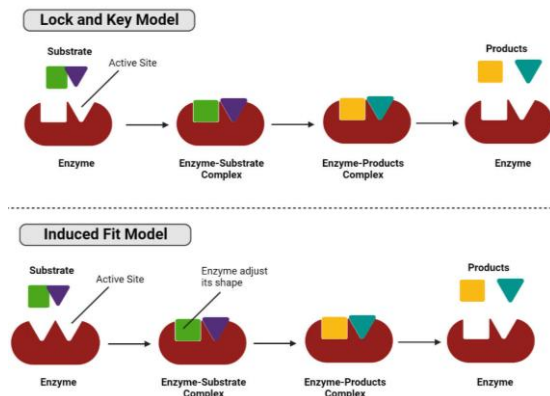
Situs aktif adalah bagian paling penting dari enzim, yaitu tempat substrat berikatan dan reaksi kimia berlangsung. Situs aktif biasanya berupa celah atau lekukan kecil pada permukaan enzim yang dibentuk oleh beberapa residu asam amino (Berg et al., 2019).

Karakteristik situs aktif:

- Bersifat sangat spesifik terhadap substrat
- Memiliki lingkungan kimia unik
- Mengandung residu katalitik

Interaksi antara enzim dan substrat dapat dijelaskan melalui dua model:

- Lock and key: substrat sesuai dengan bentuk situs aktif
- Induced fit: enzim berubah bentuk untuk menyesuaikan substrat



Gambar 4. 1. Induce fit & lock and key model

f. Kofaktor dan Gugus Prostetik

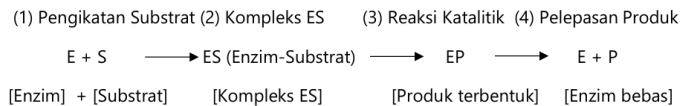
Beberapa enzim memerlukan komponen tambahan untuk berfungsi, yaitu:

- Kofaktor: ion logam seperti  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$
- Koenzim: molekul organik seperti  $NAD^+$ , FAD
- Gugus prostetik: kofaktor yang terikat kuat secara permanen

Apoenzim (bagian protein) yang bergabung dengan kofaktor membentuk holoenzim yang aktif (Murray et al., 2018).

## 2. Mekanisme Kerja Enzim

Enzim bekerja melalui mekanisme yang melibatkan pembentukan kompleks enzim-substrat (ES) (Voet et al., 2016). Proses ini dapat dijelaskan dalam beberapa tahap:



### 1. Pengikatan Substrat

Substrat berikatan dengan situs aktif enzim melalui interaksi non-kovalen seperti ikatan hidrogen dan gaya van der Waals (Berg et al., 2019).

### 2. Pembentukan Kompleks Enzim-Substrat

Kompleks ini bersifat sementara dan memungkinkan terjadinya perubahan konformasi enzim (Nelson & Cox, 2021).

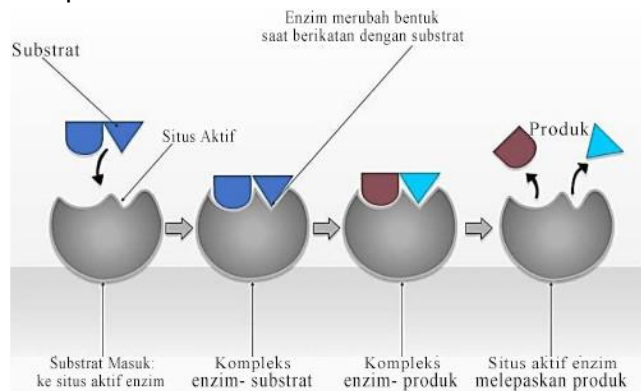
### 3. Transformasi Substrat menjadi Produk

Enzim menurunkan energi aktivasi dengan berbagai cara, seperti mendekatkan substrat, menstabilkan keadaan transisi, dan menciptakan lingkungan kimia yang sesuai (Garrett & Grisham, 2017).

### 4. Pelepasan Produk

Produk dilepaskan dari enzim, dan enzim kembali ke bentuk semula untuk mengkatalisis reaksi berikutnya (Voet et al., 2016).

Model kinetika enzim yang paling dikenal adalah persamaan Michaelis-Menten, yang menjelaskan hubungan antara konsentrasi substrat dan kecepatan reaksi enzimatik (Nelson & Cox, 2021).



Gambar 4. 2. Mekanisme Reaksi Enzim (Iqbal, A. & Ali, S., 2025)

### 3. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kerja Enzim

#### a. Konsentrasi Substrat

Peningkatan konsentrasi substrat akan meningkatkan laju reaksi hingga mencapai titik jenuh, di mana semua situs aktif enzim telah terisi (Voet et al., 2016).

#### b. Konsentrasi Enzim

Semakin tinggi konsentrasi enzim, semakin banyak reaksi yang dapat dikatalisis, selama substrat tersedia (Garrett & Grisham, 2017).

**c. Suhu**

Setiap enzim memiliki suhu optimum. Peningkatan suhu dapat meningkatkan laju reaksi, tetapi suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan denaturasi enzim (Murray et al., 2018).

**d. pH**

Enzim memiliki pH optimum tertentu. Perubahan pH dapat memengaruhi struktur enzim dan muatan situs aktif, sehingga mengurangi aktivitasnya (Berg et al., 2019).

**e. Inhibitor**

Inhibitor adalah molekul yang menghambat kerja enzim. Inhibitor kompetitif bersaing dengan substrat untuk mengikat situs aktif, sedangkan inhibitor non-kompetitif berikatan pada lokasi lain pada enzim (Nelson & Cox, 2021).

**f. Kofaktor dan Koenzim**

Beberapa enzim memerlukan kofaktor seperti ion logam ( $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ) atau koenzim seperti  $NAD^+$  untuk aktivitas optimal (Murray et al., 2018).

**C. Reaksi Biokimia dalam Tubuh**

Regulasi biokimia merupakan mekanisme yang digunakan oleh sel dan organisme untuk mengontrol laju serta arah reaksi metabolik agar tetap sesuai dengan kebutuhan fisiologis. Proses ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan internal tubuh (homeostasis), mencegah pemborosan energi, serta menghindari akumulasi zat yang dapat bersifat toksik (Nelson & Cox, 2021).

Reaksi biokimia dalam tubuh berlangsung dalam jalur metabolisme yang saling terintegrasi. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengaturan yang kompleks dan terkoordinasi agar setiap jalur metabolisme dapat berfungsi secara optimal.

#### **a. Prinsip Dasar Regulasi Biokimia**

Regulasi biokimia didasarkan pada beberapa prinsip utama:

##### **1. Efisiensi Energi**

Tubuh hanya akan mengaktifkan jalur metabolik ketika diperlukan.

##### **2. Spesifisitas**

Regulasi terjadi pada enzim tertentu, biasanya pada tahap awal jalur metabolisme (rate-limiting step).

##### **3. Respons terhadap Lingkungan**

Aktivitas enzim dapat berubah sesuai kondisi internal maupun eksternal, seperti perubahan nutrisi, hormon, dan stres.

## **b. Regulasi Aktivitas Enzim**

### **1. Regulasi Alosterik**

Regulasi alosterik terjadi ketika molekul regulator (aktivator atau inhibitor) berikatan pada situs selain situs aktif (situs alosterik). Ikatan ini menyebabkan perubahan konformasi enzim sehingga meningkatkan atau menurunkan aktivitasnya (Berg et al., 2019).

Ciri-ciri enzim alosterik:

- Memiliki lebih dari satu situs pengikatan
- Menunjukkan kurva kinetika sigmoid
- Sering berperan dalam pengaturan jalur metabolisme

### **2. Modifikasi Kovalen**

Aktivitas enzim dapat diatur melalui penambahan atau penghilangan gugus kimia tertentu, seperti:

- **Fosforilasi** (penambahan gugus fosfat)
- **Defosforilasi** (penghilangan gugus fosfat)

Modifikasi ini biasanya dikatalisis oleh enzim lain seperti kinase dan fosfatase, dan sering dipengaruhi oleh sinyal hormonal (Murray et al., 2018).

### **3. Aktivasi Proteolitik**

Beberapa enzim disintesis dalam bentuk tidak aktif (zimogen atau proenzim) dan harus diaktifkan melalui pemotongan proteolitik. Contohnya:

- Pepsinogen → Pepsin
- Tripsinogen → Tripsin

Mekanisme ini penting untuk mencegah kerusakan sel oleh enzim aktif (Nelson & Cox, 2021).

#### **c. Regulasi Melalui Konsentrasi Enzim Regulasi Genetik**

Jumlah enzim dalam sel dapat diatur melalui:

- Induksi (peningkatan sintesis enzim)
- Represi (penurunan sintesis enzim)

Regulasi ini terjadi pada tingkat transkripsi dan translasi gen (Alberts et al., 2022).

#### **d. Feedback Inhibition (Umpan Balik Negatif)**

Feedback inhibition adalah mekanisme di mana produk akhir dari suatu jalur metabolik menghambat enzim pada tahap awal jalur tersebut (Berg et al., 2019).

Contoh:

Jika suatu produk sudah cukup banyak, maka produksi lebih lanjut akan dihentikan untuk menghemat energi.

Keuntungan:

- Mencegah akumulasi produk berlebih
- Menghemat sumber daya sel
- Menjaga keseimbangan metabolisme

#### e. **Regulasi oleh Hormon**

Hormon berperan penting dalam mengatur aktivitas enzim, terutama dalam metabolisme energi.

Contoh:

- **Insulin** → meningkatkan penyimpanan glukosa
- **Glukagon** → meningkatkan pemecahan glukosa

Hormon bekerja melalui:

- Aktivasi jalur sinyal
- Modifikasi enzim
- Regulasi ekspresi gen (Murray et al., 2018)

#### f. **Kompartementalisasi Sel**

Reaksi biokimia dalam sel sering dipisahkan dalam organel tertentu, seperti:

1. Mitokondria → respirasi sel
2. Sitoplasma → glikolisis

Pemisahan ini memungkinkan:

- Efisiensi reaksi
- Pengaturan yang lebih spesifik
- Pencegahan konflik antar jalur metabolik (Alberts et al., 2022)

### **g. Integrasi dan Sinyal Seluler dalam Regulasi Biokimia**

Selain mekanisme regulasi yang telah dijelaskan, interaksi antar jalur metabolisme juga memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan biokimia tubuh. Jalur metabolik tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling terhubung dalam suatu jaringan yang kompleks. Sebagai contoh, produk dari satu jalur metabolisme dapat menjadi substrat bagi jalur lainnya, sehingga koordinasi antar jalur sangat diperlukan. Regulasi ini memungkinkan sel untuk beradaptasi terhadap perubahan kebutuhan energi dan ketersediaan nutrisi secara dinamis (Lodish et al., 2021). Dengan adanya integrasi ini, tubuh dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan menjaga efisiensi metabolisme.

Selain itu, perkembangan ilmu biomedik modern menunjukkan bahwa regulasi biokimia juga melibatkan mekanisme yang lebih kompleks seperti regulasi berbasis sinyal seluler (*cell signaling pathways*). Molekul sinyal seperti hormon, sitokin, dan faktor pertumbuhan dapat mengaktifkan rangkaian reaksi intraseluler yang pada akhirnya memengaruhi aktivitas enzim dan ekspresi gen. Mekanisme ini sangat penting dalam proses fisiologis seperti pertumbuhan,

diferensiasi sel, dan respons terhadap stres. Gangguan pada sistem regulasi ini dapat menyebabkan berbagai penyakit, termasuk kanker dan gangguan metabolik (Devlin, 2011). Oleh karena itu, pemahaman tentang regulasi biokimia tidak hanya penting secara teoritis, tetapi juga memiliki implikasi besar dalam diagnosis dan terapi penyakit.

#### **D. Latihan Soal**

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Enzim berfungsi sebagai...
  - A. Substrat
  - B. Katalis biologis
  - C. Produk reaksi
  - D. Inhibitor
2. Enzim bekerja dengan cara...
  - A. Meningkatkan energi aktivasi
  - B. Menurunkan energi aktivasi
  - C. Mengubah produk menjadi substrat
  - D. Menghentikan reaksi kimia
3. Bagian enzim tempat substrat berikatan disebut...
  - A. Situs alosterik
  - B. Situs aktif
  - C. Koenzim
  - D. Kofaktor

4. Faktor yang dapat menyebabkan denaturasi enzim Adalah...
  - A. Suhu tinggi
  - B. Konsentrasi substrat rendah
  - C. Enzim berlebih
  - D. Koenzim
5. Inhibitor kompetitif bekerja dengan cara...
  - A. Mengubah bentuk enzim
  - B. Bersaing dengan substrat
  - C. Menghancurkan enzim
  - D. Menambah energi aktivasi
6. pH optimum enzim berfungsi untuk...
  - A. Menghambat reaksi
  - B. Menstabilkan enzim
  - C. Mengoptimalkan aktivitas enzim
  - D. Menghancurkan substrat
7. Model yang menyatakan enzim berubah bentuk saat berikatan dengan substrat adalah...
  - A. Lock and key
  - B. Induced fit
  - C. DNA model
  - D. Feedback model
8. Fosforilasi enzim termasuk dalam mekanisme...
  - A. Denaturasi
  - B. Regulasi kovalen
  - C. Inhibisi kompetitif
  - D. Difusi sederhana

9. Feedback inhibition terjadi ketika...
- A. Substrat menghambat enzim
  - B. Enzim menghambat substrat
  - C. Produk akhir menghambat enzim awal jalur metabolic
  - D. Enzim tidak bekerja sama sekali
10. Jalur metabolik dalam sel diatur agar...
- A. Menghasilkan energi tanpa kontrol
  - B. Tidak saling berhubungan
  - C. Efisien dan sesuai kebutuhan sel
  - D. Selalu aktif secara maksimal

## **BAB 5. GENETIKA DAN REGULASI GEN**

---

### **A. Pendahuluan**

1. Tujuan Pembelajaran:  
Mahasiswa mampu memahami tentang genetika dan regulasi gen.
2. Capaian pembelajaran  
Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa dapat menjelaskan tentang konsep dasar genetika, hukum mendel, aplikasi genetika, dan regulasi gen.

### **B. Konsep Dasar Genetika**

#### **1. Gen**

Gen adalah unit dasar pewarisan sifat yang terdapat pada DNA. Setiap gen mengandung instruksi untuk membentuk protein, yang kemudian menentukan sifat makhluk hidup. Letak gen ada pada lokus (posisi tertentu di kromosom). Satu sifat bisa dikendalikan oleh: satu gen (contoh: warna bunga pada kacang ercis) dan banyak gen (poligenik) (contoh: tinggi badan manusia)

#### **2. DNA (Deoxyribonucleic Acid)**

Deoxyribonucleic Acid (DNA) adalah molekul pembawa informasi genetik yang memiliki struktur heliks ganda.

Struktur DNA:

DNA tersusun dari unit yang disebut nukleotida, yang terdiri dari: Gula deoksiribosa, gugus fosfat, dan basa nitrogen berupa: Adenin (A) berpasangan dengan Timin (T), Sitosin (C) berpasangan dengan Guanin (G).

Fungsi DNA antara lain:

- Menyimpan informasi genetik
- Mengontrol sintesis protein
- Mewariskan sifat ke keturunan

Replikasi DNA:

DNA mampu menggandakan diri sebelum pembelahan sel melalui proses: semi-konservatif (setiap DNA baru mengandung satu untai lama dan satu baru).

### **3. Kromosom**

Kromosom adalah struktur berbentuk benang dalam inti sel yang membawa DNA.

Struktur kromosom:

- Kromatid: lengan kromosom
- Sentromer: bagian tengah penghubung
- Telomer: ujung kromosom

Jenis kromosom:

1. Autosom → menentukan sifat tubuh
2. Gonosom (kromosom seks) → menentukan jenis kelamin
  - XX = perempuan

- XY = laki-laki

Jumlah kromosom manusia:

- 46 kromosom (23 pasang)

### **C. Hukum Pewarisan Sifat (Hukum Mendel)**

Gregor Mendel menemukan prinsip dasar pewarisan sifat melalui percobaan pada tanaman kacang ercis.

#### **1. Hukum Mendel I (Segregasi)**

- Setiap individu memiliki dua alel (variasi gen)
- Saat pembentukan gamet (sel kelamin), alel berpisah
- Setiap gamet hanya membawa satu alel

#### **2. Hukum Mendel II (Asortasi Bebas)**

- Gen untuk sifat yang berbeda diwariskan secara independen
- Berlaku jika gen tidak berada pada kromosom yang sama

Konsep penting:

- Dominan: sifat yang muncul (contoh: warna ungu bunga)
- Resesif: sifat yang tersembunyi (contoh: warna putih bunga)

Contoh:

Persilangan  $Aa \times Aa$  menghasilkan rasio:

- 75% dominan
- 25% resesif

### **3. Penyimpangan Hukum Mendel**

Tidak semua pewarisan mengikuti Mendel, contohnya:

- Kodominan (golongan darah AB)
- Intermediet (warna bunga merah + putih → pink)
- Pautan gen (linkage)

### **D. Perkembangan dan Aplikasi Genetika**

Perkembangan genetika modern memungkinkan manipulasi DNA secara langsung. Contoh:

1. Rekayasa genetika
  - Memasukkan gen tertentu ke organisme
  - Contoh: tanaman tahan hama
2. CRISPR-Cas9
  - Teknologi edit gen yang presisi
  - Digunakan untuk terapi penyakit genetik
3. PCR (Polymerase Chain Reaction)
  - Menggandakan DNA dalam jumlah besar
4. DNA sequencing
  - Menentukan urutan basa DNA

Aplikasi Genetika dalam Berbagai Bidang:

1. Kedokteran
  - Diagnosis penyakit genetik
  - Terapi gen
  - Pengobatan personal (precision medicine)

2. Pertanian
  - Tanaman transgenik
  - Hasil panen lebih tinggi
  - Tahan hama dan kekeringan
3. Forensik
  - Identifikasi DNA
  - Tes paternitas
  - Investigasi kriminal
4. Industri
  - Produksi insulin
  - Vaksin
  - Enzim industry

## **E. Regulasi Gen**

Regulasi gen adalah proses pengendalian ekspresi gen yang menentukan kapan, dimana, dan seberapa banyak suatu gen diekspresikan menjadi produk berupa protein atau RNA. Proses ini sangat penting untuk memastikan bahwa sel dapat menjalankan fungsi secara optimal.

Ekspresi gen mengikuti alur DNA → RNA → Protein. Proses ini melibatkan dua tahap utama yaitu transkripsi dan translasi. Pada tahap transkripsi, DNA disalin menjadi RNA oleh enzim RNA polimerase. Selanjutnya, RNA diterjemahkan menjadi protein melalui proses translasi. Regulasi gen terjadi pada berbagai tingkatan, yaitu:

1. **Regulasi Epigenetik**  
Melibatkan perubahan struktur kromatin tanpa mengubah urutan DNA, seperti metilasi DNA dan modifikasi histon.
2. **Regulasi Transkripsi**  
Mengontrol proses pembentukan RNA melalui interaksi antara DNA dan faktor transkripsi.
3. **Regulasi Pasca-Transkripsi**  
Meliputi proses splicing, editing RNA, dan stabilitas RNA.
4. **Regulasi Translasi**  
Mengatur efisiensi pembentukan protein dari RNA.
5. **Regulasi Pascatranslasi**  
Melibatkan modifikasi protein setelah terbentuk, seperti fosforilasi dan degradasi.

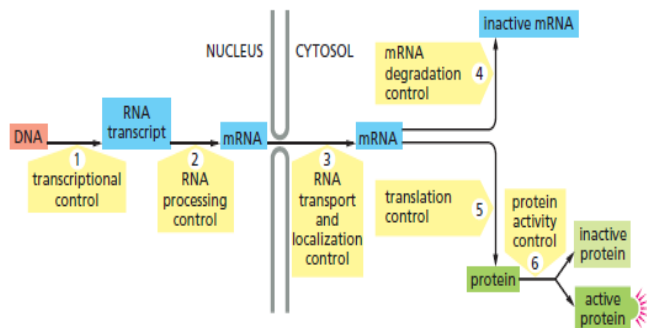
## **F. Regulasi Gen pada Eukariot**

Regulasi gen pada eukariot menunjukkan tingkat kompleksitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan prokariot. Hal ini disebabkan oleh adanya struktur kromatin, keberadaan intron, serta banyaknya faktor transkripsi yang terlibat. Kompleksitas ini memungkinkan pengaturan ekspresi gen yang sangat spesifik, baik secara temporal (waktu) maupun spasial (lokasi dalam tubuh). Namun, kompleksitas ini juga meningkatkan potensi terjadinya kesalahan regulasi

yang dapat berujung pada penyakit. Studi oleh Jaenisch dan Bird (2003) menunjukkan bahwa mekanisme epigenetik memainkan peran penting dalam menentukan pola ekspresi gen pada eukariot. Regulasi gen pada eukariot menunjukkan tingkat kompleksitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan prokariot. Hal ini disebabkan oleh adanya struktur kromatin, keberadaan intron, serta banyaknya faktor transkripsi yang terlibat. Kompleksitas ini memungkinkan pengaturan ekspresi gen yang sangat spesifik, baik secara temporal (waktu) maupun spasial (lokasi dalam tubuh). Namun, kompleksitas ini juga meningkatkan potensi terjadinya kesalahan regulasi yang dapat berujung pada penyakit.

Pengaturan ekspresi gen pada sel eukariotik dapat terjadi di berbagai tahapan aliran informasi genetik, mulai dari DNA hingga terbentuknya protein. Berdasarkan ilustrasi pada Gambar, sel mampu mengontrol jenis dan jumlah protein yang dihasilkan melalui beberapa mekanisme, yaitu: (1) mengatur waktu dan frekuensi suatu gen ditranskripsikan (kontrol transkripsi), (2) mengendalikan proses pemotongan atau pemrosesan mRNA hasil transkripsi (kontrol pemrosesan mRNA), (3) menentukan mRNA yang akan dipindahkan dari nukleus ke sitosol (kontrol lokalisasi dan transport RNA), (4) secara selektif menghancurkan molekul

mRNA tertentu (kontrol degradasi RNA), (5) memilih mRNA yang akan diterjemahkan oleh ribosom (kontrol translasi), serta (6) mengatur aktivasi atau inaktivasi protein setelah proses sintesis berlangsung (kontrol aktivitas protein). Meski demikian, seperti pada sel prokariotik, pengendalian utama ekspresi gen pada eukariotik tetap terjadi pada tahap inisiasi transkripsi.



Gambar 5. 1. Tahap inisiasi transkripsi

Sedangkan pada sel Prokariot memiliki sistem regulasi yang lebih sederhana dan efisien karena langsung merespons perubahan lingkungan. Sistem operon memungkinkan beberapa gen diaktifkan atau dinonaktifkan secara bersamaan. Sebaliknya, eukariot memiliki regulasi yang lebih lambat tetapi lebih presisi. Hal ini penting bagi organisme multiseluler yang membutuhkan kontrol ketat terhadap ekspresi gen.

## **G. Peran Regulasi Gen dalam Penyakit**

Gangguan pada regulasi gen dapat menyebabkan berbagai penyakit, terutama kanker. Kanker sering kali terjadi akibat mutasi pada gen yang mengatur siklus sel, seperti gen penekan tumor dan proto-onkogen. Ketika regulasi gen terganggu, sel dapat membelah secara tidak terkendali. Penelitian oleh Vogelstein dan Kinzler (2004) menjelaskan bahwa kanker merupakan hasil dari akumulasi mutasi pada jalur regulasi gen yang mengontrol pertumbuhan sel. Selain kanker, penyakit genetik lainnya juga dapat disebabkan oleh kesalahan dalam ekspresi gen. Gangguan pada regulasi gen dapat menyebabkan berbagai penyakit, terutama kanker. Kanker sering kali terjadi akibat mutasi pada gen yang mengatur siklus sel, seperti gen penekan tumor dan proto-onkogen. Ketika regulasi gen terganggu, sel dapat membelah secara tidak terkendali. Selain kanker, penyakit genetik lainnya juga dapat disebabkan oleh kesalahan dalam ekspresi gen.

## **H. Perkembangan Teknologi dalam Studi Regulasi Gen**

Kemajuan teknologi seperti CRISPR-Cas9 memungkinkan ilmuwan untuk memodifikasi gen secara spesifik. Teknologi ini membuka peluang besar dalam pengobatan penyakit genetik dan terapi gen.

Doudna dan Charpentier (2014) menyatakan bahwa CRISPR-Cas9 merupakan terobosan revolusioner dalam rekayasa genetika karena kemudahannya dalam mengedit DNA secara presisi. Selain itu, teknik seperti RNA sequencing dan epigenomic mapping membantu dalam memahami pola regulasi gen secara lebih mendalam. Kemajuan teknologi seperti CRISPR-Cas9 memungkinkan ilmuwan untuk memodifikasi gen secara spesifik. Teknologi ini membuka peluang besar dalam pengobatan penyakit genetik dan terapi gen. Selain itu, teknik seperti RNA sequencing dan epigenomic mapping membantu dalam memahami pola regulasi gen secara lebih mendalam.

### **I. Latihan Soal**

1. Gen merupakan...
  - A. Molekul penyusun sel
  - B. Unit dasar pewarisan sifat
  - C. Organel dalam sel
  - D. Enzim dalam tubuh
2. Struktur DNA berbentuk...
  - A. Lingkaran tunggal
  - B. Heliks ganda
  - C. Rantai lurus
  - D. Spiral tunggal

3. Pasangan basa nitrogen yang benar adalah...
  - A. A–C dan G–T
  - B. A–G dan C–T
  - C. A–T dan C–G
  - D. A–A dan C–C
4. Jumlah kromosom pada manusia adalah...
  - A. 23
  - B. 44
  - C. 46
  - D. 48
5. Hukum Mendel I dikenal sebagai hukum...
  - A. Dominansi
  - B. Segregasi
  - C. Asortasi bebas
  - D. Variasi
6. Contoh penyimpangan hukum Mendel adalah...
  - A. Segregasi
  - B. Dominansi penuh
  - C. Kodominan
  - D. Asortasi bebas
7. Proses pembentukan RNA dari DNA disebut...
  - A. Translasi
  - B. Replikasi
  - C. Transkripsi
  - D. Mutasi

8. Regulasi gen yang melibatkan perubahan struktur kromatin tanpa mengubah DNA disebut...
  - A. Translasi
  - B. Epigenetik
  - C. Mutasi
  - D. Replikasi
9. Pengendalian utama ekspresi gen pada eukariotik terjadi pada tahap...
  - A. Translasi
  - B. Degradasi protein
  - C. Inisiasi transkripsi
  - D. Transport RNA
10. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mengedit gen secara presisi adalah....
  - A. PCR
  - B. DNA sequencing
  - C. CRISPR-Cas9
  - D. Elektroforesis

## BAB 6. BIOLOGI MOLEKULER

---

### A. Pendahuluan

Cabang ilmu yang mempelajari dasar kehidupan pada tingkat molekul, terutama interaksi antara asam nukleat, protein, serta mekanisme regulasi gen yang mengendalikan fungsi sel adalah Biologi molekuler biomedik. Ilmu ini berkembang pesat sejak ditemukannya struktur DNA dan menjadi fondasi utama dalam memahami mekanisme biologis normal maupun proses terjadinya penyakit pada manusia. Pendekatan molekuler menjelaskan fenomena biologis secara lebih spesifik hingga tingkat genetik dan biokimia seluler.

Perkembangan biologi molekuler telah membawa perubahan besar dalam bidang kesehatan, khususnya pada diagnosis laboratorium, terapi berbasis target, dan pengembangan kedokteran presisi (*precision medicine*). Penyakit yang sebelumnya hanya dipahami berdasarkan gejala klinis kini dapat dianalisis melalui perubahan molekuler seperti mutasi gen, perubahan ekspresi protein, dan gangguan regulasi seluler. Oleh karena itu, pemahaman biologi molekuler menjadi kompetensi dasar bagi tenaga kesehatan modern.

1. Tujuan Pembelajaran  
Mampu memahami konsep dasar biologi molekuler serta menjelaskan peran mekanisme molekuler dalam proses fisiologi dan patogenesis penyakit pada bidang biomedik.
2. Capaian Pembelajaran
  - a. Konsep dasar biologi molekuler dalam sistem biologis manusia.
  - b. Menjelaskan struktur dan fungsi molekul genetik dalam sel.
  - c. Mendeskripsikan mekanisme ekspresi gen dan regulasinya.
  - d. Menganalisis hubungan perubahan molekuler dengan terjadinya penyakit.
  - e. Menghubungkan teknologi molekuler dengan perkembangan kedokteran presisi.

## **B. Ruang Lingkup Materi**

### **1. Konsep Dasar Biologi Molekuler**

#### **a. Definisi dan sejarah perkembangan molekuler**

Biologi molekuler adalah bagaimana informasi genetik disimpan, ditransmisikan, dan diekspresikan dalam organisme hidup.

Perkembangan selanjutnya ditandai dengan ditemukannya kode genetik pada tahun 1960-an, teknologi DNA rekombinan

pada tahun 1970-an, serta metode Polymerase Chain Reaction (PCR) pada tahun 1983 yang memungkinkan amplifikasi DNA secara cepat. Puncaknya adalah selesainya Human Genome Project pada tahun 2003 yang berhasil memetakan hampir seluruh genom manusia.

#### **b. Dogma sentral biologi molekuler**

Dogma sentral melibatkan tiga proses utama, yaitu:

##### 1) Replikasi DNA

Replikasi merupakan proses penggandaan DNA sebelum pembelahan sel. Mekanisme ini bersifat semikonservatif. Enzim utama yang berperan adalah DNA polimerase, helicase, primase, dan ligase.

##### 2) Transkripsi

Transkripsi adalah proses pembentukan RNA berdasarkan cetakan DNA. Pada tahap ini, enzim RNA polimerase membaca urutan basa DNA dan mensintesis messenger RNA (mRNA). Selain mRNA, terdapat pula jenis RNA lain seperti transfer RNA (tRNA) dan ribosomal RNA (rRNA) yang berperan dalam sintesis protein.

##### 3) Translasi

Translasi berlangsung di ribosom dengan bantuan tRNA yang membawa

asam amino sesuai kode genetik berupa kodon. Protein yang dihasilkan akan menjalankan berbagai fungsi biologis seperti enzim, hormon, reseptor sel, dan komponen struktural jaringan.

### **c. Organisasi materi genetik**

Materi genetik dalam sel tersusun secara hierarkis dan terorganisasi dengan sangat kompleks untuk memastikan stabilitas serta efisiensi ekspresi gen.

#### 1) Nukleotida sebagai Unit Dasar

DNA tersusun atas unit dasar yang disebut nukleotida, yang terdiri dari:

- Gugus fosfat
- Gula deoksiribosa
- Basa nitrogen (Adenin, Timin, Guanin, Sitosin)

Pasangan basa mengikuti aturan komplement:

- Adenin berpasangan Timin
- Guanin berpasangan Sitosin

Ikatan hidrogen antar basa membentuk struktur heliks ganda DNA.

#### 2) Struktur DNA

DNA memiliki struktur heliks ganda antiparalel yang stabil. Struktur ini memungkinkan DNA menyimpan

informasi genetik dalam jumlah besar sekaligus tetap mudah direplikasi dan ditranskripsi.

### 3) Gen

Gen merupakan segmen DNA untuk sintesis protein yang mengandung informasi. Tidak seluruh bagian DNA mengkode protein; sebagian besar berperan dalam regulasi ekspresi gen.

### 4) Kromatin dan Kromosom

Pada sel eukariotik, DNA berasosiasi dengan protein histon membentuk kromatin. Struktur ini mengalami kondensasi menjadi kromosom saat pembelahan sel. Organisasi ini memungkinkan DNA sepanjang  $\pm 2$  meter dalam sel manusia dapat tersimpan di dalam inti sel berukuran mikroskopis.

### 5) Genom

Genom adalah keseluruhan materi genetik suatu organisme. Genom memiliki pasangan basa yang mengandung miliaran gen yang berfungsi untuk mengatur biologis tubuh.

Organisasi materi genetik yang teratur memungkinkan regulasi ekspresi gen berlangsung secara spesifik sesuai

kebutuhan sel, jaringan, dan kondisi fisiologis.

## **2. Struktur dan Fungsi Molekul Genetik**

### **a. Struktur DNA dan RNA**

Struktur molekul genetik merupakan dasar penting dalam biologi molekuler biomedik karena seluruh aktivitas sel dikendalikan oleh informasi genetik yang tersimpan dalam DNA dan diekspresikan melalui RNA. Struktur kimia asam nukleat menentukan stabilitas informasi genetik, mekanisme pewarisan sifat, serta regulasi sintesis protein. Perubahan pada struktur molekul genetik dapat menyebabkan gangguan fungsi sel yang berhubungan dengan berbagai penyakit genetik, kanker, maupun kelainan metabolik.

Asam nukleat terdiri atas Ribonucleic Acid (RNA) dan *Deoxyribonucleic Acid* (DNA). DNA berfungsi untuk menyimpan informasi genetik, sedangkan RNA berperan dalam proses ekspresi gen. DNA memiliki struktur heliks ganda (double helix) yang tersusun polinukleotida antiparalel dengan arah 5'–3' dan 3'–5'.

RNA umumnya berbentuk untai tunggal dan mengandung gula ribosa serta

basa nitrogen (A), (U), (G), dan (C). RNA berperan sebagai perantara informasi genetik dalam sintesis protein. Tiga jenis RNA utama yaitu (mRNA), (tRNA), dan (rRNA) bekerja secara koordinatif dalam proses translasi.

### **3. Replikasi DNA**

#### **a. Mekanisme replikasi**

Replikasi DNA berlangsung menurut model semikonservatif. Proses replikasi dimulai pada daerah khusus DNA yang disebut origin of replication.

Tahapan utama replikasi DNA meliputi:

##### **1) Inisiasi**

Pada tahap ini, enzim helicase membuka heliks ganda DNA dengan memutus ikatan hidrogen antar basa nitrogen sehingga terbentuk struktur replication fork. Protein penstabil untai tunggal menjaga DNA tetap terbuka agar tidak kembali berikatan.

##### **2) Elongasi**

DNA polimerase menambahkan nukleotida baru berdasarkan pasangan basa komplemen dengan arah sintesis 5' → 3'. Karena kedua untai DNA antiparalel, proses sintesis terjadi secara berbeda:

- *Leading strand* disintesis secara kontinu.
- *Lagging strand* disintesis secara diskontinu membentuk fragmen Okazaki.

### 3) Terminasi

Replikasi berakhir ketika seluruh molekul DNA telah digandakan dan fragmen DNA disatukan menjadi satu untai utuh. Mekanisme ini memungkinkan replikasi berlangsung cepat namun tetap akurat.

#### b. Enzim yang terlibat

Replikasi DNA melibatkan berbagai enzim dengan fungsi spesifik, antara lain:

- **Helicase**  
Membuka struktur heliks ganda DNA dengan memutus ikatan hidrogen.
- **Single-Strand Binding Protein (SSB)**  
Menstabilkan untai DNA tunggal agar tidak kembali berikatan.
- **Primase**  
Mensintesis RNA primer sebagai titik awal kerja DNA polimerase.
- **DNA Polimerase**  
Enzim utama yang menambahkan nukleotida baru sesuai cetakan DNA serta melakukan koreksi kesalahan.

- **Topoisomerase**

Mengurangi tegangan puntiran DNA selama proses pembukaan heliks. Kerja sama enzim-enzim ini memastikan replikasi berlangsung efisien dan stabil.

#### **4. Regulasi Ekspresi Gen**

##### **a. Regulasi prokariotik dan eukariotik**

Mekanisme regulasi ekspresi gen berbeda antara organisme prokariotik dan eukariotik karena perbedaan kompleksitas struktur sel dan organisasi genom.

##### **1) Regulasi pada Prokariotik**

Pada prokariota, regulasi gen berlangsung relatif sederhana dan umumnya terjadi pada tingkat transkripsi. Gen sering tersusun dalam unit yang disebut operon, yaitu kelompok gen yang dikendalikan oleh satu promoter. Contoh klasik adalah operon lac pada bakteri *Escherichia coli*, yang mengatur metabolisme laktosa. Ketika laktosa tersedia, represor dilepaskan sehingga transkripsi gen berlangsung. Sebaliknya, tanpa laktosa, represor menghambat transkripsi. Regulasi prokariotik

memungkinkan respons cepat terhadap perubahan lingkungan.

## 2) Regulasi pada Eukariotik

Pada sel eukariotik, regulasi ekspresi gen jauh lebih kompleks dan dapat terjadi pada beberapa tingkat, yaitu:

- Modifikasi kromatin
- Transkripsi
- Pemrosesan RNA (splicing)
- Transport mRNA
- Translasi
- Modifikasi pascatranslasi protein

Keberadaan membran inti serta struktur kromatin menyebabkan ekspresi gen eukariotik membutuhkan banyak faktor regulator tambahan.

### **b. Faktor transkripsi**

Faktor transkripsi merupakan protein regulator yang berikatan dengan sekuens DNA tertentu untuk mengontrol proses transkripsi gen. Molekul ini bekerja dengan mengaktifkan atau menghambat kerja RNA polimerase.

Fungsi utama faktor transkripsi meliputi:

- Mengenal daerah promotor dan enhancer
- Merekrut enzim transkripsi
- Mengatur tingkat ekspresi gen

- Merespons sinyal seluler dan lingkungan

Faktor transkripsi dapat bersifat:

- Activator, meningkatkan transkripsi gen
- Repressor, menghambat transkripsi

Aktivitas faktor transkripsi sangat penting dalam proses diferensiasi sel, respon imun, serta regulasi siklus sel. Mutasi pada faktor transkripsi sering dikaitkan dengan kanker dan penyakit genetik.

## 5. Aplikasi Biologi Molekuler dalam Biomedik

### a. PCR dan variasinya

Teknik amplifikasi DNA secara in vitro yang memungkinkan penggandaan fragmen DNA dalam jumlah besar dalam waktu singkat yang disebut Polymerase Chain Reaction (PCR). Metode ini dikembangkan oleh Kary Mullis dan menjadi salah satu teknologi paling penting dalam diagnostik molekuler.

PCR terdiri atas tiga tahap utama yang berlangsung berulang dalam siklus termal:

- 1) **Denaturasi:** pemisahan dua untai DNA pada suhu tinggi.
- 2) **Annealing:** penempelan primer spesifik pada DNA target.
- 3) **Elongasi:** sintesis DNA baru oleh enzim DNA polimerase tahan panas.

## **b. Sequencing DNA**

Sequencing DNA adalah teknik penentuan urutan basa nukleotida dalam molekul DNA. Metode ini memungkinkan identifikasi mutasi, variasi genetik, dan analisis hubungan gen dengan penyakit.

Metode sequencing meliputi:

- Sanger Sequencing
  - Next Generation Sequencing (NGS)
- Biomarker molekuler

## **C. Latihan Soal**

1. Dogma sentral biologi molekuler menjelaskan aliran informasi genetik dari ...
  - A. Protein → RNA → DNA
  - B. RNA → DNA → Protein
  - C. DNA → RNA → Protein
  - D. Protein → DNA → RNA
  - E. RNA → Protein → DNA
2. Komponen utama penyusun nukleotida adalah ...
  - A. Asam amino, gula, fosfat
  - B. Basa nitrogen, gula pentosa, fosfat
  - C. Lipid, gula, protein
  - D. Protein, fosfat, enzim
  - E. Karbohidrat, lipid, basa nitrogen

3. Ikatan hidrogen antara basa nitrogen DNA yang benar adalah ...
  - A. Adenin–Guanin
  - B. Sitosin–Timin
  - C. Adenin–Timin
  - D. Guanin–Adenin
  - E. Timin–Guanin
4. Enzim utama yang berfungsi mensintesis rantai DNA baru saat replikasi ...
  - A. Helikase
  - B. Ligase
  - C. Primase
  - D. DNA polimerase
  - E. Topoisomerase
5. Fungsi enzim helikase pada replikasi DNA adalah ...
  - A. Menggabungkan fragmen Okazaki
  - B. Membuka heliks ganda DNA
  - C. Mensintesis primer RNA
  - D. Memperbaiki kesalahan DNA
  - E. Mengikat protein histon
6. Proses pembentukan RNA dari cetakan DNA disebut ...
  - A. Translasi
  - B. Replikasi
  - C. Transkripsi

- D. Modifikasi post-translasi
  - E. Rekombinasi
7. Kodons pada mRNA berfungsi untuk menentukan ...
- A. Jenis lipid sel
  - B. Urutan asam amino protein
  - C. Struktur membran sel
  - D. Jumlah DNA
  - E. Aktivitas enzim restriksi
8. Perbedaan utama regulasi gen pada prokariotik dibanding eukariotik adalah ...
- A. Prokariotik tidak memiliki DNA
  - B. Eukariotik tidak melakukan transkripsi
  - C. Prokariotik memiliki operon
  - D. Eukariotik tidak memiliki ribosom
  - E. Prokariotik tidak memiliki protein
9. Teknik PCR digunakan untuk ...
- A. Menghancurkan DNA
  - B. Mengamplifikasi fragmen DNA spesifik
  - C. Menerjemahkan protein
  - D. Mengisolasi lipid
  - E. Mengukur aktivitas enzim
10. Biomarker molekuler dalam diagnosis penyakit terutama digunakan untuk ...
- A. Mengukur tekanan darah
  - B. Menentukan golongan darah

- C. Mendeteksi perubahan genetik atau ekspresi gen
- D. Menghitung eritrosit
- E. Mengukur kadar glukosa secara langsung

## **BAB 7. MIKROBIOLOGI DASAR**

---

### **A. Pendahuluan**

#### 1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu memahami konsep dasar mikrobiologi, mengenali karakteristik struktural berbagai kelompok mikroorganisme (bakteri, virus, fungi, protozoa, dan prion), memahami faktor-faktor yang menentukan patogenisitas dan virulensi, serta menganalisis mekanisme mikroorganisme dalam menyebabkan penyakit pada manusia secara interdisipliner dalam konteks ilmu kesehatan.

#### 2. Capaian Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini, diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menguraikan perbedaan karakteristik struktural dan fisiologis sel prokariotik dan eukariotik, serta mengidentifikasi komponen sel bakteri beserta fungsinya.
- b. Menjelaskan konsep patogenisitas dan virulensi, serta faktor-faktor yang menentukan kemampuan mikroorganisme menyebabkan penyakit infeksi.
- c. Mengidentifikasi karakteristik utama dan mekanisme patogenesis masing-masing

- kelompok mikroorganisme patogen (bakteri, virus, fungi, protozoa, dan prion).
- d. Menganalisis rantai infeksi (*chain of infection*) dan menerapkan prinsip pencegahan serta pengendalian infeksi dalam praktik klinis.
  - e. Mengevaluasi dasar-dasar resistensi antimikroba dan implikasinya terhadap penatalaksanaan penyakit infeksi di era kesehatan global.

## **B. Pengantar: Dunia Mikroorganisme**

Mikrobiologi adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari makhluk hidup berukuran sangat kecil (mikroorganisme) yang tidak dapat dilihat dengan mata telanjang. Disiplin ini mencakup bakteri, *archaea*, fungi, protozoa, alga mikroskopik, dan virus. Pemahaman tentang mikroorganisme menjadi fondasi ilmu kesehatan karena keterkaitan langsungnya dengan penyakit infeksi, imunologi, farmakologi antimikroba, dan epidemiologi.

Tonggak sejarah dimulai ketika **Antonie van Leeuwenhoek** (1632–1723) pertama kali mengamati mikroorganisme hidup menggunakan mikroskop buatannya. **Louis Pasteur** (1822–1895) kemudian menggugurkan teori generasi spontan dan meletakkan dasar imunologi modern, sementara **Robert Koch** (1843–1910) merumuskan *Postulat*

*Koch*—empat kriteria ilmiah untuk membuktikan bahwa suatu mikroorganisme adalah penyebab suatu penyakit—yang hingga kini menjadi acuan mikrobiologi klinis.

### C. Klasifikasi Umum Mikroorganisme

Mikroorganisme diklasifikasikan berdasarkan tipe sel, organisasi genetik, dan karakteristik lainnya:

Tabel 7. 1. Perbandingan Klasifikasi Umum Mikroorganisme

Kelompok	Tipe Sel	Materi Genetik	Contoh Patogen	Penyakit
Bakteri	Prokariot	DNA sirkular + plasmid	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberkulosis
Archaea	Prokariot	DNA sirkular	(umumnya non-patogen)	—
Fungi	Eukariot	DNA linear (inti)	<i>Candida albicans</i>	Kandidiasis
Protozoa	Eukariot	DNA linear (inti)	<i>Plasmodium falciparum</i>	Malaria

Kelompok	Tipe Sel	Materi Genetik	Contoh Patogen	Penyakit
Alga	Eukariot	DNA linear (inti)	(umumnya non-patogen)	—
Virus	Aseluler	DNA atau RNA	SARS-CoV-2	COVID-19
Prion	Aseluler (protein)	Tidak ada asam nukleat	PrPSc	CJD, vCJD

## 1. Karakteristik dan Struktur Sel Bakteri

Bakteri adalah prokariot uniseluler yang tidak memiliki membran inti. Materi genetiknya berupa kromosom DNA sirkular tunggal yang terletak bebas di daerah nukleoid dalam sitoplasma. Bakteri berukuran 0,5–5  $\mu\text{m}$  dan bereproduksi aseksual melalui pembelahan biner.

## 2. Pewarnaan Gram dan Klasifikasi Dinding Sel

Pewarnaan **Gram** (dikembangkan **Hans Christian Gram**, 1884) adalah teknik identifikasi awal bakteri yang paling penting dalam mikrobiologi klinis. Hasil pewarnaan mencerminkan komposisi dinding sel:

- a. **Bakteri Gram-positif:** lapisan peptidoglikan tebal (20–80 nm), tidak memiliki membran luar. Tampak **ungu** setelah pewarnaan.

Contoh: *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, *Bacillus anthracis*. Lebih sensitif terhadap penisilin karena peptidoglikan tebal lebih mudah dihambat.

- b. **Bakteri Gram-negatif**: lapisan peptidoglikan tipis (2–7 nm) diselubungi *membran luar* (*outer membrane*) yang kaya lipopolisakarida (LPS). Tampak **merah muda** setelah pewarnaan. Contoh: *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Neisseria meningitidis*. Membran luar berfungsi sebagai barier permeabilitas sehingga banyak antibiotik tidak dapat menembus.

### 3. Komponen Struktural Sel Bakteri dan Fungsinya

Tabel 7. 2. Komponen Struktural Sel Bakteri, Fungsi, dan Relevansi Klinisnya

<b>Komponen</b>	<b>Ada pada</b>	<b>Fungsi Utama</b>	<b>Relevansi Klinis</b>
<b>Dinding sel (peptidoglikan)</b>	Hampir semua bakteri	Bentuk sel, proteksi tekanan osmotik	Target antibiotik beta-laktam & glikopeptida (vankomisin)
<b>Membran</b>	Semua bakteri	Transpor selektif,	Target polimiksin;

<b>Komponen</b>	<b>Ada pada</b>	<b>Fungsi Utama</b>	<b>Relevansi Klinis</b>
<b>sitoplasma</b>		lokasi enzim respirasi	berbeda dari eukariot (tanpa sterol)
<b>Kromosom (nukleoid)</b>	Semua bakteri	Informasi genetik utama	Target kuinolon (hambat DNA girase/topoisomerase IV)
<b>Plasmid</b>	Banyak bakteri	Gen aksesori: resistensi Antibiotik, virulensi	Penyebab transfer gen resistensi horizontal
<b>Ribosom 70S</b>	Semua bakteri	Sintesis protein	Target aminoglikosida, makrolida, tetrasiklin, kloramfenikol
<b>Kapsul</b>	Beberapa bakteri	Anti-fagositosis, perlindungan	Faktor virulensi utama; dasar vaksin polisakarida
<b>Flagela</b>	Bakteri motil	Pergerakan (motilitas)	Kemotaksis menuju inang; protein flagelin; antigen H
<b>Pili/Fimbriae</b>	Banyak bakteri	Adhesi sel inang,	Adhesin; langkah

Komponen	Ada pada	Fungsi Utama	Relevansi Klinis
		transfer DNA (pili seks)	pertama infeksi; target vaksin
<b>Endospora</b>	Bacillus, Clostridium	Dormansi ekstrem (panas, kimia, radiasi)	Resistensi sterilisasi; sumber kontaminasi lingkungan

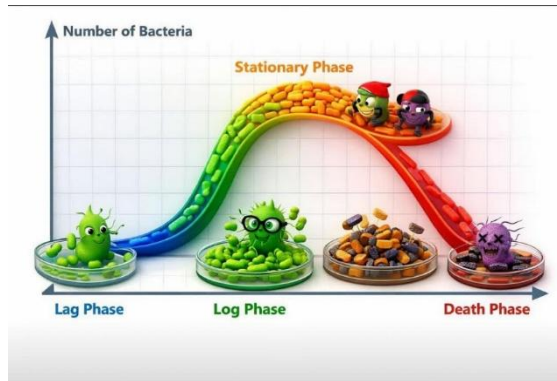
#### 4. Pertumbuhan Bakteri dan Kurva Pertumbuhan

Pertumbuhan bakteri merujuk pada peningkatan *jumlah sel*, bukan ukuran individu. Reproduksi aseksual utama bakteri adalah **pembelahan biner**. Waktu yang diperlukan satu generasi (*doubling time*) berkisar 20 menit (*E. coli*) hingga 24 jam (*Mycobacterium tuberculosis*)—perbedaan yang secara langsung memengaruhi laju perkembangan penyakit dan respons terapi.

Kurva pertumbuhan bakteri dalam medium tertutup (batch culture) terdiri dari empat fase:

- a. **Fase Lag:** adaptasi terhadap medium baru; tidak ada peningkatan jumlah sel namun terjadi peningkatan intensitas metabolisme dan sintesis enzim. Durasi bergantung pada kondisi inokulum.

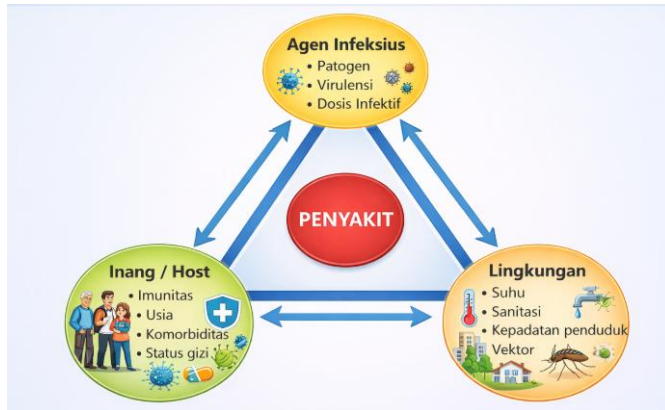
- b. **Fase Log (Eksponensial):** pembelahan biner berlangsung dengan laju konstan dan maksimal; jumlah sel berlipat secara geometris ( $2^n$ ). Fase ini paling aktif secara metabolisme, paling sensitif terhadap antibiotik, dan paling relevan dalam patogenesis infeksi akut.
- c. **Fase Stasioner:** laju pertumbuhan sama dengan laju kematian sehingga jumlah sel total konstan. Dipicu oleh habisnya nutrisi, akumulasi produk toksik, dan persaingan sel. Beberapa bakteri mulai membentuk endospora atau spora pada fase ini.
- d. **Fase Kematian (*Decline*):** laju kematian melebihi laju pertumbuhan; jumlah sel viabel menurun secara logaritmik. Berkorelasi dengan habisnya substrat dan akumulasi metabolit toksik.



Gambar 7. 1. Fase Pertumbuhan Bakteri (Sumber: <https://www.instagram.com/p/DVvh5iGgtQV/?igsh=MTg1azJxaWR2MmJ5Zg==>)

#### D. Patogenisitas, Virulensi, dan Mekanisme Infeksi

Kemampuan mikroorganisme untuk menginfeksi inang dan menyebabkan penyakit disebut **patogenisitas**, sedangkan derajat kemampuannya diukur sebagai **virulensi**. Virulensi dipengaruhi oleh interaksi dua sisi: faktor dari patogen itu sendiri dan status imunitas inang—prinsip yang dikenal sebagai *segitiga epidemiologi*: Agen – Inang – Lingkungan.



Gambar 7. 2. Segitiga Epidemiologi (Sumber: Adaptasi dari Gordis, L., 2014)

## 1. Faktor Virulensi Utama

Faktor virulensi adalah ciri atau produk patogen yang secara langsung berkontribusi pada kemampuannya menyebabkan penyakit:

- a. **Adhesin** (faktor perlekatan): molekul permukaan yang memediasi penempelan spesifik pada sel inang. Contoh: pili tipe 1 *E. coli* uropatogen pada epitel kandung kemih.
- b. **Invasin**: memfasilitasi penetrasi ke dalam sel/jaringan inang. Contoh: protein InvEFGH pada *Salmonella enterica*, yang memicu endositosis oleh sel epitel usus.
- c. **Toksin eksotoksin**: protein yang disekresikan bakteri hidup, sangat poten dan antigen kuat. Contoh: toksin kolera (aktivasi adenilat siklase → diare masif), toksin botulinum (blokade

pelepasan asetilkolin → paralisis flaksid), toksin difteri (inhibisi elongasi faktor EF-2 → henti sintesis protein).

- d. **Endotoksin/LPS:** komponen lipid A dari LPS bakteri Gram-negatif yang dilepaskan saat sel lisis. Memicu *cytokine storm* (TNF- $\alpha$ , IL-1, IL-6) yang dapat berujung pada syok septik dan kegagalan organ multipel.
- e. **Enzim ekstraselular:** mendegradasi komponen jaringan inang untuk membantu penyebaran. Contoh: hialuronidase (*Streptococcus pyogenes*), kolagenase (*Clostridium perfringens*), plasminogen activator (*Yersinia pestis*).
- f. **Faktor anti-fagositik:** kapsul (*S. pneumoniae*), protein M (*S. pyogenes*), protein A (*S. aureus*), dan pembentukan biofilm (lapisan matriks polisakarida yang melindungi koloni bakteri dari fagositosis dan penetrasi antibiotik).

## 2. Tahapan Patogenesis Infeksi Bakteri

Proses infeksi bakteri berlangsung melalui empat tahap berkesinambungan:

- a. Kolonisasi & Perlekatan (Adherence): perlekatan spesifik adhesin-reseptor adalah langkah kritis pertama. Kerusakan barrier

- mukosa (trauma, merokok, imunosupresi) meningkatkan risiko kolonisasi patogen.
- b. Invasi Jaringan: patogen menembus epitel inang—intraselular (*Listeria monocytogenes*, *Mycobacterium tuberculosis*) atau ekstraselular. Enzim seperti hialuronidase dan kolagenase membantu penyebaran jaringan.
  - c. Produksi Toksin & Kerusakan Jaringan: eksotoksin (langsung merusak sel) atau endotoksin (memicu respons inflamasi sistemik) menyebabkan manifestasi penyakit yang khas.
  - d. Penghindaran Sistem Imun: variasi antigenik (*Neisseria gonorrhoeae*), penghambatan fusi fagosom-lisosom (*M. tuberculosis*), pembentukan biofilm, dan multiplikasi intraselular memungkinkan patogen bertahan dari respons imun inang.



Gambar 7. 3. Ilustrasi Postulat Koch

## E. Karakteristik Kelompok Mikroorganisme Patogen Bakteri Patogen Utama

Tabel 7. 3. Bakteri Patogen Utama dan Karakteristik

Bakteri	Gram	Penyakit	Faktor Virulensi Kunci
<i>Staphylococcus aureus</i> (MRSA)	+	Infeksi kulit, pneumonia, sepsis, endokarditis	Toksin (TSST-1, eksfoliatif), protein A, biofilm, mecA
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	+	Pneumonia, meningitis, otitis media	Kapsul polisakarida, pneumolisin, IgA protease
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	(Tahan asam)	Tuberkulosis paru & ekstra-paru	Mikolik acid, granuloma, latensi, ESAT-6
<i>Clostridium botulinum</i>	+	Botulisme (keracunan makanan, luka, bayi)	Neurotoksin (paling poten,

<b>Bakteri</b>	<b>Gram</b>	<b>Penyakit</b>	<b>Faktor Virulensi Kunci</b>
			blokade ACh)
<b><i>Escherichia coli</i></b> (EPEC/ETEC)	-	Diare infeksius, ISK, meningitis neonatal	Pili, toksin (LT/ST), T3SS, intimin
<b><i>Salmonella typhi</i></b>	-	Demam tifoid	Vi antigen, T3SS, invasi sistemik, endotoksin
<b><i>Neisseria meningitidis</i></b>	-	Meningitis bakterial, sepsis meningokokal	Kapsul, pili, IgA protease, LPS
<b><i>Treponema pallidum</i></b>	Spiral (tidak berwarna)	Sifilis (primer, sekunder, tersier, kongenital)	Lipoprotein permukaan, penghindaran imun

## 1. Virus Patogen

Virus adalah entitas aseluler yang terdiri atas asam nukleat (DNA *atau* RNA saja) yang terbungkus kapsid protein, dan pada beberapa

virus dilapisi *selubung lipid (envelope)*. Virus bersifat *obligat intraselular*. hanya dapat bereplikasi di dalam sel inang yang hidup menggunakan mesin seluler inang.

Siklus replikasi virus mencakup enam tahap: (1) Adsorpsi pada reseptor spesifik → (2) Penetrasi/fusi membran → (3) Uncoating (pelepasan asam nukleat) → (4) Replikasi & transkripsi asam nukleat viral → (5) Perakitan (assembly) virion baru → (6) Pelepasan (release) melalui lisis atau budding.

Virus menyebabkan penyakit melalui beberapa mekanisme utama:

- a. **Lisis sel langsung**: virion baru keluar dengan menghancurkan sel inang. Contoh: poliovirus pada neuron motorik anterior → poliomielitis.
- b. **Transformasi neoplastik** (onkogenesis viral): integrasi genom virus ke DNA sel inang mengubah kontrol siklus sel → kanker. Contoh: HPV tipe 16/18 → karsinoma serviks; HBV/HCV → karsinoma hepatoselular; EBV → limfoma Burkitt.
- c. **Imunopatologi** (*cytokine storm*): kerusakan jaringan akibat respons imun berlebihan, bukan virus secara langsung. Ditemukan pada COVID-19 berat (ARDS), influenza H5N1, dan dengue hemoragik.

- d. **Imunosupresi:** HIV secara progresif menghancurkan limfosit T CD4+ (berikatan dengan CD4 dan koreseptor CCR5/CXCR4) → AIDS dengan imunodefisiensi berat yang membuka pintu infeksi oportunistik dan keganasan.

## 2. Fungi (Jamur) Patogen

Fungi adalah eukariot heterotrof yang dapat tumbuh sebagai *khamir (yeast)* uniseluler, *kapang (mold)* berfilamen, atau bersifat **dimorfik** yaitu tumbuh sebagai *mold* di suhu lingkungan (25–28°C) dan sebagai *khamir* di suhu tubuh (37°C). Dimorfisme sering berkorelasi langsung dengan patogenisitas.

Mikosis diklasifikasikan berdasarkan lokasi infeksi:

- a. Superfisial & kutaneus: Tinea capitis, Tinea pedis (kutu air), Tinea unguium (onikomikosis). Sangat umum di iklim tropis lembab seperti Indonesia. Patogen: *Trichophyton*, *Epidermophyton*.
- b. Subkutan: melalui inokulasi langsung/trauma. Contoh: Sporotrikosis (*Sporothrix schenckii*), umum pada petani dan pekebun.
- c. Sistemik/Invasif (pada imunokompromis): Kandidiasis invasif (*Candida albicans* → candidemia, kandidemia pada pasien

ICU/imunokompromis); Kriptokokosis (*Cryptococcus neoformans* → meningitis kriptokokal pada pasien HIV/AIDS); Aspergillosis invasif (*Aspergillus fumigatus* → pada pasien neutropenia berat/transplantasi sumsum tulang).

### 3. Protozoa Patogen

Protozoa adalah eukariot uniseluler motil dengan siklus hidup kompleks yang sering melibatkan dua atau lebih inang. Mekanisme infeksi, tropisme jaringan, dan implikasi klinis sangat bervariasi antar spesies.

Tabel 7. 4. Protozoa Patogen Utama, dan Mekanisme Infeksi

<b>Protozoa</b>	<b>Penyakit</b>	<b>Transmisi/ Vektor</b>	<b>Mekanisme Patogenesis</b>
<b><i>Plasmodium falciparum</i></b>	Malaria (berat/ser ebral)	Nyamuk Anopheles betina	Skizogoni eritrositik, sitoherens (PfEMP1), anemia hemolitik, sekuestrasi kapiler otak

<b>Protozoa</b>	<b>Penyakit</b>	<b>Transmisi/ Vektor</b>	<b>Mekanisme Patogenesis</b>
<b><i>Plasmodium vivax</i></b>	Malaria tertiana	Nyamuk Anopheles betina	Hipnozoit hepatik (latensi), relaps, anemia
<b><i>Entamoeba histolytica</i></b>	Amoebiasis, abses hati	Fekal-oral (kista)	Lektin Gal/GalNAc, amoebapori, protease sistein
<b><i>Giardia lamblia</i></b>	Giardiasis (malabsorpsi)	Fekal-oral (kista)	Perlekatan cakram ventral, kerusakan brush border
<b><i>Toxoplasma gondii</i></b>	Toksoplasmosis (kongenital/SSP)	Ookista (feses kucing), daging mentah	Invasi intraselular, bradizoit di jaringan otak/otot
<b><i>Trypanosoma brucei</i></b>	Penyakit Tidur Afrika	Lalat tsetse (Glossina)	Variasi antigenik VSG, menembus blood-brain barrier

#### 4. Prion

Prion (*Proteinaceous Infectious Particle*) adalah agen penyakit infeksi yang secara

fundamental berbeda dari semua patogen lain: **prion tidak mengandung asam nukleat**. Prion merupakan isoform protein seluler normal (PrP<sup>C</sup>) yang terlipat secara abnormal menjadi konformasi patologis (PrP<sup>Sc</sup>) dan mampu menginduksi protein PrP<sup>C</sup> normal lainnya untuk bertransformasi ke konformasi PrP<sup>Sc</sup>. Mekanisme 'replikasi' ini tidak memerlukan asam nukleat.

Penyakit prion menyebabkan *ensefalopati spongiformis* yang ditandai dengan degenerasi otak progresif tidak dapat dipulihkan. Pada manusia: Penyakit Creutzfeldt-Jakob (CJD—sporadik, familial, iatrogenik), Kuru (akibat kanibalisme ritual di Papua Nugini), dan varian CJD (vCJD) akibat konsumsi daging sapi terinfeksi BSE (*Bovine Spongiform Encephalopathy*). Tidak ada terapi efektif hingga saat ini.

## **F. Rantai Infeksi dan Prinsip Pencegahan**

Untuk penyakit infeksi terjadi dan menyebar, enam mata rantai infeksi (*chain of infection*) harus terhubung berurutan. Memutus salah satu mata rantai adalah strategi pencegahan paling efektif dan efisien.

Tabel 7. 5. Enam Mata Rantai Infeksi dan Strategi Pemutusan Secara Klinis

<b>Mata Rantai</b>	<b>Deskripsi</b>	<b>Contoh</b>	<b>Strategi Pemutusan</b>
<b>Agen Infeksius</b>	Karakteristik patogen (virulensi, dosis infeksi)	Bakteri MRSA, virus Influenza, Plasmodium spp.	Antibiotik/antiviral/antifungal, desinfektan, sterilisasi instrumen
<b>Reservoir</b>	Tempat patogen hidup & berkembang biak	Manusia (karier), hewan (zoonosis), air/tanah, makanan	Sanitasi lingkungan, pengendalian vektor & hewan, karantina pasien
<b>Portal Keluar</b>	Jalan patogen keluar dari reservoir	Saluran napas (batuk/bersin), feses, darah, sekret luka	Etika batuk, prosedur penanganan darah (APD), pembalutan luka steril
<b>Cara Transmisi</b>	Rute perpindahan patogen	Kontak langsung /tak	Cuci tangan ( <i>hand hygiene</i> ),

<b>Mata Rantai</b>	<b>Deskripsi</b>	<b>Contoh</b>	<b>Strategi Pemutusan</b>
		langsung, droplet, airborne, vektor, fomit	masker, ventilasi, pasteurisasi, insektisida
<b>Portal Masuk</b>	Jalan patogen masuk ke inang baru	Mukosa saluran napas, luka kulit, saluran cerna, membran konjungtiva	APD (sarung tangan, masker, goggle), teknik aseptik, imunisasi mukosa
<b>Host Rentan</b>	Individu yang rentan terinfeksi	Imunokompromis, neonatus, lansia, malnutrisi, komorbiditas	Vaksinasi, nutrisi adekuat, manajemen komorbiditas, skrining rutin

## **G. Resistensi Antimikroba: Tantangan Kesehatan Global**

Resistensi antimikroba (*Antimicrobial Resistance/AMR*) adalah kemampuan

mikroorganisme bertahan dan berkembang biak meskipun terpapar agen antimikroba. WHO menetapkan AMR sebagai salah satu dari sepuluh ancaman kesehatan global terbesar, dengan estimasi 1,27 juta kematian langsung akibat AMR pada tahun 2019 (Murray et al., 2022). Di Indonesia, prevalensi MRSA dan ESBL-producing organisms terus meningkat signifikan.

### **Mekanisme Resistensi Antimikroba**

1. Inaktivasi enzimatis: bakteri memproduksi enzim yang mendegradasi antibiotik. Contoh utama: beta-laktamase menghidrolisis cincin beta-laktam penisilin/sefalosporin; ESBL (*Extended-Spectrum Beta-Lactamase*) pada *Klebsiella pneumoniae* dan *E. coli*; karbapenemase (KPC, NDM-1) pada bakteri pan-resisten.
2. Modifikasi target: mutasi pada target antibiotik sehingga tidak dapat berikatan. Contoh: mutasi gen *mecA* menghasilkan PBP2a pada MRSA yang tidak berikatan dengan beta-laktam; mutasi gen *rpoB* → resistensi rifampisin pada *M. tuberculosis*.
3. Pompa efluks: protein transport aktif memompa antibiotik keluar dari sel sebelum mencapai konsentrasi hambat. Relevan untuk resistensi fluorokuinolon, makrolida, dan tetrasiklin pada *P. aeruginosa*.

4. Pengurangan permeabilitas: mutasi atau hilangnya porin membran luar Gram-negatif mengurangi masuknya antibiotik. Relevan pada resistensi karbapenem *Pseudomonas aeruginosa* dan *Acinetobacter baumannii*.
5. Transfer gen horizontal (HGT): gen resistensi menyebar antar bakteri melalui konjugasi (plasmid R), transformasi (DNA bebas), atau transduksi (fag bakteriofag)—mekanisme epidemiologis paling penting dalam penyebaran AMR lintas spesies.

#### **H. Latihan Soal**

1. Karakteristik yang membedakan sel prokariotik dari sel eukariotik adalah ...
  - A. Adanya dinding sel
  - B. Kemampuan melakukan metabolisme
  - C. Tidak adanya membran inti (nukleus sejati)
  - D. Ukuran ribosom 80S
  - E. Adanya mitokondria
2. Faktor virulensi bakteri yang melindunginya dari proses fagositosis oleh sel imun inang adalah ...
  - A. Flagela
  - B. Pili
  - C. Kapsul polisakarida
  - D. Ribosom 70S
  - E. Plasmid R

3. Toksin bakteri yang bekerja dengan cara mengaktifkan adenilat siklase sehingga menyebabkan diare masif (air rice-watery stool) adalah ...
  - A. Toksin botulinum
  - B. Toksin tetanus
  - C. Toksin difteri
  - D. Toksin kolera
  - E. Streptolisin O
4. Seorang pasien HIV stadium lanjut ( $CD4 < 100$  sel/ $\mu$ L) mengalami demam, sakit kepala, dan kaku kuduk. Pemeriksaan cairan serebrospinal menunjukkan tekanan tinggi, sel mononuklear meningkat, dan tinta india positif. Diagnosis yang paling mungkin adalah infeksi oleh ...
  - A. *Aspergillus fumigatus*
  - B. *Candida albicans*
  - C. *Cryptococcus neoformans*
  - D. *Histoplasma capsulatum*
  - E. *Pneumocystis jirovecii*
5. Bakteri Gram-negatif lebih resisten terhadap banyak antibiotik dibandingkan Gram-positif terutama karena ...
  - A. Lapisan peptidoglikannya lebih tebal
  - B. Tidak memiliki dinding sel
  - C. Memiliki membran luar (outer membrane) yang menjadi barrier permeabilitas

- D. Memiliki ribosom berukuran 80S
  - E. Tidak memiliki plasmid
6. Fase pertumbuhan bakteri di mana laju pembelahan sel paling cepat dan paling sensitif terhadap antibiotik adalah ...
- A. Fase lag
  - B. Fase stasioner
  - C. Fase kematian
  - D. Fase log (eksponensial)
  - E. Fase adaptasi
7. Prion (*Proteinaceous Infectious Particle*) berbeda secara fundamental dari semua patogen lainnya karena prion ...
- A. Memiliki kapsid protein yang membungkus RNA
  - B. Tidak mengandung asam nukleat (DNA maupun RNA)
  - C. Memerlukan vektor artropoda untuk transmisi
  - D. Dapat dieliminasi dengan pemanasan 100°C standar
  - E. Hanya menginfeksi sel tumbuhan
8. Mekanisme resistensi antimikroba yang paling umum pada bakteri penghasil enzim beta-laktamase adalah ...
- A. Mutasi pada target (PBP)
  - B. Pengurangan ekspresi porin dinding sel
  - C. Pompa efluks aktif

- D. Hidrolisis enzimatis cincin beta-laktam antibiotik
  - E. Metilasi ribosom
9. Dalam rantai infeksi (*chain of infection*), tindakan cuci tangan dengan sabun dan air mengalir terutama memutus mata rantai pada tahap ...
- A. Reservoir ke agen infeksius
  - B. Portal keluar ke cara transmisi
  - C. Cara transmisi ke portal masuk
  - D. Host rentan ke agen infeksius
  - E. Agen infeksius ke reservoir
10. Seorang mahasiswi baru pulang dari daerah endemis malaria dan mengalami demam periodik setiap 48 jam disertai anemia. Pemeriksaan apusan darah tepi menunjukkan eritrosit yang terinfeksi membesar dengan titik Schüffner. Spesies *Plasmodium* yang paling mungkin adalah ...
- A. *Plasmodium falciparum*
  - B. *Plasmodium malariae*
  - C. *Plasmodium vivax*
  - D. *Plasmodium knowlesi*
  - E. *Plasmodium ovale*

## **BAB 8. IMUNOLOGI DASAR**

---

### **A. Pendahuluan**

Imunologi adalah cabang ilmu biomedik yang mempelajari mekanisme pertahanan tubuh (sistem imun) terhadap benda asing yang dianggap patogen seperti mikroorganisme (bakteri, virus, jamur, dan parasit) serta benda self yang dianggap asing (Autoimun). Sistem imun memiliki kemampuan untuk mengenali, menyerang, dan mengingat agen asing yang masuk ke dalam tubuh serta membedakannya dari komponen tubuh sendiri serta mengeliminasi agen penyebab penyakit.

Peran sistem imun sangat penting dalam menjaga homeostasis tubuh serta mencegah penyakit infeksi dan gangguan lainnya seperti kanker dan penyakit autoimun.

Secara klinis, imunologi berperan penting dalam:

- Penyakit infeksi
- Penyakit autoimun
- Alergi dan hipersensitivitas
- Kanker
- Imunodefisiensi

Secara umum, sistem imun terdiri dari dua komponen utama, yaitu imunitas innate dan imunitas adaptif. Imunitas innate merupakan pertahanan

pertama yang bekerja cepat dan non-spesifik, sedangkan imunitas adaptif bekerja lebih lambat tetapi sangat spesifik dan memiliki memori imunologis.

1. Capaian Pembelajaran

Mahasiswa mampu memahami konsep dasar imunologi, komponen sistem imun innate dan adaptif, mekanisme respon imun, fungsi sel imun, antigen dan antibodi, sistem komplemen, serta gangguan sistem imun dan penerapannya dalam bidang biomedik untuk mendukung pencegahan, diagnosis, dan terapi penyakit.

2. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran, mahasiswa mampu menjelaskan konsep dasar imunologi, membedakan sistem imun innate dan adaptif, mengidentifikasi fungsi sel-sel imun, memahami mekanisme respon imun humoral dan seluler, menjelaskan fungsi antigen, antibodi, dan sistem komplemen, serta menganalisis gangguan sistem imun dan aplikasi imunologi dalam bidang biomedik.

## **B. Komponen Sistem Imun**

Sistem imun terdiri dari dua komponen utama:

### **1. IMUNITAS INNATE (BAWAAN)**

Imunitas innate merupakan garis pertahanan pertama yang bekerja cepat dan tidak spesifik. Sistem ini bekerja segera setelah patogen masuk ke dalam tubuh.

Sifat Sistem Imun Innate :

- Respon cepat (menit–jam)
- Tidak spesifik
- Tidak memiliki memori imunologis, Contoh: Kulit dan mukosa
- Sel fagosit (makrofag, neutrofil)
- Sel NK (Natural Killer)
- Sistem komplemen

#### **Komponen:**

- a. Barrier Fisik dan Kimia(kulit, mukosa)
  - Kulit
  - Mukosa
  - Asam lambung
  - Enzim lisozim
- b. Sel fagosit (neutrofil, makrofag)
- c. Sel NK (Natural Killer)
- d. Sistem komplemen

**Mekanisme:**

- Pengenalan patogen melalui PRR (Pattern Recognition Receptors)
- Aktivasi inflamasi
- Produksi sitokin (IL-1, IL-6, TNF- $\alpha$ )

Fungsi Imunitas Innate (Molekuler & Seluler)

**Innate Imun yang berfungsi sebagai Pengenalan Patogen (Pattern Recognition):**

- **Neutrofil**
  - **Makrofag**
  - **Sel dendritik**
  - **Sel Natural Killer (NK)**
- Sel imun mengenali patogen melalui:
- **PRR (Pattern Recognition Receptors)**
  - **TLR (Toll-Like Receptors)**

Contoh:

- TLR4  $\rightarrow$  mengenali LPS bakteri Gram-negatif

**Jalur Inflamasi**

Aktivasi PRR memicu:

- NF- $\kappa$ B pathway
- Produksi sitokin: IL-1, IL-6, TNF- $\alpha$

**Protein Plasma**

- Sistem komplemen
- Protein fase akut

### **Mekanisme Kerja**

Sel-sel imun innate mengenali patogen melalui Pattern Recognition Receptors (PRR), misalnya Toll-Like Receptors (TLR). Setelah patogen dikenali, akan terjadi:

1. Fagositosis
2. Pelepasan sitokin
3. Aktivasi inflamasi
4. Aktivasi sistem komplemen

Sitokin utama yang dilepaskan adalah IL-1, IL-6, dan TNF- $\alpha$ .

## **2. SISTEM IMUN ADAPTIF**

Imunitas adaptif bersifat spesifik dan memiliki memori imunologis.

### **Karakteristik**

- Spesifik terhadap antigen
- Memiliki memori
- Respon sekunder lebih cepat
- Spesifik terhadap antigen
- Memiliki memori imunologis

### **Komponen utama:**

- **Limfosit B** → antibodi

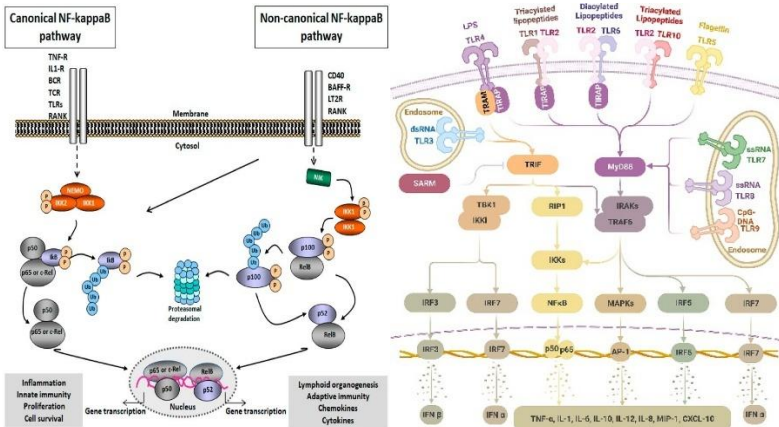
Limfosit B bertanggung jawab terhadap respon imun humoral. Setelah teraktivasi, sel

B berdiferensiasi menjadi sel plasma yang menghasilkan antibodi.

- **Limfosit T** → respon seluler  
Limfosit T berperan pada respon imun seluler. Terdapat dua jenis utama:
  - Sel T helper (CD4+)
  - Sel T sitotoksik (CD8+)

**Karakteristik:**

- Spesifisitas tinggi
- Memori jangka panjang
- Respon sekunder lebih cepat



Gambar 8. 1. Komponen sistem Imun Adaptif

**C. Sel-Sel Sistem Imun**

Beberapa sel penting dalam sistem imun antara lain:

- **Neutrofil** → fagositosis bakteri

- **Makrofag** → fagositosis dan presentasi antigen
- **Limfosit B** → produksi antibodi
- **Limfosit T helper (CD4<sup>+</sup>)** → mengatur respon imun
- **Limfosit T sitotoksik (CD8<sup>+</sup>)** → membunuh sel terinfeksi
- **Sel dendritik** → penyaji antigen utama

## PRESENTASI ANTIGEN & MHC

### MHC Kelas I vs II

Tabel 8. 1. Molekul dan Fungsi MHC

<b>Molekul</b>	<b>Fungsi</b>	<b>Target</b>
MHC I	Presentasi antigen endogen	Sel T CD8 <sup>+</sup>
MHC II	Presentasi antigen eksogen	Sel T CD4 <sup>+</sup>
	<p><b>PRESENTASI ANTIGEN (MHC)</b></p> <p><b>MHC Kelas I</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menyajikan antigen endogen</li> <li>• Aktivasi sel T CD8<sup>+</sup></li> </ul> <p><b>MHC Kelas II</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menyajikan antigen eksogen</li> <li>• Aktivasi sel T CD4<sup>+</sup></li> </ul>	

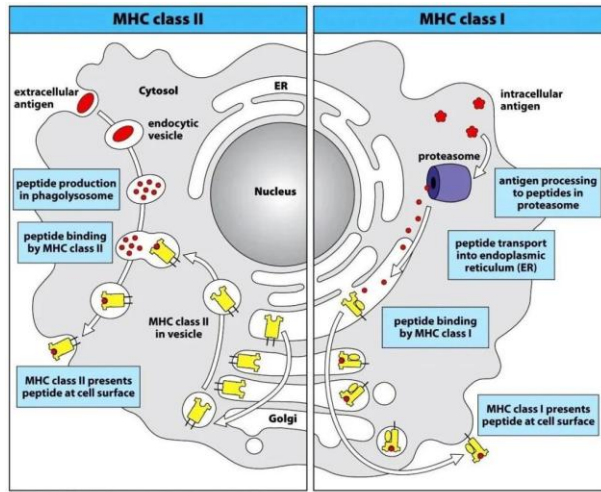


Figure 5.20 The Immune System, 3ed, (© Garland Science 2009)

Gambar 8. 2. Komponen sistem Imun Adaptif

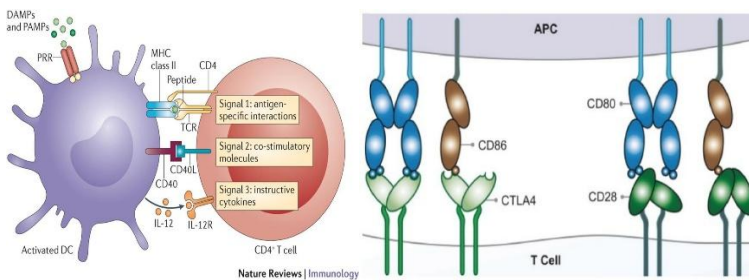
## AKTIVASI LIMFOSIT T

Immune Synapse

AKTIVASI SEL T

Aktivasi sel T memerlukan 3 sinyal:

1. TCR–MHC
2. Costimulatory (CD28–B7)
3. Sitokin



Gambar 8. 3. Aktivitas Sel T

## **D. Antigen dan Antibodi**

### **1. Antigen**

Zat asing yang dapat merangsang respon imun.  
Contoh: protein pada permukaan bakteri.

### **2. Antibodi (Imunoglobulin)**

Protein yang diproduksi oleh sel B untuk mengenali antigen.

### **3. Fungsi antibodi:**

- Netralisasi
- Oponisasi
- Aktivasi komplemen

### **4. Jenis antibodi:**

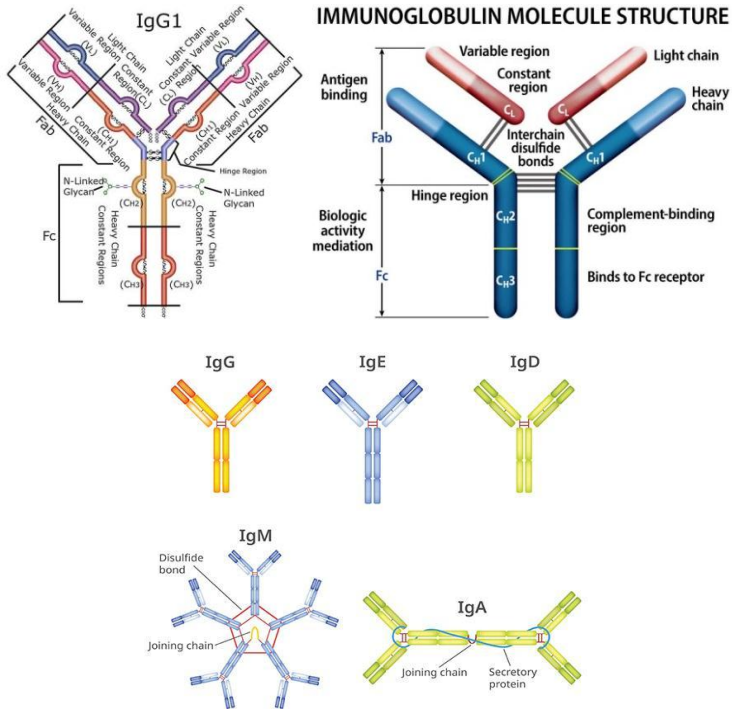
- IgG → paling banyak di darah
- IgA → terdapat di mukosa
- IgM → respon awal
- IgE → alergi
- IgD → fungsi belum sepenuhnya dipahami

## **RESPON IMUN HUMORAL**

### **5. Struktur Antibodi**

Antibodi terdiri dari:

- 2 rantai berat (heavy chain)
- 2 rantai ringan (light chain)
- Fab & Fc region



Gambar 8. 4. Antibodi

## E. Mekanisme Respon Imun

### 1. Respon Imun Humoral

- Melibatkan sel B
- Menghasilkan antibodi
- Efektif melawan patogen ekstraseluler

### 2. Respon Imun Seluler

- Melibatkan sel T
- Menghancurkan sel yang terinfeksi
- Efektif melawan patogen intraseluler

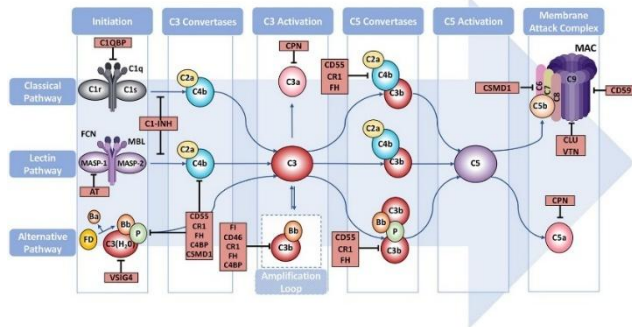
## F. Sistem Komplemen

Sistem komplemen adalah kumpulan protein plasma yang membantu:

- Oponisasi (menandai patogen)
- Lisis sel patogen
- Aktivasi inflamasi

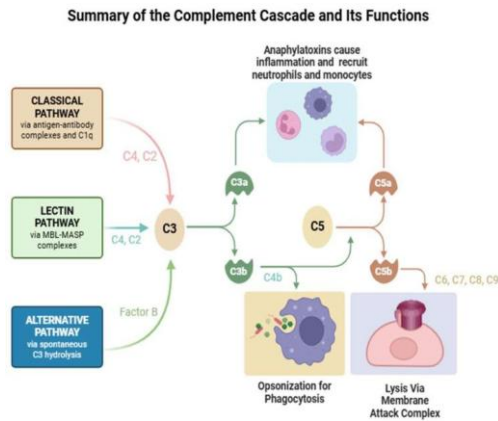
**Jalur Aktivasi SISTEM KOMPLEMEN, ada 3 macam:**

- Jalur klasik



Gambar 8. 5. Jalur Aktivasi Komplemen Klasik

- Jalur alternatif



Gambar 8. 6. Jalur Aktivasi Komplemen Alternatif

## G. Memori Immunologis

Sistem imun adaptif memiliki kemampuan mengingat antigen yang pernah masuk. Hal ini menjadi dasar:

- Vaksinasi
- Respon lebih cepat pada infeksi kedua :  
Primer: sumsum tulang, timus  
Sekunder: limpa, kelenjar limfa

**Organ limfoid** Sistem imun terdiri dari:

- **Organ limfoid primer:** sumsum tulang, timus
- **Timus :** Tempat maturasi limfosit T.
- **Sumsum Tulang :** Tempat pembentukan sel darah dan maturasi limfosit B.
- **Organ limfoid sekunder:** limpa, kelenjar getah bening, MALT
- Limpa
- Kelenjar getah bening
- MALT (Mucosa-Associated Lymphoid Tissue)

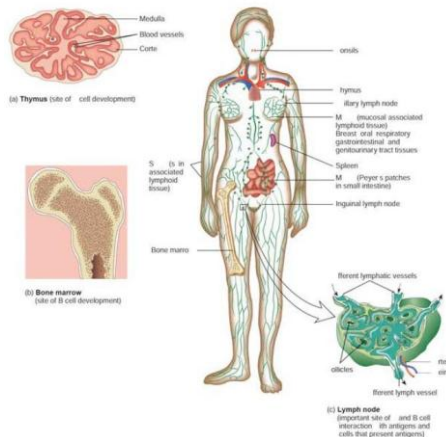
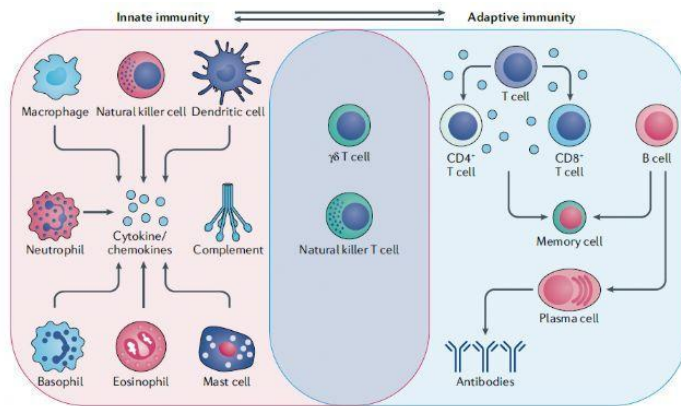


Figure 13.2: The distribution of Lymphoid tissues in the body

Gambar 8. 7. Organ Sistem Limpa

Sistem ini bekerja sebagai jaringan terintegrasi yang memungkinkan:

- Deteksi antigen
- Aktivasi sel imun
- Eliminasi patogen

## Sel-Sel Sistem Imun

Tabel 8. 2. Sel-sel Sistem Imun

Sel	Fungsi
Neutrofil	Fagositosis bakteri
Makrofag	Fagositosis dan presentasi antigen
Sel Dendritik	APC utama
Sel NK	Membunuh sel terinfeksi virus
Limfosit B	Menghasilkan antibodi
Limfosit T	Respon imun seluler

### Diagram Immunologi Kompleks (yang bisa saya tambahkan)

- Jalur aktivasi:
  - Innate → Adaptif
  - Presentasi antigen (MHC I & II)
  - Aktivasi sel T helper & sitotoksik
- Jalur antibodi:
  - Netralisasi
  - Opsonisasi
  - Aktivasi komplemen
- Jalur molekuler detail:
  - MHC I vs MHC II
  - Sitokin (IL-1, IL-6, TNF- $\alpha$ )
  - Signal transduction (NF-kB, JAK-STAT)
- Diagram kompleks:
  - Aktivasi sel T (immune synapse)

- Jalur komplemen (klasik, alternatif, lektin)

## H. Gangguan Sistem Imun

Beberapa gangguan yang dapat terjadi:

### 1. **Imunodefisiensi**

- Sistem imun lemah
- Contoh: HIV/AIDS

### 2. **Autoimun**

- Sistem imun menyerang sel sendiri
- Contoh: lupus

### 3. **Alergi (Hipersensitivitas)**

- Respon berlebihan terhadap antigen
- Contoh: asma, rinitis alergi

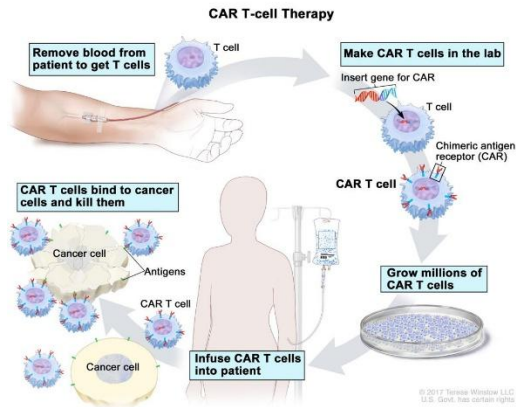
Tabel 8. 3. Tipe dan Mekanisme Alergi

<b>Tipe</b>	<b>Mekanisme</b>	<b>Contoh</b>
I	IgE	Asma
II	Sitotoksik	Anemia hemolitik
III	Kompleks imun	Lupus
IV	Sel T	TB

## I. Aplikasi Immunologi dalam Biomedik

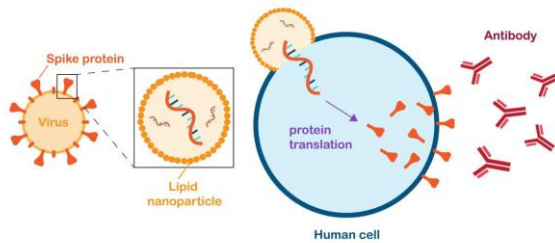
- Vaksinasi
- Terapi antibodi msonoklonal
- Immunoterapi kanker
- Diagnostik penyakit (ELISA, PCR berbasis imun)
- Monoklonal antibodi (anti-TNF, anti-PD1)

- Imunoterapi Modern (CAR-T cell therapy, Vaksin mRNA)



VIROLOGY ●●●

## Mechanism of mRNA Vaccine



Gambar 8. 8. Imunoterapi Modern

## IMUNODEFISIENSI

**Primer :** Terjadi karena faktor Genetik

**Sekunder:** Infeksi HIV dan Malnutrisi

## **J. Kesimpulan**

Sistem imun merupakan sistem kompleks yang melibatkan berbagai sel, jaringan, dan molekul untuk melindungi tubuh dari ancaman eksternal. Pemahaman imunologi dasar sangat penting dalam bidang biomedik karena menjadi dasar dalam pencegahan, diagnosis, dan terapi berbagai penyakit.

## **K. Latihan Soal**

1. Sel yang berperan utama dalam menghasilkan antibodi adalah ...
  - A. Limfosit T
  - B. Makrofag
  - C. Limfosit B
  - D. Neutrofil
2. Imunitas bawaan (innate immunity) ditandai dengan sifat ...
  - A. Spesifik terhadap antigen tertentu
  - B. Memiliki memori imunologis
  - C. Cepat dan nonspesifik
  - D. Lambat tetapi spesifik
3. Organ limfoid primer tempat pematangan limfosit T adalah ...
  - A. Limpa
  - B. Kelenjar getah bening
  - C. Sumsum tulang
  - D. Timus

4. Fungsi utama antibodi adalah ...
  - A. Menghasilkan histamin
  - B. Mengenali dan menetralkan antigen
  - C. Menghancurkan eritrosit
  - D. Membentuk trombosit
5. Sel fagosit utama yang pertama kali datang ke lokasi infeksi akut adalah ...
  - A. Eosinofil
  - B. Limfosit B
  - C. Neutrofil
  - D. Basofil
6. Antigen adalah ...
  - A. Zat yang diproduksi oleh limfosit B
  - B. Zat asing yang dapat memicu respons imun
  - C. Protein yang dihasilkan oleh trombosit
  - D. Enzim yang diproduksi makrofag
7. Jenis antibodi yang paling banyak ditemukan di dalam serum darah adalah ...
  - A. IgA
  - B. IgE
  - C. IgG
  - D. IgM
8. Sistem komplemen berfungsi untuk ...
  - A. Menghambat pembentukan antibodi
  - B. Membantu penghancuran mikroorganisme
  - C. Menghasilkan limfosit baru
  - D. Membentuk eritrosit

9. Sel limfosit T helper (CD4+) berfungsi utama untuk ...
- A. Membunuh sel yang terinfeksi secara langsung
  - B. Membantu mengaktifkan sel imun lain
  - C. Menghasilkan antibodi
  - D. Melakukan fagositosis
10. Reaksi hipersensitivitas tipe I umumnya berhubungan dengan ...
- A. Diabetes melitus
  - B. Tuberkulosis
  - C. Alergi dan asma
  - D. Lupus eritematosus sistemik

## **BAB 9. ONKOLOGI DASAR**

---

### **A. Pendahuluan**

#### **1. Tujuan Pembelajaran**

Setelah mempelajari Bab 9 ini, mahasiswa diharapkan:

- a. Mampu memahami mekanisme dasar terjadinya kanker (karsinogenesis).
- b. Mampu menjelaskan prinsip-prinsip dasar pencegahan kanker berbasis faktor risiko, perubahan gaya hidup, vaksinasi, dan skrining.

#### **2. Capaian Pembelajaran**

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menguraikan konsep karsinogenesis (inisiasi, promosi, progresi) dan hubungan faktor risiko dengan perubahan biologis pada sel.
- b. Menjelaskan peran mutasi gen, perubahan epigenetik, serta disregulasi jalur sinyal dalam transformasi sel normal menjadi sel kanker.
- c. Menjelaskan "hallmarks of cancer" sebagai kerangka pemahaman sifat-sifat utama sel kanker.
- d. Membedakan mekanisme invasi, angiogenesis, dan metastasis.

- e. Menjelaskan prinsip pencegahan primer, sekunder, dan tersier, serta contoh intervensinya pada kanker yang umum.

### **3. Pengertian Kanker Menurut Perkembangan Ilmu**

Kanker adalah sekelompok penyakit yang ditandai oleh pertumbuhan sel abnormal yang tidak terkendali, mampu menginvasi jaringan sekitar, dan pada kondisi tertentu menyebar (metastasis) ke organ jauh. Secara biologis, kanker muncul akibat akumulasi perubahan genetik dan epigenetik yang mengganggu keseimbangan antara proliferasi, diferensiasi, dan kematian sel terprogram. Bab ini membahas mekanisme terjadinya kanker berdasarkan konsep biologi sel dan molekuler, serta prinsip dasar pencegahan kanker pada tingkat individu dan populasi.

Definisi kanker berkembang seiring kemajuan patologi, biologi molekuler, genomik, dan biologi evolusi. Ringkasan definisi penting yang sering dipakai sebagai rujukan adalah sebagai berikut.

- a. Patologi klasik: kanker dipandang sebagai neoplasma ganas, yaitu pertumbuhan jaringan abnormal yang melebihi dan tidak terkoordinasi dengan jaringan normal serta berlanjut meskipun rangsangan pemicu

- dihentikan, dengan karakter invasi dan metastasis (Kumar, Abbas, & Aster, 2020).
- b. Institusional: National Cancer Institute menekankan pembelahan sel abnormal tanpa kontrol yang dapat menginvasi jaringan sekitar dan menyebar melalui darah atau sistem limfe (National Cancer Institute, n.d.).
  - c. Kesehatan masyarakat global: World Health Organization menekankan pertumbuhan sel abnormal yang melampaui batas normal, menginvasi jaringan sekitar, dan/atau menyebar ke organ lain (World Health Organization, 2023).
  - d. Biologi molekuler: kerangka hallmarks of cancer menggambarkan kanker sebagai akuisisi kemampuan fungsional yang memungkinkan sel bertahan hidup, berproliferasi, dan menyebar (Hanahan & Weinberg, 2011; Hanahan, 2022).
  - e. Evolusi: kanker dipahami sebagai populasi sel tertransformasi yang berkembang melalui seleksi alam sehingga muncul heterogenitas dan resistensi (Brown et al., 2023).

## **B. Mekanisme Terjadinya Kanker dan Prinsip Pencegahan**

### **1. Konsep Karsinogenesis: Inisiasi, Promosi, Progresi**

Karsinogenesis adalah proses bertahap perubahan sel normal menjadi sel ganas. Secara klasik, karsinogenesis dibagi menjadi inisiasi, promosi, dan progresi. Tahapan ini membantu menjelaskan hubungan antara faktor risiko dan perubahan biologis pada sel.

#### **a. Inisiasi**

Inisiasi merupakan tahap awal ketika terjadi perubahan permanen pada DNA akibat paparan karsinogen atau kesalahan replikasi. Kerusakan DNA yang tidak diperbaiki dapat menjadi mutasi tetap. Contoh karsinogen tahap inisiasi: senyawa dalam asap rokok, aflatoksin, radiasi ultraviolet, radiasi ionisasi, serta infeksi virus onkogenik (mis. HPV, HBV).

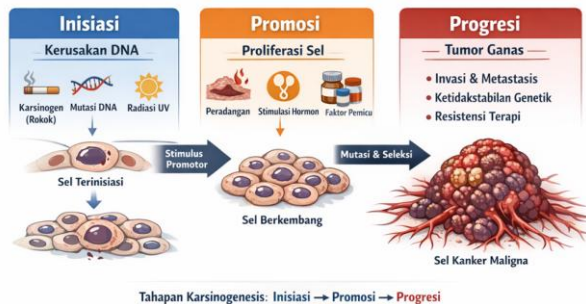
#### **b. Promosi**

Promosi adalah tahap ketika sel yang telah terinisiasi mengalami proliferasi selektif karena stimulus promotor. Promotor sering kali tidak menyebabkan mutasi langsung, tetapi meningkatkan pembelahan sel sehingga peluang akumulasi mutasi bertambah. Promosi sering terkait peradangan kronik,

stimulasi hormon, atau paparan berulang. Tahap ini relatif lebih reversibel bila stimulus promotor dihilangkan.

### c. **Progresi**

Progresi ditandai akumulasi perubahan tambahan yang membuat tumor lebih agresif: pertumbuhan lebih cepat, ketidakstabilan genom meningkat, kemampuan menghindari apoptosis, dan akhirnya invasi serta metastasis. Heterogenitas subklon meningkat sehingga seleksi di dalam tumor mendorong munculnya subklon yang lebih adaptif (mis. lebih invasif atau resisten terapi).



Gambar 9. 1. Kerusakan DNA

## 2. **Faktor Risiko dan Perubahan Biologis pada Sel**

Faktor risiko kanker bekerja melalui beberapa mekanisme biologis, seperti kerusakan DNA, gangguan pengaturan pertumbuhan sel, peradangan kronik, perubahan hormonal, dan

penurunan pengawasan sistem imun. Paparan yang berlangsung lama atau berulang tidak selalu langsung menimbulkan kanker, tetapi dapat meningkatkan peluang terjadinya akumulasi perubahan genetik pada sel.

- a. Tembakau.** Asap rokok mengandung banyak bahan karsinogen. Setelah diaktifkan di dalam tubuh, sebagian zat ini dapat berikatan secara kovalen dengan DNA dan membentuk *DNA adduct*. Bila kerusakan tersebut tidak diperbaiki, saat sel membelah dapat timbul salah pasangan basa yang berakhir sebagai mutasi permanen. Tembakau juga mempertahankan peradangan kronik yang mendukung perkembangan kanker.
- b. Alkohol.** Etanol dimetabolisme menjadi asetaldehida, yaitu senyawa yang bersifat toksik dan karsinogenik. Asetaldehida dapat merusak DNA dan protein, meningkatkan stres oksidatif, serta mempermudah jaringan mulut dan saluran napas menyerap bahan kimia berbahaya lain, terutama dari asap rokok.
- c. Obesitas, pola makan tidak sehat, dan kurang aktivitas fisik.** Jaringan lemak berlebih tidak hanya menyimpan energi, tetapi juga memengaruhi kadar hormon, mediator inflamasi, dan sinyal metabolik. Keadaan ini

dapat meningkatkan proliferasi sel, resistensi insulin, dan menciptakan lingkungan biologis yang mendukung pertumbuhan tumor.

**d. Radiasi ultraviolet dan radiasi ionisasi.**

Radiasi ultraviolet terutama merusak DNA pada sel kulit, sedangkan radiasi ionisasi dapat menyebabkan kerusakan DNA yang lebih luas, termasuk patahan rantai ganda. Jika perbaikan DNA gagal, perubahan tersebut dapat menetap dan mendorong transformasi ganas.

**e. Agen infeksi.** Beberapa virus, bakteri, dan parasit dapat meningkatkan risiko kanker. Mekanismenya antara lain melalui integrasi materi genetik virus, gangguan sinyal pengendali pertumbuhan sel, penurunan fungsi imun, atau peradangan kronik jangka panjang. Contoh yang penting adalah HPV, HBV, HCV, Epstein–Barr virus, dan *Helicobacter pylori*.

**f. Peradangan kronik.** Peradangan yang berlangsung lama menghasilkan sitokin, faktor pertumbuhan, dan radikal bebas yang dapat merusak DNA serta merangsang proliferasi. Karena itu, peradangan kronik sering menjadi jembatan antara faktor risiko lingkungan dan terbentuknya kanker.

**g. Faktor genetik dan riwayat keluarga.**

Sebagian kecil kanker berkaitan dengan kelainan genetik yang diturunkan, misalnya mutasi germline pada BRCA1, BRCA2, atau gen perbaikan DNA lain. Kelainan ini tidak selalu langsung menyebabkan kanker, tetapi membuat sel lebih rentan mengalami perubahan tambahan selama hidup.

**h. Hormon dan immunosupresi.** Pada beberapa kanker, hormon dapat merangsang pertumbuhan sel target, sedangkan immunosupresi menurunkan kemampuan tubuh mengenali dan menghancurkan sel abnormal. Kombinasi keduanya dapat memperbesar peluang berkembangnya keganasan pada individu rentan.

**C. Mutasi Gen, Epigenetik, dan Distegulasi Jalur Sinyal**

Transformasi sel normal menjadi sel kanker terjadi ketika keseimbangan regulasi siklus sel, perbaikan DNA, dan kematian sel terprogram terganggu. Gangguan ini disebabkan oleh mutasi genetik, perubahan epigenetik, serta perubahan pada jalur sinyal yang mengatur pertumbuhan dan bertahan hidup.

## 1. Kelompok Gen Kunci

- a. Proto-onkogen → onkogen: aktivasi menyebabkan sinyal proliferasi berlebihan (contoh: RAS, MYC, EGFR, HER2).
- b. Gen supresor tumor: kehilangan fungsi melemahkan kontrol siklus sel dan stabilitas genom (contoh: TP53, RB1, APC, PTEN).
- c. Gen perbaikan DNA: defek menyebabkan ketidakstabilan genom dan akumulasi mutasi (contoh: BRCA1/2, MLH1/MSH2).

## 2. Perubahan Epigenetik

Perubahan epigenetik (metilasi DNA, modifikasi histon, miRNA) dapat mengubah ekspresi gen tanpa mengubah urutan DNA. Pada kanker, perubahan epigenetik dapat menekan gen supresor tumor atau memperkuat jalur pro-proliferasi.

## 3. Jalur Sinyal yang Sering Terganggu

- a. MAPK (RAS-RAF-MEK-ERK): mendorong proliferasi; sering aktif akibat mutasi RAS/RAF atau aktivasi reseptor.
- b. PI3K-AKT-mTOR: meningkatkan pertumbuhan dan survival; sering aktif akibat mutasi PI3K atau hilangnya PTEN.
- c. WNT/beta-catenin: terganggu pada kanker kolorektal (mis. mutasi APC).

- d. TGF-beta: dapat bersifat supresif pada awal, tetapi dapat mendukung invasi pada progresi.
- e. JAK-STAT dan NF-kB: terkait inflamasi kronik, survival, dan mikro-lingkungan tumor.

#### **D. Hallmarks of Cancer**

Kerangka hallmarks of cancer menjelaskan bahwa berbagai jenis kanker, walaupun berasal dari organ yang berbeda, sering memperlihatkan kemampuan biologis yang serupa. Kerangka ini membantu menghubungkan perubahan gen dan epigenetik dengan perilaku tumor, seperti terus membelah, menghindari kematian sel, membentuk pembuluh darah baru, dan menyebar ke organ lain.

##### **1. Delapan Hallmarks Utama**

- a. Sinyal proliferasi berkelanjutan.** Sel normal membelah hanya bila menerima sinyal pertumbuhan yang sesuai. Sel kanker dapat menyalakan sinyal ini secara terus-menerus, misalnya dengan menghasilkan faktor pertumbuhan sendiri, mengaktifkan reseptor pertumbuhan, atau menghidupkan jalur sinyal di dalam sel tanpa perintah dari luar.
- b. Menghindari supresi pertumbuhan.** Tubuh memiliki "rem" alami untuk menghentikan pembelahan sel yang berlebihan, terutama melalui gen penekan tumor seperti RB dan

TP53. Pada kanker, rem ini dapat rusak sehingga sel tidak lagi mematuhi sinyal yang seharusnya menghentikan pertumbuhan.

- c. Resistensi terhadap kematian sel (apoptosis).** Sel yang rusak berat umumnya akan dieliminasi melalui apoptosis agar tidak membahayakan jaringan. Sel kanker dapat menurunkan sinyal proapoptosis atau meningkatkan sinyal antiapoptosis sehingga tetap bertahan hidup walaupun membawa kerusakan DNA.
- d. Potensi replikasi tanpa batas (immortalitas).** Sebagian besar sel normal memiliki batas jumlah pembelahan karena telomer akan memendek setiap kali sel membelah. Banyak sel kanker mengaktifkan telomerase atau mekanisme lain untuk mempertahankan telomer, sehingga dapat terus bereplikasi dalam jangka panjang.
- e. Induksi angiogenesis.** Tumor yang membesar membutuhkan suplai oksigen dan nutrisi tambahan. Karena itu sel kanker merangsang pembentukan pembuluh darah baru, terutama melalui mediator seperti VEGF, sehingga pertumbuhan tumor dan penyebarannya menjadi lebih mudah.

- f. Aktivasi invasi dan metastasis.** Kanker ganas dapat melepaskan diri dari jaringan asal, menembus membran basal dan stroma, masuk ke pembuluh, lalu membentuk koloni di organ lain. Kemampuan ini membedakan kanker dari lesi pra-kanker dan sangat berperan dalam mortalitas kanker.
- g. Deregulasi metabolisme energi (misalnya efek Warburg).** Banyak sel kanker meningkatkan penggunaan glukosa dan lebih banyak menghasilkan laktat walaupun oksigen masih tersedia. Perubahan ini memberi keuntungan karena menyediakan energi cepat sekaligus bahan baku untuk sintesis komponen sel baru.
- h. Menghindari destruksi imun.** Sistem imun sebenarnya mampu mengenali sel abnormal, tetapi sel kanker dapat menurunkan kemampuan dirinya untuk dikenali atau justru mengubah respons imun agar mendukung pertumbuhan tumor. Karena itu, beberapa kanker dapat bertahan walaupun berada di lingkungan yang kaya sel imun.

## **2. Karakteristik Pendukung**

- a. Instabilitas genom dan mutasi.** Sel kanker cenderung lebih mudah mengalami kesalahan replikasi, kerusakan DNA, atau gangguan

perbaikan DNA. Keadaan ini mempercepat akumulasi mutasi dan memberi “bahan baku” bagi evolusi tumor menjadi semakin agresif.

**b. Inflamasi yang mempromosikan tumor.**

Peradangan kronik menghasilkan sitokin, faktor pertumbuhan, enzim, dan radikal bebas yang dapat merusak DNA, merangsang proliferasi, memfasilitasi angiogenesis, serta membantu sel tumor bertahan hidup.

**3. Mikro-lingkungan Tumor**

Tumor tidak tumbuh sendiri. Di sekitarnya terdapat mikro-lingkungan tumor yang terdiri atas sel imun, fibroblas, pembuluh darah, matriks ekstraseluler, mediator inflamasi, dan berbagai molekul sinyal. Komponen-komponen ini dapat mendukung pertumbuhan tumor, immunosupresi lokal, angiogenesis, invasi, dan metastasis. Perbedaan komposisi mikro-lingkungan juga membantu menjelaskan mengapa respons terapi dapat berbeda antar pasien, bahkan pada jenis kanker yang sama.

**E. Invasi, Angiogenesis, dan Metastasis**

Invasi dan metastasis adalah ciri utama keganasan yang membedakan kanker dari lesi pra-kanker. Proses ini melibatkan perubahan adhesi sel,

degradasi matriks ekstraseluler, migrasi, serta adaptasi pada organ target.

### **1. Invasi Lokal**

- a. Perubahan adhesi: penurunan E-cadherin memudahkan sel lepas dari massa tumor.
- b. Degradasi matriks: peningkatan MMP membuka jalan penetrasi membran basal dan stroma.
- c. Migrasi: perubahan sitoskeleton dan interaksi dengan matriks memungkinkan sel bergerak mengikuti gradien kemokin/faktor pertumbuhan.

### **2. Angiogenesis**

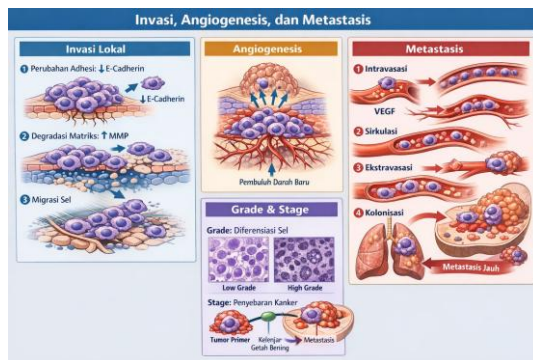
Angiogenesis dipicu terutama oleh hipoksia; hipoksia meningkatkan ekspresi faktor pro-angiogenik seperti VEGF sehingga pembuluh baru terbentuk. Angiogenesis penting karena tumor membutuhkan suplai oksigen/nutrisi dan menyediakan rute penyebaran.

### **3. Metastasis**

Tahapan metastasis meliputi invasi lokal, intravasasi, bertahan di sirkulasi, ekstrasvasi, dan kolonisasi. Keberhasilan metastasis bergantung pada kemampuan sel tumor beradaptasi dengan mikro-lingkungan organ target. Secara klinis, metastasis merupakan penyebab utama mortalitas kanker.

#### 4. Grade dan Stage

Grade menggambarkan derajat diferensiasi dan atipia sel tumor berdasarkan pemeriksaan mikroskopis, sedangkan stage menggambarkan luas penyebaran klinis (ukuran tumor, kelenjar getah bening, metastasis). Perbedaan ini penting untuk interpretasi laporan patologi dan komunikasi klinis.



Gambar 9. 2. Interpretasi laporan patologi dan komunikasi klinis

Penyebaran kanker dimulai dari **invasi lokal**, yaitu ketika sel kanker kehilangan adhesi antarsel, merusak matriks ekstraseluler, dan bermigrasi ke jaringan sekitar. Selanjutnya, tumor merangsang **angiogenesis**, yaitu pembentukan pembuluh darah baru, untuk memenuhi kebutuhan oksigen dan nutrisi sekaligus membuka jalur penyebaran. Proses **metastasis** kemudian berlangsung melalui intravasasi, sirkulasi, ekstravasasi, dan kolonisasi di

organ lain hingga terbentuk metastasis jauh. Secara klinis, perjalanan ini berkaitan dengan **grade** yang menggambarkan derajat keganasan sel dan **stage** yang menunjukkan luas penyebaran kanker.

## **F. Prinsip Pencegahan Primer, Sekunder, dan Tersier**

Pencegahan kanker dibagi menjadi pencegahan primer, sekunder, dan tersier. Pembagian ini memandu intervensi yang sesuai pada tingkat individu, komunitas, dan sistem kesehatan.

### **1. Pencegahan Primer**

- a. Tidak merokok dan menghindari asap rokok (aktif/pasif).
- b. Pola makan sehat (lebih banyak buah-sayur; batasi daging olahan).
- c. Aktivitas fisik teratur dan menjaga berat badan sehat.
- d. Membatasi alkohol.
- e. Proteksi sinar UV untuk mencegah kanker kulit.
- f. Vaksinasi HPV dan hepatitis B.
- g. Pencegahan infeksi kronik dan pengendalian peradangan kronik.
- h. Keselamatan kerja: kontrol paparan karsinogen okupasional dengan rekayasa lingkungan dan APD.

- i. Konseling genetik pada individu berisiko herediter tinggi.

## **2. Pencegahan Sekunder (Deteksi Dini/Skrining)**

- a. Pencegahan sekunder bertujuan menemukan lesi pra-kanker atau kanker stadium awal. Keberhasilan skrining bergantung pada cakupan, kualitas tindak lanjut, dan akses layanan.
- b. Serviks: skrining HPV DNA test/Pap smear sesuai pedoman setempat.
- c. Payudara: mammografi pada kelompok sasaran; edukasi kewaspadaan gejala.
- d. Kolorektal: FIT/FOBT dan/atau endoskopi (sigmoidoskopi/kolonoskopi) pada kelompok sasaran.
- e. Hati pada risiko tinggi (mis. sirosis): surveilans ultrasonografi sesuai rekomendasi klinis.

## **3. Pencegahan Tersier (Survivorship dan Pencegahan Kekambuhan)**

- a. Rehabilitasi dan dukungan nutrisi.
- b. Manajemen efek samping terapi (mis. neuropati, lymphedema).
- c. Modifikasi gaya hidup pasca-diagnosis (berhenti merokok, aktivitas fisik aman).
- d. Surveillance/pemantauan sesuai jenis kanker untuk deteksi kekambuhan.

- e. Perawatan paliatif sebagai bagian dari continuum of care pada kanker lanjut.

## **G. Aplikasi Mikroskopis: Spektrum Lesi Pra-kanker ke Kanker Invasif**

Secara mikroskopis, keganasan ditandai oleh perubahan sitologi (mis. N/C ratio meningkat, hiperkromasia, pleomorfisme, mitosis atipik) dan perubahan arsitektur jaringan (disorganisasi, hilangnya polaritas, pola infiltratif). Contoh berikut menggunakan dua model pembelajaran yang sering dipakai: payudara (ADH → DCIS → invasif) dan kolon (adenoma → adenokarsinoma).

Tabel 9. 1. Template Pencatatan Temuan (Sederhana)

<b>No</b>	<b>Tahap/Diagnosis kerja</b>	<b>Pewarnaan &amp; Perbesaran</b>	<b>Temuan (Arsitektur + Sitologi)</b>	<b>Bukti invasi/Interpretasi</b>
1	...	...	Arsitektur: ... Sitologi: ...	...
2	...	...	Arsitektur: ... Sitologi: ...	...
3	...	...	Arsitektur: ... Sitologi: ...	...

Tabel 9. 2. Contoh Pencatatan: Payudara (ADH – DCIS – Karsinoma Invasif)

<b>No</b>	<b>Tahap /Diagnosis</b>	<b>Pewarnaan &amp; Perbesaran</b>	<b>Temuan (Arsitektur + Sitologi)</b>	<b>Bukti invasi/Interpretasi</b>
1	Normal (TDLU /duktus)	H&E; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: duktus/lobulus rapi; lumen jelas; dua lapis (luminal + mioepitel). Sitologi: inti seragam; N/C ratio normal; mitosis jarang.	Tidak ada invasi; mioepitel utuh.
2	ADH	H&E ± IHK mioepitel; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: proliferasi monomorfik terbatas; pola cribriform/mikropapiler fokal. Sitologi: atipia ringan–sedang; crowding; N/C ratio sedikit meningkat.	Non-invasif; mioepitel masih ada.
3	DCIS (low/intermediate grade)	H&E ± IHK mioepitel; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: duktus melebar terisi sel; pola cribriform/mikropapiler/solid; ± kalsifikasi.	In situ; mioepitel dapat dibuktikan.

No	Tahap /Diagnosis	Pewarnaan & Perbesaran	Temuan (Arsitektur + Sitologi)	Bukti invasi/Interpretasi
			Sitologi: monomorfik sampai atipia sedang; mitosis variabel.	
4	DCIS high-grade + comedo necrosis	H&E; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: duktus distensi; pertumbuhan solid; nekrosis sentral (comedo) ± kalsifikasi. Sitologi: pleomorfisme jelas; hiperkromasia; mitosis meningkat.	Masih in situ; belum invasi stroma.
5	Karsinoma invasif (IDC/NST)	H&E ± ER/PR/HER2, Ki-67; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: sarang/kelenjar ireguler infiltratif di stroma; desmoplasia. Sitologi: N/C ratio meningkat; pleomorfisme; mitosis meningkat; nukleolus menonjol.	Invasif: sel tumor di stroma tanpa mioepitel mengelilingi sarang invasif.

Tabel 9. 3. Contoh Pencatatan: Kolon (Adenoma – Adenokarsinoma)

<b>No</b>	<b>Tahap/ Diagnosis</b>	<b>Pewarnaan &amp; Perbesaran</b>	<b>Temuan (Arsitektur + Sitologi)</b>	<b>Bukti invasi/Interpretasi</b>
1	Mukosa kolon normal	H&E; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: kriptarapi; jarak seragam; banyak sel goblet. Sitologi: inti basal seragam; mitosis terbatas di dasar kriptarapi.	Tidak ada invasi.
2	Adenoma tubular (LGD)	H&E; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: polip dominan tubular glands; crowding kriptarapi. Sitologi: inti memanjang hiperkromatik; pseudostratifikasi; mucin menurun; mitosis meningkat ringan.	Non-invasif; terbatas pada mukosa.
3	Advanced	H&E; 4×, 10×, 40×	Arsitektur: kompleks	Masih non-invasif bila

No	Tahap/ Diagnosis	Pewarnaan & Perbesaran	Temuan (Arsitektur + Sitologi)	Bukti invasi/Interpretasi
	adenoma (villous/tubulovillous atau HGD)		(villous/cribriform); back-to-back glands. Sitologi: atipia lebih berat; kehilangan polaritas; mitosis meningkat; dapat ada nekrosis intralumen.	belum mencapai submukosa.
4	Malignant polyp / pT1 (invasi submukosa)	H&E; 4x, 10x, 20x, 40x	Arsitektur: fokus kanker pada polip; front invasi perlu dipetakan. Sitologi: gland ireguler; dirty necrosis dapat tampak; tumor budding dapat ada.	Invasif dini: menembus muscularis mucosae mencapai submukosa.
5	Adenokarsinoma kolon invasif	H&E ± panel MMR;	Arsitektur: gland infiltratif luas; desmoplasia;	Invasif: melampaui submukosa (mis.

No	Tahap/ Diagnosis	Pewarnaan & Perbesaran	Temuan (Arsitektur + Sitologi)	Bukti invasi/Interpretasi
		4×, 10×, 40×	ulserasi; kedalaman invasi dinilai. Sitologi: pleomorfisme; mitosis meningkat; dirty necrosis; budding; ± LVI/PNI.	muskularis propria/lebih).

## H. Ringkasan

1. Kanker adalah penyakit multi-tahap yang dipicu akumulasi perubahan genetik dan epigenetik serta seleksi subklon sel.
2. Karsinogenesis meliputi inisiasi, promosi, dan progresi; faktor risiko memengaruhi proses ini melalui kerusakan DNA, inflamasi, dan perubahan lingkungan biologis.
3. Basis molekuler melibatkan onkogen, gen supresor tumor, gen perbaikan DNA, epigenetik, dan gangguan jalur sinyal.

4. Hallmarks of cancer membantu memahami perilaku tumor termasuk invasi, angiogenesis, metastasis, dan evasi imun.
5. Pencegahan kanker meliputi primer, sekunder, dan tersier dengan intervensi pada tingkat individu dan populasi.
6. Praktikum mikroskopis menekankan penilaian arsitektur, sitologi, dan penegasan ada/tidaknya invasi.

### **I. Latihan Soal**

1. Seorang pria 55 tahun perokok berat datang dengan batuk kronik. Dokter menjelaskan bahwa paparan karsinogen dalam asap rokok dapat menyebabkan perubahan permanen pada DNA sel epitel bronkus yang menjadi langkah awal terbentuknya kanker. Tahap karsinogenesis yang dimaksud adalah ...
  - A. Inisiasi
  - B. Promosi
  - C. Progresi
  - D. Angiogenesis
  - E. Metastasis
2. Seorang wanita 38 tahun dengan riwayat keluarga kanker payudara menjalani tes genetik dan ditemukan mutasi germline BRCA1. Mutasi ini paling berhubungan dengan gangguan ...

- A. Aktivasi onkogen RAS
  - B. Perbaikan DNA melalui rekombinasi homolog
  - C. Pembentukan VEGF
  - D. Produksi hormon estrogen
  - E. Fagositosis oleh makrofag
3. Pada analisis tumor ditemukan mutasi loss of function pada TP53. Dampak paling langsung dari perubahan ini adalah ...
- A. Peningkatan telomerase dan immortalitas langsung
  - B. Kegagalan henti siklus sel dan/atau apoptosis saat DNA rusak
  - C. Aktivasi WNT akibat mutasi APC
  - D. Penurunan angiogenesis melalui penurunan VEGF
  - E. Penurunan pembentukan aduk DNA oleh karsinogen
4. Pada preparat histologi tampak sel tumor dengan N/C ratio meningkat, hiperkromasia, pleomorfisme, serta mitosis atipik. Temuan ini paling sesuai dengan ...
- A. Metaplasia adaptif
  - B. Displasia ringan yang pasti reversibel
  - C. Ciri sitologi keganasan
  - D. Hiperplasia fisiologis
  - E. Atrofi

5. Pada kanker payudara, pemeriksaan IHC menunjukkan hilangnya lapisan mioepitel di sekitar sarang sel tumor yang ditemukan di stroma. Interpretasi paling tepat adalah ...
  - A. Lesi jinak tanpa risiko
  - B. DCIS (non-invasif)
  - C. Karsinoma invasif
  - D. Hiperplasia duktal biasa
  - E. Papiloma intraduktal
6. Tumor yang mengalami hipoksia meningkatkan ekspresi VEGF sehingga terjadi pembentukan pembuluh darah baru. Fenomena ini disebut ...
  - A. Evasion apoptosis
  - B. Angiogenesis
  - C. Senescence
  - D. Translokasi kromosom
  - E. Aduk DNA
7. Seorang pasien kanker kolon mengalami penyebaran tumor ke hati. Jalur penyebaran yang paling sering berperan pada kasus ini adalah ...
  - A. Penyebaran langsung melalui rongga pleura
  - B. Penyebaran hematogen melalui sistem porta
  - C. Penyebaran melalui saraf perifer
  - D. Penyebaran melalui kanal spinal
  - E. Penyebaran transdermal

8. Seorang wanita 30 tahun belum pernah vaksin HPV. Edukasi pencegahan primer paling tepat untuk menurunkan risiko kanker serviks adalah ...
  - A. Mengonsumsi antibiotik rutin
  - B. Vaksinasi HPV
  - C. Kolonoskopi tahunan
  - D. Kemoterapi profilaksis
  - E. CT-scan berkala
9. Skrining kanker bertujuan menemukan lesi pra-kanker atau kanker stadium awal. Contoh pencegahan sekunder yang paling tepat adalah ...
  - A. Berhenti merokok pada remaja
  - B. Vaksin hepatitis B
  - C. Pap smear/tes HPV secara teratur sesuai pedoman
  - D. Rehabilitasi setelah mastektomi
  - E. Manajemen nyeri kanker lanjut
10. Seorang pasien telah selesai terapi kanker payudara dan menjalani program latihan fisik, berhenti merokok, serta kontrol berkala untuk mendeteksi kekambuhan. Intervensi ini termasuk pencegahan ...
  - A. Primer
  - B. Sekunder
  - C. Tersier
  - D. Kuartern
  - E. Paliatif semata

# **BAB 10. BIOMEDIK DALAM DIAGNOSTIK KLINIS**

---

## **A. Pendahuluan**

1. Tujuan Pembelajaran  
Mahasiswa mampu menerapkan prosedur biomedik dalam diagnostik klinis
2. Capaian Pembelajaran  
Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:
  - a. Menjelaskan bagaimana prinsip-prinsip biomedik diterapkan dalam berbagai subdisiplin pemeriksaan laboratorium

## **B. Dasar Biomolekuler dalam Penyakit**

1. Biomarker  
Biomarker adalah karakteristik yang diukur sebagai indikator dalam proses biologi yang normal, proses patogenik, atau respons dari adanya intervensi. Beberapa jenis biomarker adalah sebagai berikut:
  - a. Biomarker genetik  
Biomarker genetik adalah sekuens DNA yang menyebabkan penyakit atau terasosiasi dengan kerentanan terhadap penyakit tertentu.

- b. Biomarker protein  
Biomarker protein adalah protein yang berada di dalam organisme yang berperan sebagai indikator penyakit dan tahapan perkembangannya.
  - c. Biomarker metabolit  
Biomarker metabolit adalah produk-produk metabolisme seperti asam amino, lipid, dan gula yang digunakan untuk mengukur kondisi biologis termasuk keberadaan penyakit, perkembangannya, dan responsnya terhadap terapi.
  - d. Karakteristik biomarker yang ideal adalah memiliki sensitivitas dan spesifisitas tinggi serta reproduksibilitas yang baik.
2. Patofisiologi sebagai Dasar Interpretasi Hasil
- Patofisiologi mempelajari perubahan fungsi tubuh yang terjadi akibat penyakit. Dalam konteks laboratorium klinis, pemahaman patofisiologi sangat penting untuk menginterpretasikan mengapa suatu parameter laboratorium meningkat atau menurun pada kondisi tertentu. Pendekatan patofisiologis dalam interpretasi hasil laboratorium memungkinkan para dokter untuk tidak hanya sekedar membaca angka, namun juga memahami konteks biologis di balik setiap nilai yang dilaporkan. Hal ini menjadi dasar bagi

evidence-based laboratory medicine, yaitu penggunaan bukti ilmiah terbaik dalam pemilihan, pelaksanaan, dan interpretasi pemeriksaan laboratorium.

## **C. Teknologi Diagnostik Berbasis Nukleat**

### **1. PCR dan Real-Time PCR (qPCR)**

Kedua metode ini merupakan standar emas untuk deteksi gen dan analisis ekspresi gen. *Polymerase chain reaction* (PCR) pada awalnya digunakan untuk mengamplifikasi sekuens DNA dan kemudian dikembangkan menjadi salah satu metode penelitian yang paling penting. Akan tetapi, PCR standar tidak bisa digunakan untuk penelitian kuantitatif. Oleh karena itu, dikembangkanlah lagi metode baru yang dinamakan real-time PCR. Real-time PCR, yang juga dikenal dengan nama PCR kuantitatif, dapat memonitor progress dari proses PCR secara real-time. Satu keuntungan dari real-time PCR dibandingkan dengan PCR konvensional adalah bahwa teknik ini memberikan hubungan kuantifikasi yang bisa diandalkan antara jumlah sekuens target awal dengan jumlah ampikon yang terakumulasi pada siklus PCR.

## **2. Next-Generation Sequencing (NGS)**

NGS adalah teknologi baru yang digunakan untuk mensekuens DNA dan RNA serta deteksi varian dan mutasi. Teknologi ini mengkombinasikan keuntungan dari struktur kimia sekuens yang unik, matriks sekuens yang berbeda, serta teknologi bioinformatika. Kombinasi tersebut memungkinkan dilakukannya proses sekuensing yang masif dari sekuens DNA atau RNA dengan panjang yang bervariasi secara paralel atau bahkan sekuensing genom secara keseluruhan dalam waktu singkat.

## **3. Teknologi CRISPR dalam Diagnostik**

CRISPR pada awalnya diidentifikasi sebagai sistem imun adaptif pada bakteri dan archaea untuk melindungi diri dari virus dan plasmid. CRISPR dalam diagnostik adalah aplikasi dari sistem perlindungan diri bakteri ini untuk deteksi sekuens DNA dan RNA spesifik atau biomarker-biomarker lain yang mengindikasikan penyakit-penyakit atau kondisi biologis tertentu. Bagian mendasar dari teknologi ini adalah enzim-enzim Cas yang dapat diprogram. Enzim-enzim ini dipandu oleh sekuens-sekuens RNA pendek yang dikenal dengan nama CRISPR RNA atau single guide RNA, yang mengarahkan protein-protein Cas untuk mengidentifikasi secara presisi dan

berinteraksi dengan asam nukleat target yang komplementer. Setelah berikatan dengan target, enzim Cas yang teraktivasi akan memulai aktivitas nuklease, yang dibarengi dengan sinyal yang dapat terdeteksi.

## **D. Immunoassay dan Diagnostik Protein**

### **1. ELISA dan Western Blotting**

*Enzyme-linked immunosorbent assay* (ELISA) adalah teknik immunoassay enzim yang banyak digunakan pada analisis klinis. Immunoassay enzim sendiri menggunakan properti-properti katalitik dari enzim untuk mendeteksi dan mengkuantifikasi reaksi-reaksi imunologis. Pada prosedur ELISA yang paling umum, aliquot dari sampel yang mengandung antigen (Ag) yang akan dikuantifikasi ditambahkan pada antibodi (Ab) fase solid dan dibiarkan untuk berikatan. Setelah proses pencucian, ditambahkan antibodi yang telah dilabeli dengan enzim sehingga membentuk fase solid „kompleks sandwich“ yang terdiri dari Ab-Ag-Ab-enzim. Antibodi yang tidak berikatan dihilangkan melalui proses pencucian dan substrat enzim ditambahkan. Jumlah produk yang dihasilkan proporsional dengan konsentrasi antigen di dalam sampel. Berbeda dengan ELISA tradisional, metode ELISA kompetitif digunakan

untuk mengukur antigen dengan berat molekuler rendah atau hapten. Dalam format ini, antigen pada sampel berkompetisi dengan antigen yang dilabel untuk berikatan dengan antibodi fase solid yang jumlahnya terbatas. Antibodi spesifik di dalam sebuah sampel juga dapat dikuantifikasi menggunakan prosedur ELISA di mana antigen, dan bukan antibodi, berikatan pada fase solid. Antibodi sekunder yang dilabel dengan enzim yang spesifik dengan antibodi analit kemudian ditambahkan. Format ini, yang dikenal dengan indirect ELISA, umum digunakan untuk mendeteksi antibodi antivirus.

ELISA banyak digunakan dalam uji diagnostik. ELISA dapat dilakukan pada berbagai macam cairan biologis, seperti darah, saliva, urine, susu, cairan cerebrospinal, cairan amniotik, gastric juice, semen, cairan pleural, dan lain-lain.

Western blotting memisahkan, mendeteksi, dan mengidentifikasi protein spesifik di dalam suatu campuran yang kompleks. Teknik ini melibatkan pemisahan protein menggunakan polyacrilamide gel electrophoresis (PAGE). Setelahnya, protein akan diimobilisasi di atas membran nitroselulose atau nilon menggunakan aliran listrik yang menjalankan transfer protein tersebut. Deteksi protein pada membran dilakukan dengan

menggunakan antibodi yang dilabel dengan probes, seperti isotop radioaktif atau enzim. CDC di Amerika tidak lagi merekomendasikan penggunaan assay western blotting untuk diagnostik. Akan tetapi, teknik ini masih digunakan dalam penelitian biomedik untuk identifikasi protein, kuantifikasi, serta analisis post-translational modification. Western blotting memvalidasi studi-studi ekspresi gen, mengkonfirmasi spesifisitas antibodi, dan memeriksa aktivasi jalur persinyalan pada model-model eksperimental. Di dalam laboratorium klinis, assay ini mendukung uji konfirmasi untuk penyakit-penyakit infeksi dan autoimun, deteksi biomarker-biomarker yang spesifik terhadap penyakit tertentu, dan evaluasi ekspresi protein terapeutik pada sistem rekombinan.

## **2. Biosensor Berbasis Antibodi**

Biosensor berbasis antibodi memungkinkan terjadinya analisis yang cepat dan sensitif terhadap banyak patogen dan toksin-toksin yang terasosiasi dengannya. Biosensor adalah alat-alat analitik yang mengkombinasikan ligan biologis dengan transduser sinyal fisika atau kimia. Interaksi biomolekuler yang terekam ditransformasikan menjadi sinyal-sinyal digital yang diinterpretasikan melalui pembacaan yang

dibantu oleh komputer. Hal ini memberikan gambaran bagi pengguna dengan representasi dari interaksi antara entitas ligan dan analit. Banyak format-format sensor yang berbeda digunakan untuk analisis patogen menggunakan antibodi. Contohnya adalah electrochemical, mass-based, magnetic, dan optical. Sensitivitas dari assay-assay ini bergantung pada properti-properti dari transduser dan kualitas antibodi.

### **3. Multiplex Immunoassays**

Multiplex immunoassays memungkinkan kuantifikasi yang simultan dari banyak analit. Dua format assay dasar telah dikembangkan untuk memfasilitasi kuantifikasi simultan dari beberapa antigen sekaligus: planar array assays dan microbead assays. Pada format yang pertama, capture antibodies yang berbeda terlihat pada posisi tertentu di array 2-dimensi. Pada format yang kedua, capture antibodies terkonjugasi pada populasi microbeads yang berbeda, yang dapat dibedakan berdasarkan intensitas fluoresensi pada flow cytometer. Akurasi dari kuantifikasi multiplex immunoassays bergantung pada kualitas kurva kalibrasi, yang ditentukan oleh hal-hal sebagai berikut: prosedur curve-fitting yang benar, assay imprecision, recoveries, dan linearitas assay.

## **E. Bionstrumentasi dan Point-of-Care Testing**

### **1. Lab-on-a-Chip dan Mikrofluida**

Teknologi mikrofluida dan lab-on-a-chip telah memiliki dampak yang besar untuk penelitian dasar, preklinis, dan klinis, terutama di bidang hematologi dan biologi vaskuler karena mikrofluida memiliki kemampuan untuk meniru kondisi aliran fisiologis pada pembuluh darah dan kapiler. Sistem mikrofluida dapat didesain untuk lebih dapat meniru kondisi in vivo dengan menggunakan material yang relevan secara fisiologis, seperti biomolekul, protein matriks ekstraseluler, atau hidrogel. Teknologi mikrofluida dapat didesain untuk menginkorporasi sinyal-sinyal biologi, seperti molekul-molekul persinyalan dan protein pada permukaan sel. Penggabungan sel-sel hidup dengan desain sistem mikrofluida dan pendekatan organ-on-a-chip dapat pula membantu untuk meniru lebih baik kondisi-kondisi in vivo dan patofisiologi penyakit.

### **2. Biosensor Elektrokimia**

Biosensor elektrokimia berfungsi untuk menganalisis konten dari sebuah sampel biologis karena adanya konversi langsung dari kondisi-kondisi biologis menjadi sinyal-sinyal elektronik. Biosensor secara umum terdiri dari komponen-

komponen sebagai berikut: a) bioreseptor yang secara spesifik berikatan dengan analit; b) interface architecture di mana kondisi biologis yang spesifik terjadi dan memicu terbentuknya sinyal yang dikenali oleh c) elemen transduser; sinyal transduser kemudian diubah menjadi sinyal elektronik dan diamplifikasi sirkuit detektor menggunakan referensi tertentu dan dikirim untuk diproses oleh misalkan d) software komputer untuk kemudian diubah menjadi parameter fisika yang bermakna yang mendeskripsikan proses yang sedang terjadi. Elemen umum yang bisa dikenali yang digunakan dalam biosensor adalah: enzim, asam nukleat, antibodi, sel utuh, dan reseptor. Di antara itu semua, enzim adalah yang paling umum. Pada saat ini, banyak biosensor telah ditemukan di laboratorium-laboratorium di seluruh dunia dan digunakan sebagai alat diagnostik dalam point-of-care testing. Salah satu contohnya adalah sensor glukosa.

#### **F. Teknologi Pencitraan Medis (*Imaging*)**

Teknologi pencitraan medis merupakan salah satu pilar utama dalam diagnostik klinis modern. Signifikansi pencitraan terletak pada kemampuannya untuk memberikan visualisasi non-invasif dari

struktur internal tubuh manusia, yang memungkinkan dokter untuk mendeteksi anomali, merencanakan intervensi bedah, dan memantau respons terapi. Kontribusi bidang biomedik dalam area ini sangat krusial, berfokus pada peningkatan resolusi gambar, kecepatan akuisisi data, dan transisi dari sekedar pencitraan struktural menuju pencitraan fungsional dan molekuler.

#### 1. Inovasi dalam Radiologi

Radiologi konvensional, seperti Sinar-X dan standard Computed Tomography (CT), secara tradisional berfokus pada penyediaan detail anatomi resolusi tinggi. Meskipun sangat berguna, pencitraan struktural murni memiliki keterbatasan. Seringkali perubahan morfologis baru terlihat pada tahap lanjut penyakit. Inovasi biomedik telah memajukan modalitas ini untuk memberikan data fungsional, yang mencerminkan proses fisiologis seperti aliran darah, metabolisme jaringan, atau difusi air.

#### 2. Pencitraan Molekuler (Molecular Imaging)

Pencitraan molekuler mendefinisikan batas baru dalam diagnostik biomedik. Berbeda dengan pencitraan radiologis konvensional yang mendeteksi perubahan makroskopis, pencitraan molekuler memvisualisasikan proses biologis, seluler, dan molekuler spesifik secara *in vivo*. Hal

ini dimungkinkan melalui penggunaan agen kontras khusus yang dirancang untuk berikatan dengan target molekuler tertentu.

### **G. Latihan Soal**

1. Karakter manakah yang harus dimiliki oleh sebuah biomarker yang ideal?
  - A. Biaya produksi yang rendah
  - B. Memerlukan waktu analisis yang lama
  - C. Memiliki sensitivitas dan spesifisitas yang tinggi
  - D. Hanya dapat ditemukan pada satu jenis cairan tubuh
  - E. Tidak memerlukan proses reproduksibilitas
2. Mengapa pemahaman patofisiologis sangat penting bagi dokter dalam konteks laboratorium klinis?
  - A. Untuk mempermudah proses administrasi rumah sakit
  - B. Agar dapat menginterpretasikan konteks biologis di balik setiap nilai laboratorium yang dilaporkan
  - C. Untuk menggantikan peran teknologi diagnostik berbasis asam nukleat
  - D. Hanya untuk mempercepat waktu pemeriksaan sampel

- E. Agar dokter tidak perlu membaca angka hasil laboratorium
3. Apa keunggulan utama *real time* PCR (qPCR) dibandingkan dengan PCR konvensional?
- A. qPCR jauh lebih murah daripada PCR konvensional
  - B. qPCR hanya dapat digunakan untuk analisis kuantitatif
  - C. Memberikan hubungan kuantifikasi yang dapat diandalkan antara jumlah sekuens target awal dengan ampikon yang terakumulasi
  - D. qPCR tidak memerlukan enzim polimerase dalam prosesnya
  - E. qPCR hanya dapat mendeteksi RNA, bukan DNA
4. Teknologi yang memungkinkan proses sekuensing genom secara keseluruhan dalam waktu singkat melalui sekuensing paralel yang masif adalah ....
- A. ELISA
  - B. Western blotting
  - C. Sinar-X konvensional
  - D. Next-Generation Sequencing (NGS)
  - E. Biosensor Elektrokimia
5. Dalam teknologi CRISPR, komponen yang bertugas mengarahkan protein Cas untuk

mengidentifikasi target asam nukleat secara presisi adalah ....

- A. Enzim polymerase
  - B. Isotop radioaktif
  - C. CRISPR RNA atau single guide RNA
  - D. Matriks sekuens unik
  - E. Transduser sinyal fisika
6. Struktur "kompleks sandwich" yang terbentuk pada prosedur ELISA yang paling umum terdiri dari ....
- A. Antigen-Antibodi-Enzim
  - B. Antibodi-Antibodi-Substrat
  - C. Antibodi-Antigen-Antibodi-Enzim
  - D. DNA-RNA-Enzim
  - E. Antigen-Substrat-Enzim
7. Apa rekomendasi CDC di Amerika Serikat terkait penggunaan Western Blotting saat ini?
- A. Menjadikannya standar emas untuk semua diagnosis
  - B. Tidak lagi merekomendasikannya untuk penggunaan diagnostik
  - C. Hanya boleh digunakan untuk mendeteksi virus pada tumbuhan
  - D. Digunakan sebagai pengganti utama PCR
  - E. Merekomendasikannya sebagai satu-satunya uji konfirmasi autoimun

8. Komponen biosensor yang berfungsi untuk mengubah kondisi biologis yang spesifik menjadi sinyal yang dapat dikenali disebut ....
- A. *Software* komputer
  - B. Matriks ekstraseluler
  - C. Elemen transduser
  - D. Cairan serebrospinal
  - E. Sinar-X
9. Teknologi mikrofluida dan lab-on-a-chip sangat berdampak pada bidang hematologi karena kemampuannya untuk ....
- A. Memproduksi antibodi dalam jumlah masif
  - B. Menggantikan peran dokter bedah dalam intervensi
  - C. Meniru kondisi aliran fisiologis pada pembuluh darah dan kapiler
  - D. Mengeliminasi kebutuhan akan sampel darah
  - E. Melakukan sekuensing DNA tanpa bantuan komputer
10. Perbedaan utama antara pencitraan molekuler (*molecular imaging*) dengan radiologi konvensional adalah ....
- A. Pencitraan molekuler hanya menggunakan sinar-X
  - B. Radiologi konvensional memvisualisasikan proses seluler secara *in vivo*

- C. Pencitraan molekuler memvisualisasikan proses biologis, seluler, dan molekuler spesifik secara *in vivo*
- D. Radiologi konvensional tidak memberikan detail anatomi
- E. Pencitraan molekuler hanya berfokus pada perubahan makroskopis

# **BAB 11. ETIKA DAN PERKEMBANGAN ILMU BIOMEDIK**

---

## **A. Pendahuluan**

Ilmu biomedik bukan sekadar kumpulan data laboratorium atau deretan kode genetik; ia adalah upaya manusia untuk memahami esensi kehidupan itu sendiri. Seiring dengan transisi dari era kesehatan konvensional menuju era kesehatan presisi, batas-batas kemungkinan teknis terus bergeser. Kita kini mampu menyunting genom, menumbuhkan organ di luar tubuh, hingga menggunakan kecerdasan buatan untuk memprediksi masa depan kesehatan seseorang.

Namun, setiap lompatan teknologi membawa bayang-bayang dilema moral. Pertanyaan mendasar yang harus dijawab oleh setiap ilmuwan biomedik bukanlah "Dapatkah kita melakukannya?", melainkan "Haruskah kita melakukannya?". Bab ini akan membedah evolusi ilmu biomedik dan bagaimana etika berfungsi sebagai navigasi moral yang memastikan bahwa setiap kemajuan sains tetap berlandaskan pada penghormatan terhadap martabat manusia dan keadilan sosial.

### **1. Tujuan Pembelajaran**

Mahasiswa mampu menyintesis prinsip-prinsip bioetika universal dengan dinamika

perkembangan teknologi biomedik digital dan molekuler guna merancang serta mengevaluasi riset translasional yang inovatif, berintegritas, dan menjunjung tinggi nilai humanisme serta kearifan lokal

## **2. Capaian Pembelajaran**

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini, diharapkan mahasiswa mampu:

1. Mengimplementasikan empat pilar utama bioetika (*Otonomi*, *Beneficence*, *Non-Maleficence*, dan *Justice*) sebagai navigasi moral untuk melindungi martabat manusia dan mencegah reduksionisme biologis dalam riset maupun praktik klinis.
2. Mengevaluasi risiko privasi genetik dan kepemilikan data biologis di era *Big Data*, serta menerapkan prinsip transparansi melalui *Informed Consent* dinamis guna mencegah stigmatisasi dan diskriminasi genetik.
3. Mengintegrasikan inovasi teknologi kesehatan (seperti AI dan *Precision Medicine*) dengan nilai humaniora serta kearifan lokal (*ethnoscience*) untuk menciptakan solusi kesehatan masyarakat yang inklusif, etis, dan aplikatif.

## **B. Isu Etik dalam Ilmu Biomedik: Fondasi Moral Sains**

Mempelajari ilmu biomedik bagi mahasiswa kesehatan sering kali bermula dari kekaguman terhadap presisi mekanisme fisiologis, seperti logika replikasi DNA, gerak protein, hingga kompleksitas homeostasis yang menjaga keseimbangan tubuh manusia. Namun, di balik visualisasi mikroskopis yang menakjubkan, isu etik harus dipahami bukan sekadar sebagai hambatan birokrasi atau peraturan administratif, melainkan sebagai dialektika eksistensial antara ambisi kemajuan teknologi dan kewajiban suci untuk melindungi martabat manusia. Etika berfungsi sebagai navigasi moral sekaligus benteng terakhir agar sains tidak terjebak dalam reduksionisme biologis, sebuah cara pandang sempit yang mereduksi keajaiban eksistensi manusia menjadi sekadar sekumpulan data molekuler, urutan basa nitrogen, atau statistik dalam algoritma digital.

Memasuki era pasca-genomik, kemampuan manusia untuk melakukan intervensi langsung pada unit terkecil kehidupan menuntut tanggung jawab yang lebih besar agar subjek penelitian tidak lagi dipandang sebagai "objek biologis" yang pasif. Pendekatan humanis mengajak para calon ilmuwan dan praktisi kesehatan untuk menyadari bahwa setiap individu memiliki hak otonomi, narasi hidup, dan identitas budaya yang harus dihormati sepenuhnya.

Oleh karena itu, setiap penemuan yang dihasilkan di meja laboratorium (*bench*) harus mampu ditranslasikan ke sisi tempat tidur pasien (*bedside*) dengan tetap berpijak pada nilai-nilai kemanusiaan dan integritas ilmiah yang absolut guna mencegah dampak fatal pada kebijakan klinis di masa depan.

Dalam tataran aplikatif, perkembangan teknologi kesehatan modern harus menempatkan AI sebagai *Augmented Intelligence* yang memperkuat diagnosis klinis tanpa menghilangkan empati dan sentuhan manusiawi. Implementasi nyata dalam riset penanggulangan stunting membuktikan bahwa inovasi biomedik akan jauh lebih berdaya guna jika disinergikan dengan *ethnoscience* atau kearifan lokal, di mana peneliti memposisikan diri sebagai mitra masyarakat yang menghargai pengetahuan tradisional. Dengan mengintegrasikan kepekaan terhadap keadilan sosial dan integritas akademik, perkembangan ilmu biomedik diharapkan mampu melangkah maju demi mewujudkan kemaslahatan umat manusia seutuhnya. Untuk mengoperasionalkan dialektika antara teknologi dan martabat tersebut, praktik biomedik harus berpijak pada **Empat Pilar Utama Bioetika** sebagai kompas moral universal.

## 1. Empat Pilar Utama Bioetika

Dalam setiap intervensi kesehatan, peneliti dan klinisi wajib berpijak pada empat prinsip moral universal:

### a. **Autonomy (Otonomi): Menghargai Kedaulatan Manusia**

Otonomi adalah pengakuan bahwa setiap individu adalah "pemilik" sah atas tubuh dan identitas biologisnya sendiri. Dalam biomedik, otonomi sering kali tereduksi menjadi sekadar lembar *Informed Consent*. Namun, secara humanis, otonomi adalah **dialog**.

- **Bukan Sekadar Tanda Tangan:** Peneliti harus memastikan subjek memahami implikasi riset, termasuk risiko jangka panjang terkait privasi genetik.
- **Transparansi Digital:** Dalam pengembangan inovasi seperti aplikasi digital untuk stunting, otonomi berarti memberikan kendali penuh kepada pengguna (seperti ibu dari anak stunting) atas data kesehatan mereka.
- **Hak untuk Menolak:** Menghormati otonomi berarti menerima keputusan subjek untuk mundur dari penelitian kapan saja tanpa rasa takut akan diskriminasi layanan kesehatan.

**b. Beneficence (Berbuat Baik): Kewajiban untuk Membawa Manfaat**

Prinsip ini menuntut peneliti untuk bertindak demi kepentingan terbaik subjek. *Beneficence* bersifat aktif; ia tidak cukup hanya dengan "tidak menjatuhkan", tetapi harus "mengangkat".

- **Kesejahteraan Holistik:** Setiap tindakan biomedik, mulai dari pemberian edukasi gizi melalui e-modul hingga intervensi molekuler, harus memiliki tujuan akhir meningkatkan kualitas hidup.
- **Inovasi yang Bertujuan:** Pengembangan teknologi seperti sistem kecerdasan buatan untuk prediksi kesehatan harus dirancang untuk memberikan solusi nyata bagi masalah kesehatan masyarakat, bukan sekadar untuk mengejar kebaruan ilmiah semata.
- **Keseimbangan Risiko-Manfaat:** Peneliti wajib melakukan kalkulasi matematis dan moral untuk memastikan bahwa potensi manfaat yang diterima subjek atau masyarakat jauh lebih besar daripada beban atau ketidaknyamanan yang mereka alami.

**c. Non-Maleficence (Tidak Merugikan):  
Primum Non Nocere**

Jika *Beneficence* adalah tentang berbuat baik, maka *Non-Maleficence* adalah tentang **kehati-hatian**. Prinsip ini mengingatkan kita akan keterbatasan pengetahuan manusia di hadapan kompleksitas biologis.

- **Menghindari Bahaya Psikis:** Kerugian tidak selalu fisik; stigmatisasi akibat label "stunting" atau bocornya data rahasia adalah bentuk bahaya psikis yang harus dihindari.
- **Etika dalam Teknologi Baru:** Dalam menggunakan AI atau teknologi penyuntingan gen, peneliti harus waspada terhadap "bias algoritma" atau efek samping fisiologis yang belum terpetakan, yang dapat merugikan subjek secara sistemik.
- **Integritas Prosedural:** Memastikan semua alat (seperti mikroskop atau perangkat digital) dan protokol laboratorium berada dalam standar tertinggi untuk mencegah malapraktik riset.

#### **d. Justice (Keadilan): Kesetaraan dalam Martabat**

Keadilan adalah pilar yang memastikan bahwa sains tidak menjadi instrumen kesenjangan sosial. Isu etik paling tajam muncul ketika kemajuan biomedik hanya menjadi milik mereka yang berkuasa atau mampu secara finansial.

- **Aksesibilitas Inovasi:** Keadilan menuntut agar inovasi teknologi kesehatan dapat dijangkau oleh masyarakat di tingkat puskesmas, bukan hanya di klinik-klinik elit.
- **Penghormatan terhadap Kearifan Lokal:** Mengintegrasikan *ethnoscience* dan pangan lokal dalam riset biomedik adalah bentuk keadilan budaya, di mana ilmuwan menghargai pengetahuan tradisional sebagai mitra setara dalam sains modern.
- **Distribusi Beban dan Manfaat:** Kelompok rentan tidak boleh terus-menerus dijadikan objek penelitian tanpa mendapatkan akses prioritas terhadap hasil atau teknologi yang dikembangkan dari partisipasi mereka.

## **2. Privasi Genetik dan Kepemilikan Data**

Seiring berkembangnya *Next Generation Sequencing* (NGS), kerahasiaan data genetik

menjadi isu krusial. Informasi genetik seseorang adalah identitas yang paling intim; kebocorannya dapat berujung pada stigmatisasi atau diskriminasi asuransi dan pekerjaan. Pendekatan humanis menuntut transparansi mengenai siapa yang memiliki otoritas atas data biologis tersebut.

Dalam era kedokteran molekuler, data genetik bukan sekadar deretan basa nitrogen (A, T, C, G); ia adalah cetak biru kehidupan yang menyimpan rahasia masa lalu, kondisi kesehatan saat ini, hingga predisposisi penyakit di masa depan.

#### **a. Sifat Unik Data Genetik: Identitas yang Melampaui Individu**

Karakteristik data genetik bersifat **permanen**, di mana kode genetik seseorang tidak berubah sepanjang hayat sehingga risiko kebocoran data dipandang bersifat abadi. Dalam konteks riset dan pelayanan kesehatan, sangat penting untuk menyadari sifat **familialnya**, di mana informasi genetik seorang individu secara otomatis mengandung data biologis orang tua, saudara, hingga anak-anak, sehingga paparan data satu orang berpotensi mengekspos privasi biologis seluruh anggota keluarga. Lebih jauh lagi, kemajuan teknologi seperti *Next Generation Sequencing* (NGS) yang bersifat **prediktif**

dalam mengungkap potensi penyakit sebelum muncul secara klinis membawa beban psikologis tersendiri. Hal ini menuntut penghormatan terhadap "hak untuk tidak mengetahui" sebagai bagian integral dari perlindungan martabat manusia dalam setiap langkah inovasi dan pengabdian kesehatan.

**b. Ancaman Diskriminasi dan Stigmatisasi Genetik**

Kegagalan dalam mempertahankan kerahasiaan data genetik dapat memicu risiko sosial yang masif, termasuk diskriminasi pada sektor asuransi dan pekerjaan di mana pihak asuransi mungkin menolak pertanggungan atau menaikkan premi berdasarkan mutasi genetik seperti BRCA, serta potensi keengganan pemberi kerja untuk merekrut individu yang secara genetik dianggap berisiko menderita penyakit kronis di masa depan. Selain itu, isu ini berkaitan erat dengan stigmatisasi sosial melalui pelabelan genetik yang berisiko mengubah cara pandang masyarakat terhadap individu atau kelompok etnis tertentu hingga berujung pada pengucilan sosial. Dalam ranah riset kesehatan masyarakat, menjaga kerahasiaan ini menjadi sangat krusial untuk memastikan agar

komunitas tertentu tidak merasa terstigmata atau dipandang memiliki "cacat" secara biologis.

**c. Dialektika Kepemilikan Data: Siapakah Pemilik Sel?**

Integrasi konsep biologi sel, biokimia, dan genetika dalam memahami mekanisme molekuler kehidupan membawa kita pada dialektika kepemilikan data yang menjadi titik krusial dalam etika biomedik modern, terutama ketika informasi biologis dari sel manusia ditransformasikan menjadi kode digital di server laboratorium. Isu ini memicu pertanyaan filosofis mengenai siapa pemilik sah atas data tersebut di tengah tantangan komodifikasi biologis, di mana perusahaan bioteknologi sering kali memperlakukan data genetik sebagai aset komersial tanpa pembagian keuntungan yang adil kepada pemilik asal data. Sebagai landasan dalam praktik klinis dan penelitian interdisipliner yang mencakup mikrobiologi, imunologi, dan patologi dasar, penyajian materi yang sistematis menuntut agar setiap subjek riset tetap memegang otoritas penuh atas datanya yang mencakup transparansi mengenai lokasi penyimpanan, pihak yang mengakses, serta

tujuan penggunaannya untuk memastikan bahwa kemajuan teknologi tetap menghargai kedaulatan individu dan tidak mereduksi manusia menjadi sekadar komoditas biologis.

#### **d. Transparansi dan Informed Consent Dinamis**

Pemetaan molekuler yang presisi bagi individu kini menjadi standar baru dalam pelayanan kesehatan, namun kemajuan ini menuntut transparansi sebagai bentuk tertinggi penghormatan terhadap martabat manusia, terutama dalam pengembangan sistem AI kesehatan. Dalam kerangka *precision medicine*, pendekatan konvensional berupa satu tanda tangan di awal penelitian tidak lagi memadai, sehingga diperlukan penerapan Informed Consent Dinamis. Melalui model persetujuan berkelanjutan ini, peneliti memberikan pembaruan secara berkala kepada subjek mengenai pemanfaatan data biologis mereka, memastikan bahwa keterlibatan individu dalam praktik klinis maupun penelitian tetap didasarkan pada kesadaran dan kedaulatan informasi yang utuh.

Di sisi lain, karakteristik profil biologis manusia yang sangat unik dan saling terkait

mengharuskan mahasiswa untuk waspada terhadap fenomena Anonimitas yang Rentan di era *big data*. Meskipun data genetik sering kali dilabeli sebagai "anonim" dalam server laboratorium, teknik komputasi modern kini mampu melacak kembali identitas pemiliknya melalui pola molekuler yang sangat spesifik, membuat proses anonimisasi menjadi semakin sulit dipertahankan secara absolut. Oleh karena itu, penyajian materi ini disusun secara sistematis agar praktisi kesehatan masa depan mampu mengaplikasikan perlindungan data yang lebih ketat demi menjaga keamanan privasi pasien di tengah pesatnya perkembangan teknologi diagnostik digital.

### **C. Riset Biomedik: Menjembatani Laboratorium dan Kemanusiaan**

Riset biomedik sering kali dibayangkan sebagai deretan mikroskop, pipet otomatis, dan tumpukan data sekuensing yang dingin. Namun, hakikat sesungguhnya dari disiplin ini adalah sebuah perjalanan heroik yang dikenal sebagai konsep "***Bench to Bedside***" (dari meja laboratorium ke sisi tempat tidur pasien). Ini bukan sekadar proses teknis, melainkan sebuah jembatan yang menghubungkan

penemuan molekuler paling mendasar dengan detak jantung kehidupan nyata.

### **1. Filosofi Translasional: Dari Molekul ke Manusia**

Riset biomedik yang berakar pada biologi translasional mengintegrasikan eksplorasi mekanisme seluler dan molekuler di laboratorium (*bench*) dengan aplikasi klinis yang nyata bagi pasien (*bedside*). Melalui pemahaman mendalam terhadap proses biokimia dan genetik, temuan ilmiah ini ditransformasikan menjadi solusi presisi seperti diagnostik berbasis AI dan terapi tertarget guna menjaga homeostasis tubuh. Puncaknya, data laboratorium tersebut dikonversi menjadi kebijakan kesehatan masyarakat yang strategis, termasuk inovasi digital dalam penanggulangan stunting, untuk memastikan bahwa kemajuan sains memberikan dampak nyata bagi peningkatan derajat kesehatan dan kemanusiaan.

### **2. Tantangan "Lembah Kematian" (Valley of Death)**

Dunia riset sering kali dihadapkan pada tantangan "*Valley of Death*"; sebuah celah kritis yang memisahkan penemuan laboratorium brilian dengan aplikasi klinis nyata akibat hambatan regulasi, pendanaan, maupun ketidaksiapan sistem. Untuk menjembatani celah ini, diperlukan kesinambungan proses yang dimulai dari riset

dasar (*Basic Research*) untuk mendalami mekanisme seluler dan fisiologi molekuler sebagai fondasi pemahaman kehidupan, yang kemudian divalidasi melalui riset translasional (*Translational Research*) dalam bentuk uji pre-klinis dan pengembangan prototipe. Jika berhasil melampaui fase transisi tersebut, temuan ilmiah akan bermuara pada tahap klinis dan kesehatan masyarakat (*Bedside*), di mana implementasi kebijakan strategis serta aplikasi digital hadir sebagai solusi konkret untuk meningkatkan derajat kesehatan dan memberikan dampak nyata bagi kemanusiaan.

#### **D. Perkembangan Teknologi Kesehatan: Harapan di Era Digital**

Teknologi kesehatan saat ini telah melampaui batas-batas mekanis konvensional dan melesat masuk ke ranah digital serta molekuler yang presisi. Transformasi ini tidak hanya mengubah cara kita mendiagnosis atau mengobati penyakit, tetapi juga mendefinisikan ulang harapan bagi kemandirian kesehatan masyarakat. Di era ini, kemajuan teknologi bukan lagi sekadar alat bantu, melainkan mitra strategis dalam memahami mekanisme biologis yang kompleks untuk mewujudkan kualitas hidup yang lebih baik.

## **1. Kedokteran Presisi dan Omics: Personalisasi Sains Molekuler**

Kedokteran presisi menandai pergeseran paradigma dari pendekatan one-size-fits-all menuju intervensi yang dipersonalisasi berdasarkan variabilitas biologis unik setiap individu. Melalui pemanfaatan teknologi multi-omics yang mencakup analisis genomik untuk memetakan kerentanan genetik, proteomik untuk aktivitas fungsional sel, dan metabolomik untuk jejak biokimia nyata dimana kesehatan manusia dapat dipahami sebagai gangguan sistemik yang terintegrasi, bukan sekadar fenomena tunggal. Integrasi data ini memungkinkan terciptanya tailored therapy yang mampu mengoptimalkan dosis berdasarkan kapasitas metabolik spesifik pasien, memaksimalkan efikasi terapi target, serta meminimalkan risiko efek samping toksik, sehingga transformasi klinis menjadi jauh lebih akurat, efektif, dan aman.

Di balik kecanggihan data digital tersebut, dimensi humanisme harus tetap menjadi landasan utama agar pasien tidak sekadar direduksi menjadi deretan kode molekuler. Dalam perspektif kesehatan masyarakat pengembangan inovasi merupakan langkah strategis untuk mendemokratisasi akses kesehatan agar manfaat

teknologi tinggi dapat dirasakan secara adil oleh masyarakat luas. Dengan menjunjung tinggi martabat individu, kedaulatan data, serta transparansi informasi, kedokteran presisi tidak hanya menawarkan kecanggihan teknis, tetapi juga mewujudkan komitmen moral untuk menjaga otonomi manusia dan meningkatkan derajat kesehatan melalui sains yang inklusif.

## **2. Artificial Intelligence (AI) dalam Diagnosis: Menuju Augmented Intelligence yang Etis**

Integrasi Artificial Intelligence (AI) dalam dunia biomedik harus dipahami sebagai Augmented Intelligence, yakni teknologi yang memperluas kapasitas kognitif klinisi tanpa menggantikan peran fundamental mereka. Di tengah ledakan data molekuler dan klinis yang masif, sistem cerdas hadir sebagai mitra strategis untuk mempercepat deteksi dini dengan tingkat akurasi yang melampaui kemampuan pemrosesan manusia biasa. Alih-alih menjadi substitusi, AI berfungsi sebagai pendamping yang membantu memetakan jalur patologis secara lebih presisi, memastikan bahwa setiap keputusan medis tetap berakar pada analisis data yang komprehensif namun tetap berada dalam kendali penuh otoritas manusia.

Akan tetapi, efikasi teknologi ini tidak boleh mengabaikan aspek etika dan "sentuhan manusia" yang menjadi inti dari praktik kedokteran. Algoritma mungkin mampu memproses data genetik atau citra medis dengan cepat, tetapi ia tidak memiliki empati atau intuisi klinis untuk menangkap nuansa penderitaan pasien yang bersifat non-verbal. Oleh karena itu, prinsip human-in-the-loop sangat krusial guna menjaga akuntabilitas dan menghindari fenomena black box atau bias algoritma. Diagnosis yang humanis menuntut agar setiap saran dari sistem AI tetap diverifikasi melalui penilaian intuitif, sehingga teknologi tetap menjadi alat yang memanusiakan pasien, bukan sekadar mereduksi mereka menjadi deretan kode digital yang kaku.

Secara sistematis, pemahaman mahasiswa diperkuat melalui model pembelajaran interdisipliner yang mengintegrasikan kecanggihan teknologi dengan ilmu kesehatan masyarakat, fisiologi, dan etika profesi secara aplikatif. Dalam ranah ini, penggunaan sistem prediksi berbasis AI melatih mahasiswa untuk melakukan sintesis data kompleks secara cepat, sekaligus mewajibkan mereka melakukan validasi klinis melalui interaksi langsung yang kontekstual.

Dengan memposisikan inovasi digital sebagai instrumen dalam penyelesaian masalah kesehatan nyata, mahasiswa diajak melampaui batas disiplin ilmu tradisional guna membentuk profil praktisi yang tidak hanya fasih secara teknologi, tetapi juga mahir dalam meramu solusi yang inklusif, menghargai kearifan lokal (ethnoscience), dan tetap berpijak pada nilai-nilai kemanusiaan yang luhur.

#### **E. Latihan Soal**

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat (A, B, C, D, atau E).

1. Seorang ibu yang berpartisipasi dalam riset stunting menggunakan aplikasi digital tiba-tiba memutuskan untuk mengundurkan diri dan meminta semua data kesehatan anaknya dihapus karena alasan pribadi. Peneliti menghormati keputusan tersebut tanpa memberikan diskriminasi layanan. Prinsip bioetika manakah yang paling tepat diterapkan dalam kasus ini?
  - A. *Autonomy*
  - B. *Beneficence*
  - C. *Non-Maleficence*
  - D. *Justice*
  - E. Integritas Akademik

2. Sebuah tim riset mengembangkan sistem AI untuk memprediksi risiko stunting. Sebelum diimplementasikan, tim melakukan kalkulasi moral dan matematis untuk memastikan bahwa manfaat yang diterima masyarakat jauh lebih besar daripada risiko gangguan privasi yang mungkin muncul. Tindakan ini mencerminkan pilar...
- A. *Non-Maleficence*
  - B. *Justice*
  - C. *Beneficence*
  - D. *Autonomy*
  - E. *Ethnoscience*
3. Dalam pengembangan sistem diagnosis berbasis AI, peneliti menyadari bahwa data yang digunakan untuk melatih algoritma hanya berasal dari satu kelompok etnis tertentu, sehingga berisiko menghasilkan diagnosis salah bagi kelompok lain. Peneliti kemudian memperbaiki data tersebut untuk menghindari kerugian sistemik. Prinsip apakah yang dijunjung tinggi?
- A. *Non-Maleficence*
  - B. *Autonomy*
  - C. Integritas Prosedural
  - D. *Beneficence*
  - E. Kedaulatan Data

4. Sebuah penemuan obat target hasil riset molekuler yang canggih dipastikan dapat diakses oleh masyarakat di tingkat Puskesmas, bukan hanya di klinik elit, serta mengintegrasikan penggunaan pangan lokal sebagai bagian dari terapi. Hal ini merupakan perwujudan dari...
- A. *Autonomy*
  - B. *Justice*
  - C. *Non-Maleficence*
  - D. *Bench to Bedside*
  - E. *Augmented Intelligence*
5. Seorang pasien menjalani tes *Next Generation Sequencing* (NGS). Hasilnya menunjukkan risiko penyakit genetik yang juga mungkin dimiliki oleh saudara kandung dan anak-anaknya. Kondisi ini menggambarkan sifat unik data genetik yang disebut...
- A. Permanen
  - B. Prediktif
  - C. Familial
  - D. Anonim
  - E. Komoditas
6. Peneliti menginformasikan secara berkala kepada subjek riset mengenai perkembangan pemanfaatan sampel biologis mereka di laboratorium, sehingga subjek tetap memegang

kendali informasi. Model persetujuan ini dikenal sebagai...

- A. *Informed Consent* Statis
- B. *Informed Consent* Dinamis
- C. Persetujuan Administratif
- D. Integritas Prosedural
- E. Kedaulatan Individu

7. Sebuah penemuan molekuler yang brilian di laboratorium gagal mencapai tahap aplikasi klinis pada pasien karena hambatan regulasi yang rumit dan kurangnya pendanaan untuk uji pre-klinis. Fenomena ini disebut...

- A. Reduksionisme Biologis
- B. *Valley of Death*
- C. *Translational Research*
- D. *Bench to Bedside*
- E. *Precision Medicine*

8. Seorang dokter menggunakan sistem AI untuk menganalisis data *multi-omics* pasien guna menentukan dosis obat yang tepat. Meskipun AI memberikan rekomendasi, dokter tetap memverifikasi keputusan tersebut berdasarkan intuisi klinis dan kondisi psikologis pasien. Peran AI di sini adalah sebagai...

- A. *Artificial General Intelligence*
- B. Substitusi Klinis
- C. *Augmented Intelligence*

- D. *Black Box AI*
  - E. *Machine Learning*
9. Dalam riset penanggulangan stunting, peneliti tidak hanya menggunakan parameter biokimia, tetapi juga melibatkan kearifan lokal masyarakat dalam pola asuh dan pangan tradisional sebagai mitra setara. Pendekatan ini merupakan model hibrida yang disebut...
- A. *Multi-Omics*
  - B. *Ethno-Techno-Medicine*
  - C. *Tailored Therapy*
  - D. *Basic Research*
  - E. *Precision Public Health*
10. Pengobatan konvensional sering menggunakan pendekatan "*one-size-fits-all*". Namun, dengan menganalisis produk akhir proses seluler (metabolit) yang mencerminkan interaksi genetik, diet, dan lingkungan, dokter dapat memberikan intervensi yang lebih akurat. Lapisan data biologis ini dipelajari dalam...
- A. Genomik
  - B. Proteomik
  - C. Metabolomik
  - D. Transkriptomik
  - E. Farmakogenomik

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas AK, et al (2021). Cellular and Molecular Immunology. 10th ed. Philadelphia: Elsevier.
- Agarwal, A., Korsak, S., Choudhury, A., & Plewczynski, D. (2023). The dynamic role of cohesin in maintaining human genome architecture. *BioEssays*, 45(10), e2200240.  
<https://doi.org/10.1002/bies.202200240>
- Alberts, B., Bray, D., Hopkin, K., Johnson, A. D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2015). *Essential Cell Biology* (4th ed.). Garland Science.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2017). *Molecular Biology of the Cell* (6th ed.). Garland Science.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2022). *Molecular Biology of the Cell* (7th ed.). Garland Science.
- Alrefaei, A. F., Hawsawi, Y. M., Almaleki, D., Alafif, T., Alzahrani, F. A., & Bakhrebah, M. A. (2022). Genetic data sharing and artificial intelligence in the era of personalized medicine based on a cross-sectional analysis of the Saudi human genome program. *Scientific Reports*, 12(1), 1405.
- Arifin, M. A., Amelia, A. R., & Ismaniar, L. (2020). *Hukum dan Bioetik Dalam Perspektif Etika Dan Hukum Kesehatan*. Deepublish.

- Artika, I.M., Dewi, Y.P., Nainggolan, I.M., Siregar, J.E., Antonjaya, U. (2022). *Real-Time Polymerase Chain Reaction: Current Techniques, Applications, and Role in COVID-19 Diagnosis*. *Genes*, 13, 1-21. <https://doi.org/10.3390/genes13122387>
- Berg, J. M., et al. (2019). *Biochemistry* (9th ed.). W.H. Freeman.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., & Stryer, L. (2019). *Biochemistry* (9th ed.). W.H. Freeman.
- Bernaola-Galván, P., Carpena, P., Gómez-Martín, C., & Oliver, J. L. (2023). Compositional structure of the genome: A review. *Biology*, 12(6), 849. <https://doi.org/10.3390/biology12060849>
- Bishop, M. L. (2020). *Clinical Chemistry: Principles, Techniques, and Correlations*. Wolters Kluwer.
- Blair, J. M. A., Webber, M. A., Baylay, A. J., Ogbolu, D. O., & Piddock, L. J. V. (2015). Molecular mechanisms of antibiotic resistance. *Nature Reviews Microbiology*, 13(1), 42–51. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3380>
- Brooks, G. F., Carroll, K. C., Butel, J. S., Morse, S. A., & Mietzner, T. A. (2019). *Jawetz, Melnick & Adelberg's Medical Microbiology* (28th ed.). McGraw-Hill Education.
- Buja, L. M. (2021). The cell theory and cellular pathology: Discovery, refinements and applications fundamental to advances in biology and

- medicine. *Experimental and Molecular Pathology*, 121, 104660.  
<https://doi.org/10.1016/j.yexmp.2021.104660>
- Byrne, B., Stack, E., Gilmartin, N., O'Kennedy, R. (2009). *Antibody-Based Sensors: Principles, Problems, and Potential for Detection of Pathogens and Associated Toxins*. *Sensors*, 9, 4407-4445.  
<https://doi.org/10.3390/s90604407>
- Cappuccino, J. G., & Welsh, C. (2019). *Microbiology: A Laboratory Manual* (12th ed.). Pearson Education.
- Chaplin DD (2010). Overview of the immune response. *J Allergy Clin Immunol* ;125(2):S3-S23.
- Council for International Organizations of Medical Sciences (CIOMS). (2016). *International Ethical Guidelines for Health-related Research Involving Humans*.  
<https://cioms.ch/publications/product/international-ethical-guidelines-for-health-related-research-involving-humans/>
- Delattre, H., Liebermeister W., & Noor, E. (2025). *Cell Metabolism*. HAL Open Science, 1. DOI: 10.5281/zenodo.8156386
- Delves, et al. (2017). *Roitt's Essential Immunology*. 13th ed. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Deng, M.-Z., et al. (2024). An additional proofreader contributes to DNA replication fidelity in mycobacteria. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences.*  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2400000000>
- Devlin, T. M. (2011). *Textbook of Biochemistry with Clinical Correlations* (7<sup>th</sup> ed.). Wiley-Liss.
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213).
- El-Daly, M. M. (2024). Advances and challenges in SARS-CoV-2 detection: A review of molecular and serological technologies. *Diagnostics*, 14(5), 519. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14050519>
- Eliza, K. (2023). *Lipids and Their Roles in Physiological Processes*. American Journal of Physiology Biochemistry and Pharmacology, 13 (11): 1.
- El-Masry, A. T. (2023). *Carbohydrate Metabolism: Pathways, Regulation, and Physiological Significance*. BioChemistry: An Indian Journal, 17 : 1-2.
- Epigenetic regulation of nuclear receptors: Implications for endocrine-related diseases. (2024). *Genes & Diseases*.  
<https://doi.org/10.1016/j.gendis.2024.101481>
- Extrinsic proofreading. (2022). *DNA Repair*, 117, 103369. <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2022.103369>
- Francis, M. (2023). *Nucleic Acid Metabolism*. International Research Journal of Biochemistry and

Bioinformatics Vol. 13(2): 1. DOI: 10.14303/2250-9941.2022.52

Fu, Q., Zhu, J., Eyk, J.E.V., (2010). *Comparison of Multiplex Immunoassay Platforms*. *Clinical Chemistry*, 56, 314-318.

<https://doi.org/10.1373/clinchem.2009.135087>

Fuxian, L. (2023). *Biomolecules: Unlocking and Paving the Way for a Sustainable Future*. *Research and Reviews: Journal of Chemistry*, 12:1, 31. DOI: 10.4172/2319-9849.12.1.006

Garrett, R. H., & Grisham, C. M. (2017). *Biochemistry* (6th ed.). Cengage Learning.

Gatla, T. R. (2024). An innovative study exploring revolutionizing healthcare with ai: personalized medicine: predictive diagnostic techniques and individualized treatment. *International Journal of Advanced Research and Interdisciplinary Scientific Endeavours*, 1(2), 61-70.

Goldsby RA,et al (2019). *Kuby Immunology*. 8th ed. New York: WH Freeman.

Gordis, L. (2014). *Epidemiology* (5th ed.). Elsevier.

Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., Reimhult, E. (2008). *Electrochemical Biosensors – Sensors Principles and Architectures*. *Sensors*, 8, 1400-1458. <https://doi.org/10.3390/s80314000>

- Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B., & Doebley, J. (2015). *Introduction to Genetic Analysis* (11th ed.). W.H. Freeman.
- Gurkan, U.A., Wood, D.K., Carranza, D., et.al. (2024). *Next generation microfluidics: fulfilling the promise of lab-on-a-chip technologies*. *Lab Chip*, 24, 1867-1874. <https://doi.org/10.1039/D3LC00796K>
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* (14th ed.). Elsevier.
- Hanahan, D. (2022). Hallmarks of cancer: New dimensions. *Cancer Discovery*, 12(1), 31–46. <https://doi.org/10.1158/2159-8290.CD-21-1059>
- Hasanah, M. R., Syarif, A., & Fadillah, N. (2025). The relevance of modern cell theory to the verse of the Qur'an about the creation of living creatures. *Jurnal Hadratul Madaniyah*, 12(2), 82–92.
- Hasin, Y., Seldin, M., & Lusi, A. (2021). Multi-omics approaches to disease. *Genome Biology*. <https://doi.org/10.1186/s13059-021-02407-2>
- High-fidelity DNA polymerase holoenzyme lesion bypass activities. (2025). *Nucleic Acids Research*, 53(13). <https://doi.org/10.1093/nar/gkaf646>
- Huang, C., et al. (2023). Multiplex PCR-based next-generation sequencing for infection diagnosis. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1181348. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1181348>

- Ikwelle , T. A., Ihim, A. C., Ozuruoke , D. F. ., Obi , P. C. ., Obi , C. U. ., Onuora , I. J. ., Chimezie , A. J. ., & Romanus, O. O. . (2025). Multi-Omics Integration in Personalized Medicine: Advancing Laboratory Diagnostics and Precision Therapeutics in the Era of Individualized Healthcare. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 15(5), 132-142. <https://doi.org/10.22270/jddt.v15i5.7112>
- Institute of Biomedical Science (IBMS). (2023). *Biomedical Science Disciplines*. <https://www.ibms.org>
- Iqbal, A., & Ali, S. (2025). *Potential enzyme biomarkers in clinical diagnostics: From theory to practice – A review*. *TSF Journal of Biology*, 3(1), 11–26. <https://doi.org/10.69547/TSFJB.030102>
- James, M. L., & Gambhir, S. S. (2012). *A Molecular Imaging Primer: Modalities, Imaging Agents, and Applications*. *Physiological Reviews*, 2, 897–965. <https://doi.org/10.1152/physrev.00049.2010>.
- Jameson, J. L., Fauci, A. S., Kasper, D. L., Hauser, S. L., Longo, D. L., & Loscalzo, J. (Eds.). (2018). *Harrison's Principles of Internal Medicine* (20th ed.). McGraw-Hill Education.
- Kaszycki, J., & Kim, M. (2025). Epigenetic regulation of transcription factors involved in NLRP3 inflammasome and NF-κB signaling pathways.

- Frontiers in Immunology*, 16, 1529756.  
<https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1529756>
- Ke, Q. (2020). Technological Impact of Biomedical Research. *arXiv*.  
<https://arxiv.org/>
- Kierszenbaum, A. L., & Tres, L. L. (2025). *Histology and Cell Biology: An Introduction to Pathology* (6th ed.). Elsevier.
- Koh, D.-M., & Collins, D. J. (2007). *Diffusion-Weighted MRI in the Body: Applications and Challenges in Oncology*. *American Journal of Roentgenology*, 6, 1622–1635. <https://doi.org/10.2214/AJR.06.1403>
- Koonin, E. V. (2020). The origin and early evolution of eukaryotes in the light of phylogenomics. *Genome Biology*, 21(1), 1–17.  
<https://doi.org/10.1186/s13059-019-1927-1>
- Korać, P., & Matulić, M. (2024). Molecular diagnostics in the postgenomic era. *Bioengineering*, 11(12), 1259.  
<https://doi.org/10.3390/bioengineering11121259>
- Kothinti, R. R. (2024). Artificial intelligence in healthcare: Revolutionizing precision medicine, predictive analytics, and ethical considerations in autonomous diagnostics. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(3), 3395-3406.

- Krieger, J. (2025). *Understanding Protein Metabolism and Its Vital Role in Growth, Repair and Energy*. *Journal of Clinical and Medical Biochemistry*, 11 (2): 1. DOI: 10.35841/2471-2663.25.11.249
- Kshirsagar, N., Pahuja, M., Chatterjee, N. S., & Kamboj, V. P. (2023). Gaps in translating basic science research from bench to bedside. *The Indian journal of medical research*, 158(3), 228–232. [https://doi.org/10.4103/ijmr.ijmr\\_1665\\_22](https://doi.org/10.4103/ijmr.ijmr_1665_22)
- Kumar V, et al (2021). *Robbins and Cotran Pathologic Basis of Disease*. 10th ed. Philadelphia: Elsevier.
- Lee, C., Antonarakis, S. E., Hamosh, A., & Burn, J. (2021). Three decades of the Human Genome Organization. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 185(11), 3314–3321. <https://doi.org/10.1002/ajmg.a.62512>
- Liu, Y., Wen, D., Ho, C., et al. (2023). Epigenetics as a versatile regulator of fibrosis. *Journal of Translational Medicine*, 21, 164. <https://doi.org/10.1186/s12967-023-04018-5>
- Lodish, H., et al. (2021). *Molecular Cell Biology* (9th ed.). W.H. Freeman.
- Lu, Y., Fu, W., Xing, W., Wu, H., Zhang, C., & Xu, D. (2024). Transcriptional regulation mechanism of PARP1 and its application in disease treatment. *Epigenetics & Chromatin*, 17, 26. <https://doi.org/10.1186/s13072-024-00550-w>

- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2021). *Brock biology of microorganisms* (16th ed.). Pearson.
- Marliana, N dan Widhiyasih, R.M. (2018). *Imunoserologi, Bahan Ajar Teknologi Laboratorium Medik (TLM)*. Pusat Pendidikan Sumber Daya Manusia Kesehatan Badan Pengembangan dan Pemberdayaan Sumber Daya Manusia Kesehatan Edisi Tahun 2018, kementerian Kesehatan, Jakarta
- McCollough, C. H., Leng, S., Yu, L., & Fletcher, J. G. (2015). *Dual- and Multi-Energy CT: Principles, Technical Approaches, and Clinical Applications*. *Radiology*, 3, 637–653. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015142631>
- Misteli, T. (2020). The self-organizing genome: Principles of genome architecture and function. *Cell*, 183(1), 28–45. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.08.016>
- Morgan, D. O. (2020). *The cell cycle: Principles of control* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Morley, J., Floridi, L., Kinsey, L., & Elhalal, A. (2020). From what to how: an initial review of publicly available AI ethics tools, methods and research to translate principles into practices. *Science and engineering ethics*, 26(4), 2141-2168.
- Murphy K, Weaver C (2022). *Janeway's Immunobiology*. 10th ed. New York: Garland Science.

- Murphy, K., et al. (2021). Artificial intelligence for good health: a scoping review of the ethics literature. *BMC medical ethics*, 22(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s12910-021-00577-8>
- Murray, C. J. L., et al. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629–655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)
- Murray, P. R., Rosenthal, K. S., & Pfaller, M. A. (2020). *Medical Microbiology* (9th ed.). Elsevier.
- Murray, R. K., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2018). *Harper's Illustrated Biochemistry* (31st ed.). McGraw-Hill Education.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger Principles of Biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman.
- OpenStax. (2022). *Biology 2e*. Rice University. <https://openstax.org/details/books/biology-2e>
- Parham P (2021). *The Immune System*. 5th ed. New York: Garland Science.
- Park, J., et al. (2023). DNA polymerase- $\gamma$  proofreading at near-atomic resolution. *Nature Structural & Molecular Biology*, 30, 722–723. <https://doi.org/10.1038/s41594-023-01001-y>
- Parks, J. (2022). *Introduction to Biomolecules*. Research and Reviews: Journal of Microbiology and

Biotechnology, 11:1, 5. DOI: 10.4172/2320-3528.11.1.003

- Parrish, M. C., Tan, Y. J., Grimes, K. V., & Mochly-Rosen, D. (2019). Surviving in the Valley of Death: Opportunities and Challenges in Translating Academic Drug Discoveries. *Annual review of pharmacology and toxicology*, 59, 405–421. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-010818-021625>
- Pavlova, N. N., & Thompson, C. B. (2021). The emerging hallmarks of cancer metabolism. *Cell Metabolism*, 33(1), 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2020.12.006>
- Pelczar, M. J., Chan, E. C. S., & Krieg, N. R. (2008). *Dasar-Dasar Mikrobiologi, Jilid 1 & 2*. UI Press.
- Pierce, B. A. (2020). *Genetics: A Conceptual Approach* (7th ed.). W.H. Freeman.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2022). *Prescott's Microbiology* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Pritchard, D. J. (2013). *Medical genetics at a glance*. John Wiley & Sons.
- Prusiner, S. B. (1998). Prions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(23), 13363–13383. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.23.13363>
- Qin, D. (2019). *Next-generation sequencing and its clinical application*. *Cancer Biol Med*, 16, 4-10.

<https://doi.org/10.20892/j.issn.2095-3941.2018.0055>

Rahmadani, S. (2026). *Etika dan Hukum Kesehatan*. Penerbit NEM.

Regulation of eukaryotic transcription initiation in response to cellular stress. (2024). *Gene*, *924*, 148616.

<https://doi.org/10.1016/j.gene.2024.148616>

Rolando, J. C., Melkonian, A. V., & Walt, D. R. (2024). The present and future landscapes of molecular diagnostics. *Annual Review of Analytical Chemistry*, *17*(1), 459–474.

<https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-061622-015112>

Sahli, I.T., Erawati, Sudarmi, L *et al.* (2024). *Imunoserologi Untuk Perguruan Tinggi*, Get Press, Padang.

Salman, S. S., Farm, M., Aryani Adami, S. T., Arisanty, D., Setiorini, A., Raudah, S., ... & Kep, M. T. (2024). *Ilmu Biomedik*. CV Eureka Media Aksara.

Sethi, P., Mishra, A. K., Ghosh, S., Singh, K. K., Sharma, S., Stojchevski, R., Avtanski, D., & Sinha, J. K. (2025). Review: *Lipid Metabolism–Signaling Crosstalk in Metabolic Disease and Aging: Mechanisms and Therapeutic Targets*. *Journal of Nutrients MDPI*, *17*: 2. <https://doi.org/10.3390/nul17233699>

Shah, D. (2023). *Biomolecules: The Elements That Make Up Life*. International Research Journal of Basic

- and Clinical Studies, 8:4, 1. DOI: 10.14303/irjbc.2023.55
- Slatko, B. E., Gardner, A. F., & Ausubel, F. M. (2021). Overview of next-generation sequencing technologies. *Current Protocols in Molecular Biology*. <https://doi.org/10.1002/cpmb.59>
- Soedarto, (2007). Kedokteran tropis (Tropical Medicine), Airlangga University Press. Surabaya
- Spinelli, J. B., & Haigis, M. C. (2018). The multifaceted contributions of mitochondria to cellular metabolism. *Nature Cell Biology*, 20(7), 745–754. <https://doi.org/10.1038/s41556-018-0124-1>
- Suriawiria, U. (2005). *Mikrobiologi Dasar*. Papas Sinar Sinanti.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2022). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- The Lancet Digital Health (2021). Digital technologies: a new determinant of health. *The Lancet. Digital health*, 3(11), e684. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(21\)00238-7](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(21)00238-7)
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2022). *Microbiology: An Introduction* (14th ed.). Pearson Education.
- Trapnell, C. (2020). Defining cell types and states with single-cell genomics. *Genome Research*, 30(9),

1195–1207.

<https://doi.org/10.1101/gr.262998.120>

- Tripto, J. (2023). *Exploring the Wonders of Biomolecules: The Building Blocks of Life*. *J Biotechnol Biomater*, 13:6, 1. DOI: 10.4172/2155-952X.1000359
- Tumbelaka, A. R. (2002). Evidence-Based Medicine (EBM). *Sari Pediatri*.  
<https://saripediatri.org>
- Universitas Gadjah Mada. (2022). *Modul Metodologi Penelitian Ilmu Biomedik*.  
<https://mib.fkkmk.ugm.ac.id>
- Vandemeulebroucke T. (2025). The ethics of artificial intelligence systems in healthcare and medicine: from a local to a global perspective, and back. *Pflugers Archiv : European journal of physiology*, 477(4), 591–601.  
<https://doi.org/10.1007/s00424-024-02984-3>
- Vaughn, L. (2022). *Bioethics: Principles, issues, and cases* (5th ed.). Oxford University Press.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2016). *Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level* (5th ed.). Wiley.
- Vyas, S., Zaganjor, E., & Haigis, M. C. (2016). Mitochondria and cancer. *Cell*, 166(3), 555–566.  
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.07.002>
- Walker, M. J. (2025). Conceptualizing Autonomy in Health Care and Policy. In *Handbook of the Philosophy of*

- Medicine* (pp. 919-938). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Wan, Q. (2024). Exploring the intricacies of cell structure: A comprehensive review. *Cellular and Molecular Biology*, 70(3).
- Wardana, T. (2021). Prinsip Etika Biomedik. Universitas Gadjah Mada. <https://etd.repository.ugm.ac.id>
- Watson, J. D., Baker, T. A., Bell, S. P., Gann, A., Levine, M., & Losick, R. (2014). *Molecular Biology of the Gene* (7th ed.). Pearson.
- Whitaker, J.R. (2003). *Enzymes: Function and Characteristics*. Academic Press. 2119-2125.
- World Health Organization. (2023). *World malaria report 2023*. WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086173>
- World Medical Association. (2013). *Declaration of Helsinki*. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>
- Yang, X., Wang, X., Zou, Y., et al. (2023). Characterization of large-scale genomic differences in the first complete human genome. *Genome Biology*, 24, 157. <https://doi.org/10.1186/s13059-023-02995-w>

- Yang, X., Zhu, H., Liu, Y., et al. (2025). The biological function of genome organization. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(18), 9058. <https://doi.org/10.3390/ijms26189058>
- Zhou, Z., Cho, I.-H., Kadam, U.S. (2025). *CRISPR-CAS-Based Diagnostics in Biomedicine: Principles, Applications, and Future Trajectories*. *Biosensors*, 15, 1-38. <https://doi.org/10.3390/bios15100660>

## BIOGRAFI PENULIS

### 1. Siti Ruqayyah, S.Si., M.Sc.



Penulis dilahirkan di Kajang, Malaysia pada tahun 1988 sebagai anak ketiga dari enam bersaudara. Ketertarikan yang mendalam terhadap bidang Ilmu Kedokteran Dasar mendorong penulis untuk melanjutkan pendidikan pada Program Studi Ilmu Kedokteran Dasar dan Biomedis di Fakultas Kedokteran, Universitas Gadjah Mada. Minat akademik penulis kemudian terfokus pada bidang fisiologi, yang secara lebih mendalam ditekuni selama menempuh pendidikan magister (S2) pada tahun 2011.

Saat ini, penulis berperan sebagai dosen tetap pada Program Studi Kedokteran, Fakultas Kedokteran, Universitas Islam Al-Azhar (UNIZAR), Mataram. Dalam menjalankan aktivitas akademiknya, penulis aktif berpartisipasi dalam berbagai kegiatan ilmiah, baik di tingkat nasional maupun internasional. Selain itu, penulis juga secara konsisten berkontribusi dalam publikasi karya ilmiah, serta terlibat dalam penulisan buku ajar dan *book chapter* sebagai bagian dari pengembangan keilmuan dan pendidikan kedokteran.

Email Penulis: [sitiruqayyah@unizar.ac.id](mailto:sitiruqayyah@unizar.ac.id)

## 2. Dara Juliana, S.Pd., M.Si.



Penulis merupakan salah seorang Dosen di Program Studi Kedokteran UPN Veteran Jakarta. Penulis lahir di Kerinci, pada tanggal 05 Juli 1999. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi S1 Kedokteran UPN Veteran

Jakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2020 pada Jurusan Pendidikan Kimia di Universitas Jambi, dan melanjutkan S2 pada tahun 2020 di Institut Pertanian Bogor (IPB) pada bidang konsentrasi Biokimia. Fokus riset penulis saat ini adalah terkait tumbuhan berkhasiat herbal yang bertindak sebagai antioksidan yang mampu menanggulangi beberapa permasalahan medis/kesehatan yaitu terutama pada penyakit degeneratif dan kardiovaskular. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [darajuliana@upnvj.ac.id](mailto:darajuliana@upnvj.ac.id)

Karya Tulis:

1. Optimization of cardamom (*Amomum compactum*) fruit extraction using the Box–Behnken design focused on polyphenol extraction with antioxidant activity
2. Short Communication: Analysis of rhizome color and phytochemical content of 10 accessions of *Curcuma zanthorrhiza* Roxb. in Jambi, Indonesia

3. Optimization of Cardamom Fruit (*Amomum compactum*) Extraction Focused on Total Terpenoid Extraction and Cytotoxic Activity Using Response Surface Methodology

### **3. Fahmi Rizal, S.Si., M.Biomed.**



Penulis merupakan dosen dan akademisi di bidang kimia dan biomedik dengan latar belakang keilmuan dalam Kimia FMIPA dan Ilmu Biomedik (Kimia Klinik) dari Universitas Hasanuddin. Ia lahir di Maros pada 27 Maret 1989.

Saat ini, penulis aktif sebagai dosen di Jurusan D3 Keperawatan Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan dan pernah aktif juga sebagai dosen di Jurusan Kimia Fakultas Teknik serta Program studi Kedokteran Universitas Bangka Belitung.

#### **4. Vicha Nur Fatanah, S.Si., M.Biomed.**



Penulis adalah dosen di Jurusan STR Teknologi Laboratorium Medis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Mandala Waluya. Lahir dan berdomisili di Kendari, saya memfokuskan karier akademik saya

pada pengembangan ilmu kesehatan di bidang Biokimia Medis.

Pendidikan sarjana saya selesaikan di jurusan Kimia Universitas Halu Oleo (2013), kemudian melanjutkan studi magister dalam bidang Ilmu Biomedik di Universitas Gadjah Mada (2018).

Sebagai akademisi, saya berdedikasi untuk mengintegrasikan keahlian biokimia dalam pendidikan dan riset laboratorium medis guna mencetak tenaga kesehatan yang kompeten. Saya terbuka untuk kolaborasi penelitian yang berfokus pada analisis biokimia klinis dan pengembangan diagnostik Kesehatan.

## 5. Diani Sri Hidayati, S.Si., M.Si.



Penulis saat ini bekerja sebagai dosen di Fakultas Kedokteran, Universitas Islam Al-Azhar Mataram NTB sejak tahun 2015. Menempuh S1 pada Prodi Biologi FMIPA, Universitas Mataram (2007-2011) dan S2 pada Prodi Ilmu Kedokteran Dasar, konsentrasi Mikrobiologi, FK Universitas Airlangga (2012-2015).

Karya Tulis:

- Book chapter Bakteriologi 3 (2023)
- Book chapter Biologi Molekuler (2024)
- Aktivitas Antibakteri Kombinasi Ekstrak Daun Belimbing Wuluh (*Averrhoa Bilimbi* L.) dan Daun Kelor (*Moringa Oleifera* L.) terhadap Pertumbuhan *Staphylococcus Aureus* (2025)
- Hubungan Hygiene Sanitasi Pelaku Industri Rumahan Terhadap Cemaran *Eschericia Coli* pada Tahu Khas Lombok (2023)
- The Sensitivity Of Ciprofloxacin And Amoxicillin To Bacteria That Cause Chronic Tonsillitis In West Of Nusa Tenggara Provincial Hospital (2024)
- Soy-Ipoghurt as an antidiabetic on hiperglicemic animal modelling *Rattus norvegicus* (2023)

## 6. Nurhidayanti, S.Si., M.Kes.



Penulis lahir di Kota Palembang, 20 September 1989. Jenjang pendidikan S1 ditempuh di Universitas PGRI Palembang jurusan Biologi dan lulus tahun 2011. Pendidikan S2 ditempuh di Universitas Sriwijaya Palembang jurusan Ilmu Biomedik dengan Bidang kajian ilmu Biologi Kedokteran dan lulus tahun 2014. Saat ini aktif sebagai dosen di Program Studi DIV Teknologi Laboratorium Medis di Universitas Muhammadiyah Ahmad Dahlan Palembang sejak tahun 2017, dan menjabat sebagai Ketua Program Studi. Contact person: 08112648222, email: nuri89\_yanti@yahoo.com

## 7. Suwarny, S.Si., M.Si



Penulis merupakan dosen Tetap pada Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Laboratorium Medis, Fakultas Sains & Teknologi, Universitas Mandala Waluya. Menempuh pendidikan S1 Biologi Fakultas MIPA di Universitas Haluoleo dan S2 Mikrobiologi Medik di Institut Pertanian Bogor. Aktif sebagai peneliti dan telah mempublikasikan karya ilmiah pada jurnal nasional terakreditasi Sinta maupun jurnal internasional bereputasi.

Karya Tulis:

- Buku Kolaborasi: Biologi Molekuler di Dunia Kesehatan (tahun 2024)
- Buku Kolaborasi: Biokimia dan Genetika (Tahun 2025)
- Molecular Identification of Marine Symbiont Bacteria of *Holothuria scabra* from Tanjung Tiram Beach and its Potential as a *Methicilin-Resistant Staphylococcus aureus* Antibacterial agen (Tahun 2023)
- Perancangan Primer Secara *In Silico* Untuk Amplifikasi Gen IGF-1 Menggunakan Aplikasi Bioinformatika (Tahun 2024)

- Penapisan Fitokimia Infusa Daun *Thalassia hemprichii* yang Berpotensi Sebagai Antimikroba (Tahun 2024)
- Identifikasi Molekuler Dan Penapisan Aktivitas Bakteri Endofit Tanaman Lamun Sebagai *Anti Multidrug-Resistant* di Wilayah Peisir Kota Kendari (Tahun 2023)
- Sensitivitas PCR Gen IS6110 Dalam Deteksi *Mycobacterium tuberculosis* Pada Pasien HIV/AIDS dengan BTA Negatif: Studi Validasi Dengan Genexpert (Tahun 2025)

## **8. Erawati, S.Si., M.Si.,**



Penulis lahir di Surabaya tanggal 28 Oktober 1982. Penulis adalah dosen tetap untuk Prodi D3 TLM FTMK Institut Ilmu Kesehatan Bhakti Wiyata Kediri. Menyelesaikan pendidikan SD, SMP, SMU di Kota Kediri, S1 pada Jurusan Biologi di Universitas Airlangga Surabaya dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Kedokteran Dasar, Minat Studi Kedokteran Laboratorium di Universitas Airlangga Surabaya. Penulis menekuni bidang Menulis dengan mengeluarkan karya kerjasama dengan dosen TLM dengan judul buku Imunoserologi TLM penerbit EGC Kedokteran Press di Bab Deteksi Antigen dan Antibodi di tahun 2021. Tahun 2024 penulis juga menghasilkan bab di buku berjudul Imunoserologi untuk Perguruan Tinggi oleh Get Press dan Buku IMLTD.

Saat ini Penulis mengajar di Jurusan Teknologi Laboratorium Medis baik jenjang D3 dan D4 TLM dengan mata pelajaran Imunoserologi, Imunohematologi, Sitohistoteknologi, Mikologi, Biologi Sel dan Biologi Molekuler. Penulis telah menghasilkan karya baik dari hasil Penelitian maupun hasil Pengabdian Masyarakat baik di bidang

Teknologi Laboarotium Medis maupun bidang kesehatan yang lain yang telah dipublikasikan di jurnal penelitian dan jurnal pengabdian masyarakat baik nasional maupun jurnal nasional terakreditasi. Keahlian penulis terutama di bidang Imunoserologi, Imunohematologi dan Bank Darah, Biologi sel dan molekuler serta bidang TLM yang lain. Secara akademik penulis telah menjadi pembimbing PKL, PBL, KKN dan PKMD mahasiswa serta sebagai pembimbing Tugas Akhir Mahasiswa di bidang TLM. No Hp Penulis : 085735697219, email : erawati@iik.ac.id

## 9. Pancawati Ariami, S.Si., M.Ked.Trop



Penulis lahir di Banda Aceh, 12 Juni 1969. Jenjang Pendidikan Sekolah Menengah Analis Kesehatan Mataram, lulus tahun 1988. Melanjutkan jenjang D3 yang ditempuh di AAK Bandung, lulus tahun 1992. S1 Biologi di Universitas Islam Al-Azhar Mataram, lulus tahun 1999. Pendidikan S2 Ilmu Kedokteran Tropis Universitas Airlangga, lulus tahun 2010. Pernah menjabat sebagai Ka-unit Laboratorium, Kaprodi D3 TLM, dan Wakil Direktur I Poltekkes Kemenkes Mataram. Saat ini sebagai dosen di Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes Kemenkes Mataram. Email: [pancaariami2017@gmail.com](mailto:pancaariami2017@gmail.com), telp. +62-87864263455.

Karya Tulis:

- Ariami, P. (2011). Mutasi gen *Plasmodium falciparum* dihydrofolate reductase (*pf dhfr*) codon 108 pada penduduk asli yang menderita malaria falciparum di Puskesmas Meninting Lombok Barat. *Jurnal Kesehatan Prima*, 5(2), 814–823.
- Ariami, P. (2015). Potensi bayam merah (*Amaranthus tricolor* L) sebagai herbal antimitosis pada sel embrio bulu babi (*Diedema antillarum*). *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 2(2).

<https://doi.org/10.32807/jambs.v2i2.38>  
([jambs.poltekkes-mataram.ac.id](http://jambs.poltekkes-mataram.ac.id))

- Ariami, P., Aliefhia, H., Wiadnya, I. B. R., & Dewi, L. B. K. (2025). The effect of rehabilitation duration on serum cortisol levels in narcotics abuser patients at Mutiara Sukma Mental Hospital. *Proceedings OPTIMAL*, 2(1). ([proceedings.optimalbynfc.com](http://proceedings.optimalbynfc.com))
- Ariami, P., Diarti, M. W., & Jiwintarum, Y. (2018). Sensitivitas media Ogawa dan media Lowenstein Jensen terhadap hasil pertumbuhan kuman *Mycobacterium tuberculosis*. *Jurnal Kesehatan Prima*, 8(2), 1322–1335. <https://doi.org/10.32807/jkp.v8i2.54> (ThemeForest)
- Ariami, P., Jubair, J. (2018). Kandungan teh bayam merah (*Amaranthus tricolor* L) dan toksisitas akut pada tikus putih strain Wistar. *Jurnal Analisis Medika Biosains (JAMBS)*, 5(2). ([jambs.poltekkes-mataram.ac.id](http://jambs.poltekkes-mataram.ac.id))
- Ariami, P., Suliastiningsih, H., & Diarti, M. W. (2018). Profil leukosit tikus putih yang diberi air seduhan kelopak bunga rosela merah (*Hibiscus sabdariffa*). *Jurnal Kesehatan Prima*, 9(2), 1534–1545. <https://doi.org/10.32807/jkp.v9i2.75> (ThemeForest)

- Ariami, P., Zaetun, S., Gunaifi, A., & Diarti, M. W. (2022). Kadar ureum, kreatinin, serum iron (SI) dan total iron binding capacity (TIBC) pada pasien chronic kidney disease (CKD) sebelum dan setelah hemodialisis. *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 9(2), 114–120. <https://doi.org/10.32807/jambs.v9i2.279> (JAMBS)
- Basuki, S., Fitriah, Risamasu, P. M., Kasmijati, Ariami, P., Riyanto, S., Hidayat, A., Susilowati, D., Iskandar, Armika, B., Budiono, Dachlan, Y. P., Kanbara, H., & Uemura, H. (2018). Origins and spread of novel genetic variants of sulfadoxine–pyrimethamine resistance in *Plasmodium falciparum* isolates in Indonesia. *Malaria Journal*, 17, Article 475. <https://doi.org/10.1186/s12936-018-2597-6> (Springer Link)
- Danela, S., Sri Gede, L., & Ariami, P. (2019). Kacang kedelai sebagai media alternatif pertumbuhan bakteri *Pseudomonas aeruginosa*. *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 6(1), 73–80. <https://doi.org/10.32807/jambs.v6i1.127> ([jambs.poltekkes-mataram.ac.id](https://jambs.poltekkes-mataram.ac.id))
- Endiyasa, E., Ariami, P., & Urip, U. (2019). Perbedaan kadar glukosa darah metode point of care test (POCT) dengan photometer pada sampel serum di wilayah kerja Puskesmas Jereweh. *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 5(1), 40–44.

<https://doi.org/10.32807/jambs.v5i1.102>  
([jambs.poltekkes-mataram.ac.id](http://jambs.poltekkes-mataram.ac.id))

- Sholihah, A. S., Danuyanti, I. G. A. N., Zaetun, S., Ariami, P., & Resnhaleksmana, E. (2025). Korelasi temuan limfosit plasma biru dengan kadar C-reaktif protein sebagai penunjang dalam diagnosis demam berdarah dengue (Original work published 2022). *Jurnal Kesehatan Andalas*, 11(2), 111–117.  
<https://doi.org/10.25077/jka.v11i2.2032> (Jurnal Kesehatan Andalas)
- Ariami, P., Zaetun, S., Pajenengan, A. F., & Diarti, M. W. (2021). Imunostimulator ekstrak etanol *Anredera cordifolia* terhadap titer Widal *Salmonella typhi* O pada *Rattus norvergicus* galur Wistar. *Poltekita: Jurnal Ilmu Kesehatan*, 15(1), 12–18. <https://doi.org/10.33860/jik.v15i1.413> (Garuda)
- Ariami, P., & Jubair, J. (2018). Kandungan teh bayam merah (*Amaranthus tricolor* L) dan toksisitas akut pada tikus putih strain Wistar. *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 5(2), 114–124.
- Ariami, P., & Rohmi, R. (2014). Pengaruh ekstrak methanol kulit buah manggis (*Garcinia mangostana* L) terhadap pertumbuhan kultur

*Mycobacterium tuberculosis* galur Lombok Timur. *Jurnal Analis Medika Bio Sains*, 1, 39–50.

- Haerunnizam, M., Ariami, P., Manu, T. T., & Dewi, L. B. K. (2025). The effect of chemotherapy on blood cell counts in post-mastectomy breast cancer patients. *Meditory: The Journal of Medical Laboratory*, 13(2), 217–225.
- Kurniawan, S. Y., Ariami, P., & Rohmi, R. (2023). SI PINTER sebagai alat penghitung koloni bakteri penunjang laboratorium mikrobiologi. *Jurnal Biotek*, 11(1), 87–97. <https://doi.org/10.24252/jb.v11i1.35436> (Tes OJS)
- Wiadnya, I. B. R., Astriani, A., Inayati, N., Khusuma, A., & Ariami, P. (2025). Immune response analysis of children with pulmonary TB using immunochromatography test-tuberculosis (ICT-TB). *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 12(1), 7–14.

**10.Dr. rer.medic. Gabriella Gita Febriana, S.Si,  
M.Res**



Penulis merupakan dosen pada program studi S1 Biologi di Universitas Pelita Harapan. Penulis memiliki latar belakang studi S3 dalam bidang ilmu biomedik dari Universität Duisburg-Essen di Jerman. Pada saat ini, penulis memiliki ketertarikan dalam bidang penyakit autoimun, mikrobiologi, dan imunologi.

Karya Tulis:

- Febriana, GG. (2023) Effects of SARS COV-2 mRNA Vaccines on Newly Onset and Relapsing Graves' Disease. Indonesian Journal of Life Sciences, 5, 105-118.

## 11. Dr. Huntari Harahap, M.Biomed.



Penulis adalah seorang akademisi, peneliti, dan praktisi medis yang memiliki fokus mendalam pada bidang Fisiologi Medis dan Kesehatan Masyarakat. Saat ini, beliau mengabdikan diri sebagai Ketua Program Studi Kedokteran di Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan Universitas Jambi (FKIK UNJA). Di sela kesibukan akademiknya, beliau juga aktif menjabat sebagai Kepala Klinik Pratama TAL Medika, sebuah peran yang memungkinkannya untuk tetap berpijak pada realitas klinis di masyarakat.

Huntari mendedikasikan risetnya pada integrasi teknologi digital untuk penanggulangan stunting. Visi inovasinya mewujud dalam pengembangan aplikasi CANTIK UNJA dan prototipe AI StunSmart, yang dirancang untuk mempercepat deteksi dini masalah kesehatan melalui pendekatan yang inklusif dan berbasis data.

Filosofi keilmuannya berakar pada konsep Ethno-Techno-Medicine, sebuah paradigma yang menyinergikan kemajuan teknologi tinggi (*Augmented Intelligence*) dengan kearifan lokal (*ethnoscience*). Melalui pendekatan "Bench to Bedside," Huntari berkomitmen untuk memastikan

bahwa setiap temuan di meja laboratorium dan kecanggihan algoritma digital selalu memiliki "sentuhan manusia" serta memberikan dampak nyata bagi peningkatan derajat kesehatan masyarakat dan kemanusiaan secara utuh.

Bidang Kepakaran & Fokus Riset:

- Fisiologi & Biomedik: Eksplorasi mekanisme homeostasis dan patofisiologi pada tingkat molekuler.
- Inovasi Digital Kesehatan: Pengembangan sistem prediksi berbasis AI dan literasi kesehatan digital.
- Bioetika & Humaniora: Dialektika antara kemajuan teknologi, privasi genetik, dan martabat individu.
- Kesehatan Masyarakat: Penanggulangan stunting melalui pemberdayaan masyarakat dan sinergi interdisipliner.

Afiliasi Profesional:

- Ketua Program Studi Kedokteran, FKIK Universitas Jambi.
- Dosen Departemen Fisiologi, FKIK Universitas Jambi.
- Kepala Klinik Pratama TAL Medika, Jambi.

## BIOGRAFI EDITOR

### **Regina Rengsi Putri Wahyuni, S.Tr.Kes., M.Biomed**



Editor merupakan akademisi dan praktisi di bidang Teknologi Laboratorium Medis yang memiliki kompetensi dalam hematologi, imunologi, kimia klinik, serta pelayanan transfusi darah. Beliau menyelesaikan pendidikan DIV Teknologi Laboratorium Medis di Universitas Katolik

Musi Charitas dengan predikat lulusan terbaik, kemudian melanjutkan studi Magister Ilmu Biomedik konsentrasi Imunologi di Universitas Sriwijaya.

Pengalaman profesionalnya mencakup praktik dan pelayanan laboratorium di rumah sakit, khususnya dalam pemeriksaan hematologi, imunologi, kimia klinik, pengelolaan spesimen biologis, quality control laboratorium, serta penerapan standar operasional dan keselamatan kerja laboratorium. Selain aktif dalam pelayanan kesehatan, beliau juga berkiprah sebagai dosen dan tenaga pendidik laboratorium medis di Universitas Sanz Magnatya dengan fokus pada pengembangan kompetensi akademik dan praktikum mahasiswa.

Dalam bidang akademik, Regina aktif terlibat dalam penelitian dan publikasi ilmiah di bidang biomedik serta kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Pengalaman tersebut menjadi landasan dalam kontribusinya sebagai editor pada penyusunan buku ini, khususnya dalam memastikan

ketepatan ilmiah, sistematika penulisan, dan relevansi materi sesuai perkembangan ilmu kesehatan dan biomedik.

## KUNCI JAWABAN

### BAB 1

1. C
2. C
3. B
4. B
5. C
6. C
7. D
8. B
9. C
10. C

### BAB 2

1. B
2. C
3. C
4. B
5. D
6. B
7. D
8. C
9. B
10. C

### BAB 3

1. A
2. A
3. E
4. B
5. C
6. B
7. D
8. B
9. C
10. B

### BAB 4

1. B
2. B
3. B
4. A
5. B
6. C
7. B
8. B
9. C
10. C

### BAB 5

1. B
2. B
3. C
4. C
5. B
6. C
7. C
8. B
9. C
10. C

### BAB 6

1. C
2. B
3. C
4. D
5. B
6. C
7. B
8. C
9. B
10. C

### BAB 7

1. C
2. C
3. D
4. C
5. C
6. D
7. B
8. D
9. C
10. C

### BAB 8

1. C
2. C
3. D
4. B
5. C
6. B
7. C
8. B
9. B
10. C

**BAB 9**

1. A
2. C
3. C
4. B
5. B
6. C
7. C
8. B
9. C
10. C

**BAB 10**

1. B
2. C
3. B
4. C
5. C
6. C
7. D
8. B
9. C
10. B

**BAB 11**

1. A
2. C
3. A
4. B
5. C
6. B
7. B
8. C
9. B
10. C

## SINOPSIS

Buku ajar *Ilmu Biomedik* disusun sebagai sumber pembelajaran komprehensif yang membahas konsep dasar hingga penerapan ilmu biomedik dalam bidang kesehatan. Buku ini mengawali pembahasan dari ruang lingkup dan peran ilmu biomedik, dilanjutkan dengan pemahaman tentang struktur dan fungsi sel sebagai unit kehidupan. Materi kemudian berkembang ke biomolekul, metabolisme, enzim, serta regulasi biokimia yang mendasari proses tubuh manusia. Selain itu, dibahas pula genetika, biologi molekuler, mikrobiologi, dan imunologi sebagai dasar pemahaman penyakit. Topik onkologi memberikan gambaran awal tentang kanker, sementara penerapan biomedik dalam diagnostik klinis memperkuat relevansi praktis. Buku ini juga menyoroti aspek etika dan perkembangan teknologi biomedik dalam dunia kesehatan modern.

# ILMU BIOMEDIK

Buku ajar Ilmu Biomedik disusun sebagai sumber pembelajaran komprehensif yang membahas konsep dasar hingga penerapan ilmu biomedik dalam bidang kesehatan. Buku ini mengawali pembahasan dari ruang lingkup dan peran ilmu biomedik, dilanjutkan dengan pemahaman tentang struktur dan fungsi sel sebagai unit kehidupan. Materi kemudian berkembang ke biomolekul, metabolisme, enzim, serta regulasi biokimia yang mendasari proses tubuh manusia. Selain itu, dibahas pula genetika, biologi molekuler, mikrobiologi, dan imunologi sebagai dasar pemahaman penyakit. Topik onkologi memberikan gambaran awal tentang kanker, sementara penerapan biomedik dalam diagnostik klinis memperkuat relevansi praktis. Buku ini juga menyoroti aspek etika dan perkembangan teknologi biomedik dalam dunia kesehatan modern.

W  
R  
M  
A  
R  
S

ILMU BIOMEDIK



**PENERBIT**  
PT. Mustika Sri Rosadi

Citra Indah City, Bukit Heliconia AG 23/32, Desa  
Singajaya, Kecamatan Jonggol, Kabupaten Bogor

ISBN 978-634-7535-90-0 (PDF)



9

786347

535900