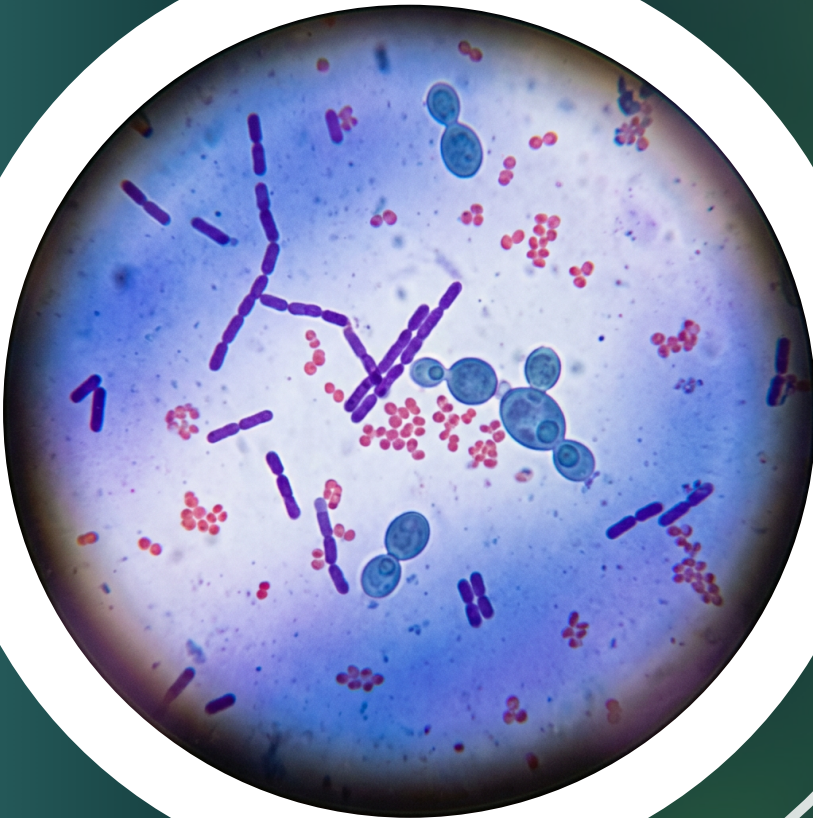


MIKROBIOLOGI



Andi Wirdani Pettalolo
Oktavius Yoseph Tuta Mago

MIKROBIOLOGI

**Andi Wirdani Pettalolo
Oktavius Yoseph Tuta Mago**



GET PRESS INDONESIA

MIKROBIOLOGI

Penulis : Andi Wirdani Pettalolo
Oktavius Yoseph Tuta Mago

ISBN : 978-634-255-741-9

Editor : Mila Sari, M.Si.
Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd
PENERBIT : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Hak cipta dilindungi undang-undang.

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

*Undang Undang Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2002
Tentang Hak Cipta*

Ketentuan Pidana:

Pasal 72

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/ atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/ atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku ajar **Mikrobiologi** ini dapat terselesaikan dan sampai di tangan pembaca. Dunia mikroorganisme adalah sebuah semesta tak kasat mata yang perannya fundamental bagi kehidupan di bumi, mulai dari siklus biogeokimia hingga kesehatan dan penyakit pada manusia. Namun, keluasan dan kompleksitasnya sering kali menjadi tantangan bagi para mahasiswa yang baru memulai perjalanannya dalam disiplin ilmu ini. Berangkat dari pengalaman mengajar selama bertahun-tahun dan melihat kebutuhan akan sebuah referensi yang terstruktur, komprehensif, dan relevan dengan konteks keilmuan di Indonesia, penulis termotivasi untuk menyusun buku ini. Tujuannya adalah untuk menyajikan Mikrobiologi tidak sebagai kumpulan fakta yang harus dihafal, melainkan sebagai sebuah narasi ilmiah yang logis dan menarik, membimbing pembaca dari konsep paling dasar hingga aplikasi klinis dan lingkungan yang lebih kompleks. Buku ini dirancang khusus untuk mahasiswa program studi Mikrobiologi, dengan harapan dapat menjadi jembatan yang kokoh untuk memahami dunia mikroba yang menakjubkan.

Struktur buku ini dirancang secara sistematis untuk membangun pemahaman yang utuh dan bertahap. Pembahasan diawali dengan fondasi keilmuan pada Bab 1, yang mengupas konsep dasar, sejarah, dan klasifikasi mikroorganisme, termasuk parasitologi sebagai disiplin yang sering kali bersinggungan. Selanjutnya, pembaca akan diajak menyelami kelompok-kelompok utama mikroba, mulai dari bakteriologi (Bab 2), virologi dan mikologi (Bab 6), hingga parasitologi dengan fokus spesifik pada kasus kebidanan (Bab 5) untuk menunjukkan relevansi klinisnya. Aspek-aspek fungsional yang esensial seperti metabolisme (Bab 7), nutrisi dan kultur (Bab 8), serta dinamika pertumbuhan (Bab 9) dibahas secara mendalam untuk memberikan pemahaman mekanistik. Keunggulan buku ini terletak pada integrasi antara teori fundamental dengan aspek terapan yang krusial, seperti konsep pencegahan dan pengendalian infeksi (Bab 3), peran flora normal (Bab 4), dan ragam teknik pemeriksaan mikrobiologi modern (Bab 11). Pendekatan ini diharapkan tidak hanya membekali mahasiswa dengan pengetahuan

teoretis, tetapi juga dengan kerangka berpikir analitis yang diperlukan dalam praktik laboratorium dan penelitian di masa depan.

Penyusunan buku ini tentu tidak akan terwujud tanpa dukungan dan kontribusi dari berbagai pihak. Ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada rekan-rekan sejawat dosen di lingkungan akademik, yang diskusi dan wawasannya telah memperkaya substansi naskah ini. Penghargaan setinggi-tingginya juga ditujukan kepada para mahasiswa dari berbagai angkatan, yang antusiasme, pertanyaan kritis, dan rasa ingin tahunya senantiasa menjadi sumber inspirasi dan motivasi utama bagi penulis untuk terus belajar dan berkarya. Dukungan moril yang tak ternilai dari keluarga tercinta memberikan kekuatan dan kesabaran selama proses penulisan yang panjang. Terakhir, terima kasih kepada pihak penerbit yang telah memberikan kepercayaan dan bekerja sama secara profesional sejak awal hingga akhir proses penerbitan buku ini.

Penulis menyadari bahwa tidak ada karya yang sempurna. Ilmu mikrobiologi terus berkembang dengan pesat, dan selalu ada ruang untuk perbaikan. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati membuka diri terhadap segala bentuk masukan, kritik, dan saran yang membangun dari para pembaca, baik dari kalangan mahasiswa, dosen, maupun praktisi, demi penyempurnaan pada edisi-edisi mendatang. Harapan terbesar penulis adalah agar buku ajar ini tidak hanya menjadi sumber acuan akademis, tetapi juga mampu menyalakan percikan rasa ingin tahu dan kecintaan terhadap dunia mikroorganisme yang luar biasa. Semoga buku ini dapat menjadi sahabat setia yang menemani perjalanan studi dan karier para calon mikrobiolog di masa depan.

Penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat-Nya, sehingga khazanah ilmu pengetahuan di Indonesia kembali diperkaya dengan terbitnya buku ajar Mikrobiologi ini. Kehadiran buku ini terasa sangat tepat waktu. Dalam beberapa tahun terakhir, dunia telah menyaksikan betapa krusialnya pemahaman mendalam tentang mikroorganisme, tidak hanya dalam konteks penyakit infeksius tetapi juga dalam perannya yang fundamental bagi bioteknologi, ketahanan pangan, dan kelestarian lingkungan. Di tengah derasny arus informasi dan kemajuan riset genomika serta rekayasa genetika, dibutuhkan sebuah panduan komprehensif yang mampu menjembatani prinsip-prinsip dasar mikrobiologi klasik dengan penemuan-penemuan mutakhir. Buku ini hadir untuk menjawab kebutuhan tersebut, menyajikan sebuah sintesis yang relevan bagi mahasiswa dan akademisi di era pasca-genomik, dengan tetap berpijak pada konteks keilmuan yang kokoh.

Saya menyambut dengan antusias kontribusi berharga yang ditawarkan buku ini. Penulis telah berhasil menyusun sebuah karya yang tidak hanya lengkap secara materi, tetapi juga unggul dalam pendekatan strukturalnya. Berbeda dari banyak buku ajar lain yang terkadang terasa terfragmentasi, buku ini mengalir secara logis, dimulai dari pengenalan fondasi biologi sel mikroba, dilanjutkan dengan eksplorasi keanekaragaman dunia mikroba, dan diakhiri dengan pembahasan mendalam mengenai aplikasi mikrobiologi di berbagai bidang strategis. Keunggulan yang patut diapresiasi adalah penyertaan studi kasus dan contoh-contoh yang diangkat dari konteks lokal Indonesia, mulai dari mikroorganisme endemik di ekosistem tropis hingga perannya dalam industri fermentasi tradisional. Pendekatan ini menjadikan materi tidak hanya mudah dipahami, tetapi juga terasa dekat dan relevan dengan realitas yang dihadapi para pembelajar di tanah air.

Lebih dari sekadar kumpulan fakta, buku ini merefleksikan kepiawaian penulis sebagai seorang pendidik. Gaya bahasa yang digunakan lugas, jernih, dan terhindar dari jargon teknis yang tidak perlu, tanpa mengorbankan kedalaman dan akurasi ilmiah. Penulis mampu mengurai konsep-konsep kompleks—seperti regulasi genetik pada prokariota atau mekanisme interaksi inang-patogen—menjadi

penjelasan yang sistematis dan mudah dicerna. Penggunaan diagram, ilustrasi, dan bagan alir yang dirancang dengan cermat terbukti sangat efektif dalam membantu visualisasi proses-proses biologis yang abstrak. Pendekatan pedagogis ini mendorong mahasiswa untuk tidak sekadar menghafal, melainkan untuk benar-benar memahami prinsip di balik setiap fenomena, melatih kemampuan analisis, dan membangun kerangka berpikir kritis yang esensial bagi seorang ilmuwan.

Dengan kualitas yang dimilikinya, buku ajar ini saya rekomendasikan tidak hanya sebagai bacaan wajib bagi mahasiswa Program Studi Mikrobiologi di jenjang sarjana, tetapi juga sebagai referensi pelengkap yang sangat bermanfaat bagi mahasiswa pascasarjana. Para dosen dan pengajar akan menemukan buku ini sebagai sumber daya yang kaya untuk merancang materi perkuliahan yang dinamis dan relevan. Lebih jauh lagi, para praktisi dan peneliti di bidang-bidang terkait seperti bioteknologi, ilmu pangan, farmasi, kedokteran, dan ilmu lingkungan juga akan mendapatkan manfaat besar dari buku ini sebagai rujukan cepat untuk menyegarkan kembali pemahaman mereka tentang prinsip-prinsip dasar mikrobiologi yang menopang bidang kerja mereka.

Akhir kata, saya menaruh harapan besar agar buku ajar Mikrobiologi ini dapat diterima dengan baik oleh komunitas akademik dan menjadi salah satu rujukan utama yang mencerahkan. Semoga buku ini tidak hanya berhasil mentransfer ilmu, tetapi juga mampu menyulut api keingintahuan dan menginspirasi lahirnya generasi baru mikrobiolog Indonesia yang kompeten, inovatif, dan berintegritas.

Padang, Agustus 2026

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	x
BAB I KONSEP DASAR MIKROBIOLOGI	
DAN PARASITOLOGI.....	1
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN.....	1
B. PENDAHULUAN.....	1
C. PENGERTIAN DAN RUANG LINGKUP MIKROBIOLOGI	2
D. PENGERTIAN DAN RUANG LINGKUP PARASITOLOGI	4
E. SEJARAH PERKEMBANGAN MIKROBIOLOGI DAN PARASITOLOGI	6
F. KLASIFIKASI MIKROORGANISME DAN PARASIT	7
G. PERANAN MIKROORGANISME DAN PARASIT DALAM KESEHATAN.....	9
H. RANGKUMAN	11
I. LATIHAN MAHASISWA	12
BAB II BAKTERIOLOGI DASAR	17
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN.....	17
B. PENDAHULUAN.....	17
C. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK BAKTERI.....	19
D. STRUKTUR DAN FUNGSI SEL BAKTERI	20
E. BENTUK DAN SUSUNAN BAKTERI	22
F. KLASIFIKASI DAN IDENTIFIKASI BAKTERI	24
G. PERANAN BAKTERI DALAM KESEHATAN DAN PENYAKIT	25
H. RANGKUMAN.....	27
I. LATIHAN MAHASISWA.....	28
BAB III KONSEP DASAR PENCEGAHAN DAN PENGENDALIAN INFEKSI	
33	
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN.....	33
B. PENDAHULUAN.....	33

C. PENGERTIAN DAN TUJUAN PENCEGAHAN INFEKSI	35
D. RANTAI PENULARAN INFEKSI.....	37
E. KEWASPADAAN STANDAR DALAM PELAYANAN KESEHATAN	38
F. STERILISASI, DESINFEKSI, DAN ANTISEPSIS ..	40
G. PENGELOLAAN LIMBAH DAN BENDA TAJAM INFEKSIUS.....	42
H. RANGKUMAN	44
I. LATIHAN MAHASISWA	44
BAB IV FLORA NORMAL DAN MIKROORGANISME.....	51
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN	51
B. PENDAHULUAN	51
C. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK FLORA NORMAL	53
D. FLORA NORMAL PADA KULIT DAN MUKOSA	54
E. FLORA NORMAL PADA SALURAN PENCERNAAN.....	57
F. FLORA NORMAL PADA SALURAN REPRODUKSI	58
G. PERUBAHAN FLORA NORMAL DAN TERJADINYA PENYAKIT	60
H. RANGKUMAN	61
I. LATIHAN MAHASISWA	62
BAB V PARASIT PADA KASUS KEBIDANAN	67
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN	67
B. PENDAHULUAN	67
C. KONSEP DASAR PARASIT DALAM KEBIDANAN.....	69
D. PROTOZOA YANG BERHUBUNGAN DENGAN KEHAMILAN	70
E. HELMIN YANG BERHUBUNGAN DENGAN KEHAMILAN	72
F. DAMPAK INFEKSI PARASIT TERHADAP IBU DAN JANIN	73
G. PENCEGAHAN DAN PENANGANAN	

INFEKSI PARASIT PADA KEHAMILAN	75
H. RANGKUMAN.....	76
I. LATIHAN MAHASISWA	77
BAB VI DASAR VIROLOGI DAN MIKOLOGI.....	83
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN.....	83
B. PENDAHULUAN.....	83
C. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK VIRUS ...	85
D. STRUKTUR, KLASIFIKASI, DAN REPLIKASI VIRUS	86
E. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK JAMUR..	88
F. KLASIFIKASI DAN REPRODUKSI JAMUR	90
G. PENYAKIT YANG DISEBABKAN OLEH VIRUS DAN JAMUR	92
H. RANGKUMAN.....	93
I. LATIHAN MAHASISWA.....	94
BAB VII METABOLISME MIKROORGANISME	99
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN.....	99
B. PENDAHULUAN.....	99
C. KONSEP DASAR METABOLISME MIKROORGANISME	101
D. ENZIM DALAM METABOLISME MIKROORGANISME	102
E. PROSES KATABOLISME DAN ANABOLISME ...	104
F. RESPIRASI AEROB, ANAEROB, DAN FERMENTASI	105
G. FAKTOR YANG MEMENGARUHI METABOLISME MIKROORGANISME	107
H. RANGKUMAN.....	108
I. LATIHAN MAHASISWA.....	109
BAB VIII NUTRISI DAN KULTUR ORGANISME	115
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	115
B. PENDAHULUAN.....	115
C. KEBUTUHAN NUTRISI MIKROORGANISME	117
D. JENIS DAN KOMPOSISI MEDIA KULTUR	119
E. TEKNIK PEMBUATAN DAN STERILISASI MEDIA	121
F. TEKNIK INOKULASI DAN ISOLASI MIKROORGANISME	122

G. PEMELIHARAAN DAN PENYIMPANAN KULTUR MIKROORGANISME	124
H. RANGKUMAN	126
I. LATIHAN MAHASISWA	127
BAB IX PERTUMBUHAN MIKROORGANISME	131
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN	131
B. PENDAHULUAN	132
C. KONSEP DASAR PERTUMBUHAN MIKROORGANISME	134
D. PERTUMBUHAN POPULASI DAN DINAMIKA SEL	136
E. KURVA PERTUMBUHAN MIKROOGANISME ...	138
F. PENGUKURAN PERTUMBUHAN MIKROORGANISME	146
G. FAKTOR LINGKUNGAN YANG MEMENGARUHI PERTUMBUHAN MIKROORGANISME	154
H. INTERAKSI ANTAR MIKROORGANISME YANG MEMENGARUHI PERTUMBUHAN (QUORUM SENSING DAN BIOFILM)	164
I. RANGKUMAN	165
J. EVALUASI / SOAL LATIHAN	171
BAB X KERAGAMAN MIKROORGANISME	179
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN	179
B. PENDAHULUAN	179
C. DASAR KLASIFIKASI MIKROORGANISME	181
D. KERAGAMAN BAKTERI	183
E. KERAGAMAN VIRUS.....	184
F. KERAGAMAN JAMUR DAN PROTOZOA	186
G. PERANAN KERAGAMAN MIKROORGANISME DALAM KEHIDUPAN.....	187
H. RANGKUMAN	188
I. LATIHAN MAHASISWA	189
BAB XI JENIS PEMERIKSAAN MIKROBIOLOGI....	195
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN	195
B. PENDAHULUAN	195
C. PENGAMBILAN DAN PENGELOLAAN SPESIMEN	197

D. PEMERIKSAAN MIKROSKOPIS.....	199
E. PEMERIKSAAN KULTUR DAN IDENTIFIKASI MIKROORGANISME	200
F. PEMERIKSAAN SEROLOGI DAN MOLEKULER	201
G. INTERPRETASI DAN PELAPORAN HASIL PEMERIKSAAN MIKROBIOLOGI	203
H. RANGKUMAN.....	204
I. LATIHAN MAHASISWA.....	205
DAFTAR PUSTAKA	211
LAMPIRAN: KUNCI JAWABAN.....	226
Kunci Jawaban BAB 1	226
Kunci Jawaban BAB 2	227
Kunci Jawaban BAB 3	229
Kunci Jawaban BAB 4	230
Kunci Jawaban BAB 5	232
Kunci Jawaban BAB 6	234
Kunci Jawaban BAB 7	235
Kunci Jawaban BAB 8	236
Kunci Jawaban BAB 9	238
Kunci Jawaban BAB 10	242
Kunci Jawaban BAB 11	243
GLOSARIUM	246
INDEKS	250
BIODATA PENULIS	251
SINOPSIS BUKU	253

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Taksonomi Mikroorganisme dan Parasit Klinis	8
Tabel 2. Perbandingan Struktur Dinding Sel Bakteri Gram-Positif dan Gram-Negatif	22
Tabel 3. Kebutuhan Alat Pelindung Diri Berdasarkan Risiko Prosedur	39
Tabel 4. Distribusi Flora Normal pada Berbagai Zona Mikroekologi Kulit dan Mukosa	56
Tabel 5. Parameter Patofisiologi dan Manifestasi Klinis Infeksi Parasit Utama pada Kehamilan	74
Tabel 6. Perbedaan Karakteristik Struktural dan Fungsional antara Virus dan Jamur	89
Tabel 7. Parameter Operasional dan Energetika Jalur Respirasi serta Fermentasi Mikroorganisme	106
Tabel 8. Klasifikasi dan Aplikasi Media Kultur Utamadi Laboratorium	120
Tabel 9. Perbandingan Metode Pengukuran Pertumbuhan Mikroorganisme	141
Tabel 10. Perbandingan Parameter Klasifikasi Isolat Bakteri Lokal	182
Tabel 11. Prosedur Pengambilan dan Kondisi Transportasi Spesimen Klinis	198

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Tahapan pada pembelahan biner	135
Gambar 2. Jenis reproduksi bakteri <i>bud</i> dan <i>baeocyte</i>	136
Gambar 3. Kecepatan pertumbuhan kultur mikroba	138
Gambar 4. Kurva pertumbuhan mikroorganisme	140
Gambar 5. Produksi metabolit primer dan sekunder	143
Gambar 6. Prosedur perhitungan mikroskopik langsung menggunakan Petroff-Hausser <i>counting</i> <i>chamber</i>	149
Gambar 7. <i>Coulter counter</i>	149
Gambar 8. <i>Plate count</i> yang didahului oleh pengenceran bertingkat (a) dan dua teknik <i>plate count</i> , <i>pour</i> <i>plate</i> (b) dan <i>spread plate</i> (c)	151
Gambar 9. Metode <i>Most Probable Number</i> (MPN)	152
Gambar 10. Pengukuran turbiditas menggunakan spektrofotometer	154
Gambar 11. Pengelompokan prokariot berdasarkan temperatur pertumbuhan	157
Gambar 12. Hubungan antara kebutuhan oksigen dan pertumbuhan bakteri	163
Gambar 13. Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap pertumbuhan mikroba	165

BAB I

KONSEP DASAR MIKROBIOLOGI DAN PARASITOLOGI

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menentukan ruang lingkup penanganan agen infeksius mikrobiologis dan parasitologis berdasarkan karakteristik struktural dan biologisnya dalam sampel klinis atau lingkungan.*
- 2. Menggunakan prinsip-prinsip postulasi Koch dan tonggak sejarah mikrobiologi untuk memecahkan masalah kausalitas penyakit infeksi pada investigasi wabah kontemporer.*
- 3. Mengimplementasikan sistem klasifikasi taksonomi modern untuk mengelompokkan mikroorganisme dan parasit patogen yang ditemukan pada ekosistem tropis.*
- 4. Menerapkan konsep interaksi host-parasit-patogen dalam memilih metode pengendalian atau pengobatan yang tepat untuk mengatasi penyakit endemis di Indonesia.*
- 5. Menganalisis peranan ekologis dan klinis dari mikroorganisme menguntungkan versus patogen dalam menjaga homeostasis kesehatan manusia.*

B. PENDAHULUAN

Dunia mikroskopis yang dihuni oleh mikroorganisme dan parasit merupakan fondasi biosfer yang dinamis sekaligus menjadi tantangan konstan bagi kesehatan manusia, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Keberadaan entitas tak kasat mata ini sering kali bermanifestasi dalam fenomena ekologis dan klinis yang kompleks. Sebagai contoh, fluktuasi kasus malaria di wilayah endemik seperti Papua dan Nusa Tenggara Timur menunjukkan bagaimana interaksi antara protozoa Plasmodium, nyamuk Anopheles sebagai vektor, dan imunitas manusia sangat dipengaruhi

oleh faktor lingkungan lokal. Implikasi dari dinamika ini menuntut pemahaman mendalam tidak hanya pada level seluler organisme patogen tersebut, melainkan juga pada bagaimana mereka beradaptasi dan berinteraksi dengan inangnya. Bagi mahasiswa program studi Mikrobiologi, penguasaan konsep dasar mikrobiologi dan parasitologi bukan sekadar kebutuhan teoretis, melainkan sebuah instrumen krusial untuk memetakan, mengendalikan, dan memanfaatkan potensi kehidupan mikroskopis ini demi kesejahteraan masyarakat dan ketahanan kesehatan nasional.

Urgensi keilmuan ini semakin nyata ketika kita dihadapkan pada tantangan kesehatan masyarakat yang terus berevolusi, seperti resistensi antimikroba dan munculnya penyakit infeksi baru. Kajian mikrobiologi yang berfokus pada bakteri, virus, archaea, dan fungi, serta parasitologi yang mempelajari protozoa, helminthes, dan artropoda, menyediakan landasan ilmiah untuk merancang strategi preventif dan terapeutik yang presisi. Sebagai contoh konkret, program eliminasi filariasis (kaki gajah) di berbagai wilayah Indonesia sangat bergantung pada ketepatan identifikasi spesies cacing parasitik *Wuchereria bancrofti* serta perilaku vektor nyamuk pembawanya di lapangan. Implikasinya, ketidakakuratan dalam klasifikasi biologis atau pemahaman siklus hidup agen tersebut dapat menggagalkan intervensi pengobatan massal yang dicanangkan pemerintah. Guna membekali mahasiswa dengan kompetensi aplikatif dalam menghadapi realitas tersebut, bab pembuka ini akan menyajikan fondasi awal yang komprehensif melalui pembahasan mengenai pengertian dan ruang lingkup mikrobiologi, pengertian dan ruang lingkup parasitologi, sejarah perkembangan mikrobiologi dan parasitologi, klasifikasi mikroorganisme dan parasit, serta diakhiri dengan analisis peranan mikroorganisme dan parasit dalam kesehatan.

C. PENGERTIAN DAN RUANG LINGKUP MIKROBIOLOGI

Mikrobiologi merupakan cabang ilmu biologi yang mempelajari kehidupan organisme mikroskopis, yang secara struktural terlalu kecil untuk dapat diamati secara jelas menggunakan mata telanjang. Kajian ilmiah ini meliputi berbagai entitas biologis yang sangat beragam, mulai dari agen aseluler

seperti virus, organisme uniseluler prokariotik seperti bakteri dan archaea, hingga organisme eukariotik seperti jamur (fungi) dan mikroalga. Dalam dunia akademik, penguasaan konsep mikrobiologi dasar menjadi pilar yang sangat krusial bagi mahasiswa bidang kesehatan, karena tingkat pemahaman konsep yang mendalam sangat berkorelasi dengan akurasi dan kesiapan mereka dalam menangani kasus infeksi klinis di masa depan (Hizawati, 2025). Guna mencapai penguasaan konsep yang kokoh tersebut, pendekatan pembelajaran sains yang mengaitkan fenomena alam dengan lingkungan dan teknologi sangat dibutuhkan agar mahasiswa mampu mengaplikasikan teori ke dalam praktik laboratorium (Indri, 2021). Integrasi nilai-nilai pengajaran teoritis dengan aplikasi praktis ini sejalan dengan relevansi konsep dasar pendidikan dalam membentuk pemahaman yang adaptif terhadap perkembangan zaman (Rahman, 2025).

DEFINISI

Mikrobiologi Medis adalah spesialisasi klinis yang berfokus pada identifikasi, studi karakteristik, dan penanganan mikroorganisme patogen yang memiliki kemampuan menyebabkan penyakit infeksi pada manusia.

Ruang lingkup mikrobiologi sangat luas dan terbagi ke dalam berbagai sub-disiplin berdasarkan jenis organisme yang dipelajari serta bidang aplikasinya. Cabang-cabang utama mikrobiologi meliputi bakteriologi (studi tentang bakteri), virologi (studi tentang virus), mikologi (studi tentang jamur), dan fikologi (studi tentang alga). Berdasarkan penerapannya, ilmu ini berkembang menjadi mikrobiologi industri untuk produksi antibiotik dan bahan pangan, mikrobiologi lingkungan untuk bioremediasi limbah, serta mikrobiologi klinis yang berfokus pada penegakan diagnosis infeksi. Di dalam laboratorium medis, ruang lingkup pengerjaan mikrobiologi mencakup teknik isolasi, kultivasi, pewarnaan gram, hingga uji sensitivitas antimikroba (sebagaimana akan dibahas lebih mendalam pada Bab 8 dan Bab 11).

CONTOH

Aplikasi pengujian mikrobiologi di Indonesia terlihat pada standardisasi diagnosis Tuberkulosis (TB) di tingkat Puskesmas menggunakan metode pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA) dari sampel dahak pasien. Berdasarkan pedoman Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, identifikasi mikroskopis yang akurat terhadap bakteri *Mycobacterium tuberculosis* merupakan langkah awal yang menentukan keberhasilan regimen pengobatan jangka panjang guna memutus rantai penularan di masyarakat.

Implikasi klinis dari luasnya ruang lingkup mikrobiologi ini menuntut para praktisi kesehatan untuk mampu menentukan teknik penanganan spesimen secara spesifik. Kesalahan dalam mengidentifikasi karakteristik struktural mikroorganisme—misalnya membedakan antara infeksi bakteri dan infeksi virus—dapat berujung pada kekeliruan fatal dalam pemberian terapi. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang batas-batas biologis dan operasional dari setiap kelompok mikroorganisme ini menjadi kompetensi wajib dalam menunjang ketahanan kesehatan masyarakat di wilayah tropis.

D. PENGERTIAN DAN RUANG LINGKUP PARASITOLOGI

Parasitologi adalah disiplin ilmu yang mempelajari organisme yang hidup menumpangkan dirinya pada organisme lain, yang disebut inang (host), untuk mendapatkan perlindungan, tempat tinggal, dan nutrisi dengan konsekuensi merugikan bagi kelangsungan hidup inang tersebut. Hubungan interaksi biologi ini bersifat dinamis dan sering kali menimbulkan manifestasi patologi yang kompleks. Dalam tatanan hukum kesehatan dan pengelolaan epidemiologi global, pemahaman formal mengenai definisi dan yurisdiksi penyebaran penyakit akibat parasit sangat penting untuk menentukan regulasi karantina dan intervensi medis lintas wilayah (Kilikily, 2025). Invasi parasit ke dalam jaringan tubuh inang dapat diposisikan sebagai bentuk penetrasi fisik yang merusak batas pertahanan internal inang, mengganggu kestabilan sistem imun,

serta mengeksploitasi ruang biologis yang seharusnya bersifat protektif (Wahyudi, 2022).

Dalam ranah kedokteran dan kesehatan masyarakat, ruang lingkup parasitologi umumnya dibatasi pada tiga kelompok taksonomi utama yang sering menginfeksi manusia:

1. **Protozoologi Medis:** Mempelajari parasit bersel tunggal (eukariotik) seperti *Plasmodium* (penyebab malaria) dan *Amoeba*.
2. **Helminthology Medis:** Mempelajari cacing parasitik yang multiseluler, termasuk cacing gilik (Nematoda), cacing isap (Trematoda), dan cacing pita (Cestoda).
3. **Entomologi Medis:** Mempelajari artropoda yang bertindak sebagai parasit langsung atau bertindak sebagai vektor (pembawa) yang mentransmisikan patogen lain ke tubuh manusia.

CONTOH

Di Indonesia, salah satu tantangan parasitologi terbesar adalah tingginya prevalensi infeksi cacing yang ditularkan melalui tanah (*Soil-Transmitted Helminths/STH*), terutama pada anak-anak usia sekolah di daerah pedesaan dengan sanitasi kurang memadai. Cacing gelang (*Ascaris lumbricoides*) mengonsumsi nutrisi yang dicerna oleh tubuh inang, sehingga menyebabkan anak mengalami anemia, malnutrisi, dan hambatan tumbuh kembang (*stunting*). Pemerintah mengintervensi masalah ini melalui Program Pemberian Obat Pencegahan Massal (POPM) Kecacingan menggunakan Albendazole secara berkala di sekolah-sekolah dasar. Pendekatan intervensi di tingkat dasar ini relevan dengan kajian konseptual mengenai subjek pendidikan anak sebagai fondasi penting dalam mewujudkan manusia berkualitas seutuhnya (Ulandari, 2026).

Pemahaman siklus hidup parasit—baik yang melibatkan satu inang tunggal (*monoksen*) maupun yang memerlukan inang perantara dan inang definitif (*heteroksen*)—sangat krusial dalam memilih metode pencegahan yang tepat. Implikasinya, pemberantasan penyakit parasitik tidak dapat diselesaikan hanya

dengan memberikan terapi obat kepada pasien yang terinfeksi. Petugas kesehatan juga harus mampu menganalisis interaksi lingkungan dan rantai penularannya, seperti membasmi tempat perindukan nyamuk penular guna menurunkan angka kejadian penyakit parasitik secara signifikan.

E. SEJARAH PERKEMBANGAN MIKROBIOLOGI DAN PARASITOLOGI

Sejarah mikrobiologi dan parasitologi merepresentasikan lompatan besar dalam peradaban manusia, dari masa kegelapan yang mempercayai teori generasi spontan (*abiogenesis*) menuju era pembuktian ilmiah berbasis eksperimen (*biogenesis*). Penemuan mikroskop sederhana oleh Antonie van Leeuwenhoek pada abad ke-17 menjadi pembuka tabir keberadaan "*animalcules*" atau jasad renik. Perkembangan sejarah ini membuktikan bahwa pembentukan konsep ilmiah yang kokoh memerlukan evolusi metodologi riset yang adaptif dari generasi ke generasi (Febriana dkk., 2025). Melalui pendekatan pembelajaran berbasis eksperimen dan inkuiri yang sistematis, para peneliti terdahulu mampu menguji hipotesis mereka secara objektif dan merumuskan hukum-hukum ilmiah yang kita gunakan hingga hari ini (Yulaikah dkk., 2022). Perkembangan dan penyebaran metodologi pendidikan ilmiah ini juga diiringi oleh evolusi kurikulum dan kebijakan pengajaran sejarah sains di berbagai negara tetangga pada era modern (Unknown, 2024).

Debat panjang mengenai asal-usul kehidupan akhirnya diselesaikan oleh Louis Pasteur melalui percobaan labu leher angsa yang membuktikan bahwa mikroorganisme di udara tidak muncul secara spontan dari benda mati. Langkah besar berikutnya dipelopori oleh Robert Koch, yang merumuskan kriteria logis untuk membuktikan bahwa mikroorganisme tertentu merupakan penyebab langsung dari suatu penyakit spesifik.

i CATATAN

Postulat Koch terdiri atas empat prinsip: (1) mikroorganisme harus ditemukan pada semua organisme yang sakit tetapi tidak pada yang sehat; (2) mikroorganisme harus diisolasi dan ditumbuhkan dalam kultur murni; (3) kultur murni tersebut harus menimbulkan penyakit ketika diinokulasikan pada organisme

sehat; (4) mikroorganisme yang sama harus diisolasi kembali dari inang percobaan yang sakit tersebut.

Sejarah mikrobiologi medis di Indonesia mencatatkan kontribusi penting pada akhir abad ke-19 melalui penelitian Christiaan Eijkman di Batavia (Jakarta). Eijkman melakukan investigasi terhadap penyakit beri-beri yang saat itu mewabah di kalangan militer Hindia Belanda. Awalnya, beri-beri diduga disebabkan oleh infeksi bakteri patogen karena gejalanya yang menyerupai epidemi infeksius. Melalui serangkaian eksperimen pada ayam di laboratorium yang kini menjadi Lembaga Biologi Molekuler Eijkman, ia menemukan bahwa penyakit tersebut bukan disebabkan oleh infeksi mikroba, melainkan akibat kekurangan faktor nutrisi esensial yang kemudian diidentifikasi sebagai vitamin B1 (tiamin) pada beras pecah kulit.

Penemuan Eijkman tidak hanya membawanya meraih Hadiah Nobel pada tahun 1929, tetapi juga memberikan pelajaran historis yang sangat berharga bagi mikrobiolog modern. Kasus ini menegaskan pentingnya diferensiasi diagnosis yang sangat teliti antara penyakit akibat agen infeksius biologis dengan penyakit defisiensi metabolik. Sejarah ini mengajarkan bahwa penegakan diagnosis mikrobiologi harus selalu didukung oleh pembuktian ilmiah yang rigid guna menghindari kesalahan penanganan medis.

F. KLASIFIKASI MIKROORGANISME DAN PARASIT

Klasifikasi atau taksonomi merupakan instrumen ilmiah yang digunakan untuk mengidentifikasi, menamai, dan mengelompokkan jutaan organisme mikroskopis ke dalam hierarki sistematis berdasarkan kekerabatan evolusioner (filogenetik) dan karakteristik fenotipik. Penyusunan katalog keanekaragaman hayati yang masif, terstandarisasi, dan diakui secara global sangat krusial agar komunitas ilmiah memiliki keseragaman bahasa dalam mengidentifikasi spesies baru (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Pada era biologi modern, kompleksitas data klasifikasi yang melibatkan sekuensing DNA dan analisis filogenomik menuntut integrasi sistem informasi digital dan kecerdasan buatan guna mempermudah pengelolaan data taksonomi patogen di tingkat global (Hikmawati dkk., 2023).

Sistem klasifikasi tiga domain yang diusulkan oleh Carl Woese membagi kehidupan seluler menjadi Domain Archaea, Bacteria, dan Eukarya. Di sisi lain, virus diklasifikasikan secara terpisah dalam sistem klasifikasi Baltimore karena sifatnya yang aseluler dan bergantung pada sel inang untuk bereplikasi.

Tabel 1. Klasifikasi Taksonomi Mikroorganisme dan Parasit Klinis

Kelompok Agen	Tingkat Seluler	Domain / Klasifikasi	Karakteristik Utama	Contoh Spesies Patogen
Bakteri	Prokariotik	Bacteria	Memiliki dinding sel peptidoglikan, membelah diri dengan pembelahan biner.	<i>Salmonella enterica</i>
Virus	Aseluler	Sistem Baltimore	Terdiri atas materi genetik (DNA/RNA) yang diselubungi protein (kapsid).	Virus Dengue (DENV)
Jamur	Eukariotik	Fungi	Memiliki dinding sel kitin, bersifat heterotrof menyerap nutrisi.	<i>Candida albicans</i>
Protozoa	Eukariotik	Protista	Uniseluler, tidak memiliki dinding sel, umumnya bersifat motil (aktif bergerak).	<i>Entamoeba histolytica</i>
Helmintes	Eukariotik	Animalia	Multiseluler, memiliki siklus hidup kompleks dengan organ	<i>Ancylostoma duodenale</i>

			reproduksi berkembang.	
--	--	--	------------------------	--

Tabel di atas mengilustrasikan perbedaan mendasar pada tingkat organisasi seluler dan karakteristik biologis dari masing-masing kelompok patogen yang sering ditemukan pada kasus klinis. Pemahaman terhadap perbedaan struktur sel ini sangat esensial karena menentukan target kerja dari obat-obatan antimikroba yang akan digunakan untuk terapi.

Di Indonesia, pengelompokan patogen ini diimplementasikan secara praktis dalam sistem rujukan surveilans epidemiologi nasional di bawah Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Klasifikasi yang tepat terhadap strain bakteri lokal, seperti bakteri resisten multidrug (MDR), sangat memengaruhi kebijakan penanganan infeksi nosokomial di rumah sakit. Dengan mengidentifikasi posisi taksonomi suatu patogen secara presisi, para klinisi dapat memprediksi perilaku biologis, virulensi, serta memformulasikan regimen terapi yang paling efektif untuk menyembuhkan pasien.

G. PERANAN MIKROORGANISME DAN PARASIT DALAM KESEHATAN

Peranan mikroorganisme dan parasit dalam konteks kesehatan manusia bersifat dualistik dan dinamis, mencakup kontribusi yang sangat menguntungkan sekaligus potensi bahaya patologis yang merugikan. Sebagai makhluk yang dianugerahi kemampuan berpikir dan memimpin, manusia memikul tanggung jawab besar untuk menjaga kelestarian lingkungan dan mengelola homeostasis ekosistem mikroba di dalam tubuh mereka secara bijaksana demi mencegah terjadinya penyakit (Arfah, 2023). Di lingkungan klinis rumah sakit, manifestasi dari peranan merugikan mikroorganisme terlihat nyata pada kasus infeksi saluran napas bawah seperti pneumonia komunitas (community-acquired pneumonia), di mana ketepatan pemilihan strategi antibiotik—baik monoterapi maupun kombinasi—sangat menentukan tingkat kesembuhan dan menurunkan angka mortalitas pasien (Syahnir dkk., 2021).

⚠ PERHATIAN

Penggunaan antimikroba yang tidak rasional (irrational drug use) merupakan pemicu utama terjadinya resistensi antimikroba (AMR). Sekali mikroorganisme patogen mengembangkan mekanisme resistensi, obat-obatan standar tidak lagi efektif, sehingga meningkatkan risiko kematian akibat infeksi biasa yang seharusnya mudah diobati.

Di satu sisi, peranan menguntungkan mikroorganisme sangat vital bagi homeostasis kesehatan manusia:

1. **Sintesis Nutrisi dan Imunitas:** Flora normal dalam usus manusia (seperti spesies *Lactobacillus* dan *Escherichia coli*) membantu mencerna serat, mensintesis vitamin K, dan mencegah kolonisasi oleh bakteri patogen asing.
2. **Bioremediasi dan Farmasi:** Mikroorganisme digunakan untuk memproduksi insulin manusia melalui teknologi DNA rekombinan serta menghasilkan berbagai jenis antibiotik seperti penisilin dari jamur *Penicillium*.

🔪 CONTOH

Di Indonesia, aplikasi pemanfaatan mikroorganisme yang menguntungkan tercermin pada konsumsi tempe sebagai makanan fermentasi tradisional yang menggunakan kapang *Rhizopus oligosporus*. Proses fermentasi ini meningkatkan bioavailabilitas nutrisi, menghasilkan peptida bioaktif yang memperkuat mukosa usus, serta berkontribusi positif dalam mencegah masalah gizi buruk pada anak-anak balita.

*Sebaliknya, peranan merugikan dari mikroorganisme dan parasit bermanifestasi sebagai penyakit infeksi yang endemik di Indonesia. Infeksi virus seperti Demam Berdarah Dengue (DBD) yang ditularkan oleh vektor nyamuk *Aedes aegypti* secara musiman mengancam ribuan jiwa. Di tingkat seluler, interaksi antara molekul permukaan patogen dengan reseptor inang memicu kerusakan jaringan secara langsung atau memicu respons inflamasi berlebihan*

yang dapat berakibat fatal. Pemahaman holistik mengenai peranan ganda ini melatih mahasiswa kesehatan untuk tidak sekadar melihat mikroorganisme sebagai musuh yang harus dimusnahkan secara membabi buta, melainkan sebagai entitas biologis yang perlu dikelola keseimbangannya demi menjaga kesehatan manusia seutuhnya.

H. RANGKUMAN

Pemahaman komprehensif mengenai konsep dasar mikrobiologi dan parasitologi merupakan fondasi ilmiah yang sangat krusial dalam menunjang akurasi diagnosis klinis serta pengambilan keputusan medis yang cepat dan tepat di bidang kesehatan global. Mikrobiologi memetakan dunia jasad renik yang tidak kasat mata, mencakup entitas aseluler seperti virus, organisme uniseluler prokariotik seperti bakteri dan archaea, hingga organisme eukariotik seperti fungi dan mikroalga, dengan spesialisasi mikrobiologi medis yang berorientasi klinis pada identifikasi patogen penyebab penyakit infeksi pada manusia. Sebaliknya, parasitologi mengeksplorasi hubungan interaksi biologis yang dinamis antara inang dengan organisme parasit yang menumpang hidup demi nutrisi dan perlindungan, dengan pembagian taksonomi medis utama pada protozoologi, helminthologi, dan entomologi medis. Evolusi sejarah kedua disiplin ini dari masa kegelapan teori generasi spontan menuju pembuktian ilmiah berbasis biogenesis di bawah eksperimen Louis Pasteur dan Robert Koch membuktikan bahwa pengembangan sains membutuhkan metodologi riset yang empiris dan adaptif. Implikasi praktis dari luasnya ruang lingkup ini menuntut kesiapan profesional kesehatan dalam menguasai teknik laboratorium esensial—seperti metode pewarnaan Bakteri Tahan Asam untuk kasus Tuberkulosis—serta kemampuan menganalisis siklus hidup parasit monoksen dan heteroksen. Kesalahan dalam mengidentifikasi karakteristik struktural mikroorganisme tidak hanya berdampak fatal pada penentuan terapi individu, tetapi juga menghambat efektivitas program kesehatan masyarakat, seperti penanganan stunting akibat kecacingan maupun pencegahan penyakit berbasis vektor. Oleh sebab itu, integrasi penguasaan konsep teoretis yang mendalam dengan penerapan praktis di laboratorium menjadi kompetensi wajib

guna membangun ketahanan sistem kesehatan masyarakat yang tangguh dalam menghadapi berbagai ancaman penyakit infeksi.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana kegagalan praktisi medis dalam mengidentifikasi perbedaan struktural antara agen aseluler seperti virus dan organisme seluler seperti bakteri dapat memicu kesalahan fatal dalam pemberian terapi antibiotik, serta hubungkan hal ini dengan konsep ruang lingkup mikrobiologi medis.
2. Bandingkan efektivitas diagnosis Tuberkulosis menggunakan metode mikroskopis Bakteri Tahan Asam di Puskesmas dengan metode kultur murni berdasarkan prinsip Postulat Koch, lalu evaluasi kelebihan dan kelemahan masing-masing metode dalam konteks kecepatan penanganan pasien di daerah terpencil.
3. Telaah interaksi biologis antara cacing gelang (*Ascaris lumbricoides*) dan inang manusianya dalam perspektif parasitologi medis, serta analisislah bagaimana gangguan pada pertahanan internal inang akibat invasi fisik parasit tersebut berkontribusi secara langsung terhadap manifestasi klinis berupa anemia dan stunting pada anak.
4. Rumuskan suatu strategi komprehensif untuk memutuskan rantai penularan penyakit parasit yang memiliki siklus hidup heteroksen di wilayah tropis, dan argumentasikan mengapa pemberian obat antiparasit secara massal kepada penderita saja tidak cukup untuk mengeliminasi penyakit tersebut secara permanen.
5. Evaluasi kontribusi historis dari perumusan Postulat Koch dalam mengakhiri perdebatan panjang mengenai teori generasi spontan (*abiogenesis*), serta analisislah relevansi langkah-langkah isolasi bakteri dalam kultur murni yang digagas Koch terhadap prosedur diagnostik mikrobiologi klinis modern di laboratorium rumah sakit.

b. Pilihan Berganda

1. Cabang mikrobiologi yang berfokus pada identifikasi, studi karakteristik, dan penanganan mikroorganisme patogen yang

- secara langsung menyebabkan penyakit infeksi pada manusia adalah...
- Mikrobiologi Industri
 - Mikrobiologi Lingkungan
 - Mikrobiologi Medis
 - Mikologi Klinis
 - Virologi Klinis
2. Di dalam laboratorium medis, yang bukan merupakan bagian dari ruang lingkup pengerjaan mikrobiologi dasar untuk menegakkan diagnosis adalah...
- Teknik isolasi bakteri
 - Kultivasi mikroorganisme
 - Pewarnaan Gram
 - Uji sensitivitas antimikroba
 - Bioremediasi limbah toksik
3. Identifikasi mikroskopis bakteri *Mycobacterium tuberculosis* pada sampel dahak pasien di Puskesmas di Indonesia dilakukan dengan menggunakan metode...
- Pewarnaan Gram positif
 - Pewarnaan Bakteri Tahan Asam
 - Pewarnaan spora sederhana
 - Kultur murni media padat
 - Uji sensitivitas antibiotik
3. Mengapa kesalahan dalam membedakan karakteristik struktural antara infeksi bakteri dan virus dapat berakibat fatal pada pasien?
- Karena virus memiliki dinding sel peptidoglikan yang lebih tebal
 - Karena bakteri tidak memerlukan inang hidup untuk bereplikasi
 - Karena antibiotik tidak efektif membunuh virus dan justru memicu resistensi bakteri
 - Karena virus dapat diwarnai menggunakan metode pewarnaan Gram standar
 - Karena bakteri bersifat aseluler sedangkan virus bersifat prokariotik
4. Disiplin ilmu yang secara spesifik mempelajari organisme bersel tunggal eukariotik yang hidup menumpang pada inang dan menimbulkan manifestasi patologis disebut...

- a. Helminthologi Medis
 - b. Entomologi Medis
 - c. Bakteriologi Klinis
 - d. Protozoologi Medis
 - e. Fikologi Medis
5. Cacing gelang (*Ascaris lumbricoides*) dalam pembagian parasitologi medis dikelompokkan ke dalam cabang...
- a. Protozoologi Medis
 - b. Helminthology Medis
 - c. Entomologi Medis
 - d. Bakteriologi Medis
 - e. Mikologi Medis
6. Prevalensi infeksi cacing yang ditularkan melalui tanah (*Soil-Transmitted Helminths*) di Indonesia ditangani oleh pemerintah melalui Program Pemberian Obat Pencegahan Massal menggunakan...
- a. Amoksisilin
 - b. Streptomisin
 - c. Albendazole
 - d. Klorokuin
 - e. Rifampisin
7. Penemuan mikroskop sederhana pada abad ke-17 yang pertama kali membuka tabir keberadaan jasad renik (*animalcules*) dilakukan oleh...
- a. Louis Pasteur
 - b. Robert Koch
 - c. Alexander Fleming
 - d. Antonie van Leeuwenhoek
 - e. Edward Jenner
8. Percobaan labu leher angsa yang dilakukan oleh Louis Pasteur bertujuan untuk mematahkan teori...
- a. Biogenesis
 - b. Generasi spontan (abiogenesis)
 - c. Postulat Koch
 - d. Pewarnaan Gram
 - e. Seleksi alam
9. Salah satu prinsip dalam Postulat Koch menyatakan bahwa...

- a. Mikroorganisme patogen harus dapat hidup tanpa memerlukan inang
- b. Mikroorganisme harus diisolasi dan ditumbuhkan dalam kultur murni
- c. Mikroorganisme hanya dapat ditularkan melalui vektor artropoda
- d. Antibiotik harus mampu membunuh mikroorganisme dalam waktu singkat
- e. Mikroorganisme dapat muncul secara spontan dari sisa jaringan tubuh yang rusak

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah Puskesmas di wilayah rural tropis mengalami lonjakan kasus demam disertai diare berdarah pada anak-anak sekolah dasar. Kepala Puskesmas mencurigai adanya infeksi parasit akibat sanitasi sekolah yang buruk, namun dokter fungsional menduga infeksi ini disebabkan oleh bakteri enteropatogen. Keterbatasan fasilitas di laboratorium Puskesmas menyebabkan petugas hanya memiliki alat mikroskop cahaya sederhana, reagen pewarnaan Gram, dan reagen pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA). Anda sebagai tenaga ahli laboratorium medis diminta untuk merancang alur kerja diagnostik yang cepat dan efisien.
Instruksi analisis:
 - a. Analisis langkah-langkah diferensiasi klinis awal yang harus diambil petugas laboratorium untuk menentukan apakah etiologi penyakit tersebut disebabkan oleh bakteri atau parasit eukariotik menggunakan fasilitas yang tersedia.
 - b. Rumuskan rekomendasi teknis mengenai penanganan spesimen tinja yang tepat agar parasit atau bakteri penyebab tetap viable saat diperiksa.
2. Di sebuah desa perkebunan kelapa sawit, ditemukan tingginya angka stunting dan anemia defisiensi besi pada anak-anak balita. Data lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar warga tidak memiliki jamban sehat dan anak-anak sering bermain tanpa alas kaki di tanah yang lembap. Puskesmas setempat merencanakan Program Pemberian Obat Pencegahan Massal (POPM) kecacingan dengan Albendazole. Namun, beberapa tokoh

masyarakat menolak program tersebut karena menganggap obat tersebut tidak berguna jika anak-anak tetap bermain di tanah.

Instruksi analisis:

- a. Evaluasi mengapa pemberian terapi Albendazole saja tidak akan menyelesaikan masalah infeksi cacing tambang atau cacing gelang secara permanen di desa tersebut berdasarkan konsep siklus hidup parasit monoksen.
- b. Susunlah sebuah rancangan program intervensi kesehatan terpadu (kombinasi terapi medis, sanitasi lingkungan, dan edukasi perilaku) untuk mengatasi masalah ini secara berkelanjutan.

BAB II

BAKTERIOLOGI DASAR

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menentukan karakteristik fisiologis dan morfologis bakteri dari sampel lingkungan berdasarkan ciri khas domain Bacteria.*
- 2. Menggunakan pemahaman tentang struktur dinding sel bakteri (Gram-positif dan Gram-negatif) untuk memprediksi tingkat sensitivitasnya terhadap berbagai agen antimikroba.*
- 3. Mendemonstrasikan teknik pewarnaan bakteri yang tepat untuk mengidentifikasi variasi bentuk dan susunan sel bakteri di bawah mikroskop cahaya.*
- 4. Mengimplementasikan skema klasifikasi fenotipik berdasarkan Bergey's Manual untuk mengidentifikasi isolat bakteri tidak dikenal hingga tingkat genus.*
- 5. Memilih jenis bakteri yang berpotensi sebagai agens biokontrol atau probiotik berdasarkan analisis peran ekologis dan patogenisitasnya.*

B. PENDAHULUAN

Dunia mikroba, khususnya domain Bacteria, merupakan fondasi dari kehidupan di bumi yang menggerakkan berbagai siklus biogeokimia global. Bagi mahasiswa program studi Mikrobiologi, memahami bakteriologi dasar bukan sekadar mempelajari organisme mikroskopis sel tunggal, melainkan kunci untuk memecahkan berbagai tantangan riil di bidang kesehatan, industri, dan lingkungan. Sebagai negara tropis dengan megabiodiversitas yang tinggi, Indonesia menghadapi tantangan ganda: di satu sisi kaya akan potensi isolat bakteri lokal untuk aplikasi bioteknologi, namun di sisi lain rentan terhadap penyebaran penyakit infeksi bakteri patogen. Kegagalan dalam mengidentifikasi atau mengkarakterisasi bakteri secara tepat dapat berdampak fatal, baik dalam kegagalan

proses fermentasi industri berskala besar maupun kesalahan diagnosis klinis di rumah sakit. Oleh karena itu, penguasaan terhadap karakter fisik, struktur seluler, dan klasifikasi bakteri menjadi kompetensi mutlak yang harus dimiliki oleh seorang calon mikrobiolog sebelum melakukan manipulasi genetika maupun aplikasi lapangan.

Sebagai ilustrasi konkret, mari kita tinjau kasus kontaminasi pangan tradisional tempe bongkrek di Jawa Tengah yang disebabkan oleh bakteri *Burkholderia gladioli* pathovar *cocovenenans*. Secara teoretis, bakteri ini menghasilkan asam bongkrek, sebuah toksin mematikan yang menghambat kerja enzim translokase ADP/ATP pada mitokondria manusia. Implikasi praktis dari pemahaman struktur dan fisiologi bakteri ini sangatlah luas bagi seorang ilmuwan. Seorang mikrobiolog harus mampu menentukan kondisi lingkungan—seperti tingkat pH dan keberadaan lipid—yang memicu atau menghambat pertumbuhan bakteri tersebut selama proses fermentasi ampas kelapa. Melalui pemahaman tentang struktur dinding sel dan profil metaboliknya, kita tidak hanya dapat mendeteksi keberadaan kontaminan ini sejak dini menggunakan metode identifikasi cepat, tetapi juga dapat memodifikasi media tumbuh untuk mengeliminasi patogen tanpa merusak kapang bermanfaat *Rhizopus oligosporus*. Kasus ini menegaskan bahwa teori bakteriologi dasar selalu berkelindan dengan solusi atas permasalahan nyata di tengah masyarakat Indonesia.

Untuk membekali mahasiswa dengan kemampuan analitis dan aplikatif tersebut, Bab 2 ini akan mengupas tuntas prinsip-prinsip dasar bakteriologi. Pembahasan akan diawali dengan pemaparan mengenai pengertian dan karakteristik bakteri untuk meletakkan fondasi teoretis yang kuat. Selanjutnya, kita akan mendalami struktur dan fungsi sel bakteri guna memahami mesin molekuler di balik adaptabilitas mereka, yang diikuti dengan visualisasi variasi bentuk dan susunan bakteri. Bab ini juga akan melatih mahasiswa dalam menerapkan metode klasifikasi dan identifikasi bakteri, baik secara fenotipik konvensional maupun genotipik modern. Akhirnya, bab ini akan ditutup dengan analisis komprehensif mengenai peranan bakteri dalam kesehatan dan penyakit, yang akan membuka wawasan mahasiswa mengenai aplikasi klinis dan industri dari ilmu bakteriologi dasar ini.

C. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK BAKTERI

1. Karakteristik Fisiologis dan Morfologis Bakteri

Bakteri merupakan organisme bersel tunggal (uniseluler) yang tidak memiliki membran inti sel (prokariotik) dengan ukuran tubuh berkisar antara 0,5 hingga 5 mikrometer. Sebagai bagian dari domain Bacteria, organisme ini dicirikan oleh materi genetik berupa DNA sirkular tunggal yang terkonsentrasi pada wilayah nukleoid tanpa diselubungi selubung inti. Dinding sel bakteri yang mengandung peptidoglikan membedakannya secara tegas dari domain Archaea and Eukarya. Secara fisiologis, bakteri menunjukkan keragaman metabolik yang luar biasa, mulai dari fotoautotrof yang memanfaatkan cahaya matahari hingga kemolitotrof yang mengoksidasi senyawa anorganik untuk menghasilkan energi. Kemampuan pembelahan biner (binary fission) yang cepat memungkinkan populasi bakteri beradaptasi dengan sangat efisien terhadap fluktuasi nutrisi dan cekaman lingkungan eksternal.

DEFINISI

Bakteri Prokariotik: Organisme mikro sferikal, batang, atau spiral uniseluler yang dicirikan oleh ketiadaan membran nukleus, organel bermembran ganda, serta memiliki materi genetik berupa sirkular sirkuler ganda (nukleoid) dan dinding sel peptidoglikan.

2. Penentuan Karakteristik Fisiologis dari Sampel Lahan Pertanian

Kemampuan menentukan karakteristik fisiologis bakteri dari sampel lingkungan merupakan kompetensi utama dalam aplikasi bioteknologi tanah. Sebagai contoh konkret, pada lahan pertanian Alfisol di daerah Malang, Jawa Timur, para peneliti berupaya mengatasi keterbatasan unsur hara fosfat (P) yang terikat kuat oleh mineral tanah sehingga tidak dapat diserap tanaman. Alih-alih menambahkan pupuk kimia sintetis secara berlebihan yang berisiko merusak struktur tanah, mereka mengisolasi dan menerapkan bakteri pelarut fosfat (BPF) lokal (Lovitna dkk., 2021). Melalui analisis fisiologis di laboratorium, isolat bakteri

tersebut diketahui mampu menyekresikan asam-asam organik seperti asam sitrat dan asam laktat yang menstabilkan pH mikro lingkungan sehingga ikatan fosfat dengan kation logam terlepas dan menjadi tersedia bagi tanaman jagung.

Proses analisis karakteristik fisiologis ini diawali dengan menumbuhkan isolat bakteri pada media selektif Pikovskaya yang mengandung trikalsium fosfat tidak larut. Kemampuan bakteri melarutkan fosfat ditandai dengan terbentuknya zona bening (halo zone) di sekeliling koloni. Pengukuran indeks kelarutan fosfat dan laju sekresi asam organik merupakan bentuk evaluasi nyata bagaimana teori bakteriologi dasar diterapkan pada permasalahan riil. Pengembangan instrumen penilaian atau asesmen praktikum yang berbasis pada pemecahan masalah praktis ini sejalan dengan tren evaluasi pembelajaran modern yang menuntut mahasiswa berpikir kritis dan adaptif (Rosnaeni, 2021). Pendekatan inovatif dalam penyusunan materi ajar ini juga membutuhkan ketepatan penyampaian informasi dan tata bahasa, sebagaimana pentingnya pengembangan buku belajar terstruktur sejak pendidikan dasar (Lestari, 2021). Dengan demikian, pemahaman karakteristik dasar bakteri tidak hanya berhenti pada hafalan teoretis, melainkan bertransformasi menjadi landasan dalam merekayasa solusi hayati bagi ketahanan pangan nasional.

D. STRUKTUR DAN FUNGSI SEL BAKTERI

1. Arsitektur Dinding Sel Bakteri

Struktur sel bakteri dirancang untuk efisiensi metabolik dan proteksi maksimal terhadap fluktuasi tekanan osmotik lingkungan. Secara garis besar, sel bakteri terdiri atas struktur luar (dinding sel, kapsul, flagela, fimbria) dan struktur dalam (membran plasma, sitoplasma, ribosom, nukleoid, plasmid, dan endospora). Komponen paling krusial yang menentukan integritas fisik dan klasifikasi bakteri adalah dinding sel. Dinding sel bakteri tersusun atas peptidoglikan (murein) yang merupakan polimer dari N-asetilglukosamin (NAG) dan N-asetilmuramat (NAM) yang dihubungkan oleh ikatan silang peptida pendek. Perbedaan ketebalan lapisan peptidoglikan dan komponen

penyusun lainnya membagi bakteri menjadi dua kelompok besar, yaitu Gram-positif dan Gram-negatif.

2. Prediksi Sensitivitas terhadap Agen Antimikroba

Pengetahuan mendalam mengenai perbedaan arsitektur dinding sel ini dapat digunakan untuk memprediksi tingkat sensitivitas bakteri terhadap berbagai agen antimikroba. Penisilin bekerja dengan cara menghambat enzim transpeptidase yang mengatalisis pembentukan ikatan silang peptida pada peptidoglikan. Bakteri Gram-positif, yang memiliki lapisan peptidoglikan tebal tanpa membran luar, sangat sensitif terhadap penisilin karena obat tersebut dapat langsung menjangkau target kerjanya. Sebaliknya, bakteri Gram-negatif memiliki membran luar (outer membrane) yang kaya akan lipopolisakarida (LPS) dan protein porin yang bertindak sebagai penghalang hidrofobik yang mencegah penetrasi molekul antibiotik besar, sehingga bakteri Gram-negatif secara alami lebih resisten.

Kondisi ini terlihat nyata pada kasus infeksi nosokomial (infeksi yang didapat di rumah sakit) di Indonesia, seperti di RSUP Dr. Cipto Mangunkusumo, Jakarta. Ketika menghadapi kasus infeksi akibat bakteri Gram-negatif patogen seperti *Pseudomonas aeruginosa*, klinisi tidak dapat menggunakan antibiotik lini pertama berspektrum sempit seperti penisilin G. Mereka harus memilih antibiotik golongan sefalosporin generasi ketiga atau karbapenem yang dirancang khusus untuk mampu menembus membran luar bakteri Gram-negatif. Pemahaman struktural ini memperkuat pentingnya rekonstruksi pembelajaran struktur dan fungsi jaringan mikroba di laboratorium, sehingga calon praktisi medis dapat membuat keputusan klinis berbasis data biologi seluler yang akurat (Gusti, 2023). Model pembelajaran aktif berbasis praktikum mandiri ini juga selaras dengan filosofi merdeka belajar yang mendorong pemecahan masalah secara mandiri di berbagai jenjang pendidikan (Delu Pingge, 2022). Selain itu, riset pencarian agen antimikroba baru kini banyak diarahkan pada eksplorasi senyawa bioaktif tanaman lokal, merujuk pada keberhasilan dokumentasi keanekaragaman flora tropis berskala besar yang membuka peluang penemuan senyawa penghambat sintesis dinding sel bakteri (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

Tabel 2. Perbandingan Struktur Dinding Sel Bakteri Gram-Positif dan Gram-Negatif

Karakteristik	Gram-Positif	Gram-Negatif	Fungsi Utama	Sensitivitas Penisilin
Tebal Peptidoglikan	20-80 nm (Tebal)	2-8 nm (Tipis)	Menjaga bentuk sel & tekanan turgor	Tinggi
Membran Luar	Tidak ada	Ada (LPS & Porin)	Barier selektif & proteksi kimia	Rendah
Asam Teikoat	Ada	Tidak ada	Transport kation & muatan dinding	Tinggi
Ruang Periplasmik	Sempit / Tidak jelas	Nyata (Lebar)	Lokasi enzim hidrolitik	Rendah
Kandungan Lipid	Rendah (1-4%)	Tinggi (11-22%)	Komponen struktural membran luar	Rendah

Data di atas menunjukkan bahwa keberadaan membran luar pada bakteri Gram-negatif bertindak sebagai pelindung fisik yang signifikan, membatasi difusi senyawa terapeutik ke dalam periplasma. Sebaliknya, bakteri Gram-positif yang mengandalkan kestabilan lapisan peptidoglikan tebal tanpa pelindung luar menjadi target empuk bagi agen kimia perusak dinding sel.

E. BENTUK DAN SUSUNAN BAKTERI

1. Klasifikasi Bentuk Dasar Bakteri

Morfologi bakteri sangat beragam dan dikelompokkan ke dalam tiga bentuk dasar, yaitu kokus (bulat), basil (batang), dan spiral (berkelok). Bentuk-bentuk ini tidak hanya mencerminkan aspek estetika mikroskopis, melainkan berkaitan erat dengan adaptasi hidrodinamika, efisiensi penyerapan nutrisi, dan kemampuan kolonisasi pada permukaan inang. Selain bentuk sel

tunggal, bakteri juga menampilkan susunan sel khas yang terbentuk akibat kegagalan sel anakan untuk memisahkan diri setelah proses pembelahan biner. Sebagai contoh, pembelahan kokus pada satu bidang secara terus-menerus menghasilkan susunan rantai (streptokokus), sedangkan pembelahan pada beberapa bidang secara acak menghasilkan susunan menyerupai buah anggur (stafilokokus).

2. Teknik Pewarnaan untuk Identifikasi Morfologi

Mahasiswa mikrobiologi harus mendemonstrasikan teknik pewarnaan bakteri yang tepat, seperti pewarnaan Gram, pewarnaan sederhana, atau pewarnaan negatif, untuk mengidentifikasi variasi bentuk dan susunan sel ini secara akurat di bawah mikroskop cahaya. Keterampilan praktis ini sangat krusial dalam pengendalian mutu industri pangan berbasis fermentasi di Indonesia. Sebagai ilustrasi, dalam proses pembuatan yoghurt nabati berbasis sari hanjeli (*Coix lacryma-jobi*) yang dikembangkan sebagai alternatif bagi penderita intoleransi laktosa di Jawa Barat, pemantauan dinamika populasi starter bakteri asam laktat (BAL) mutlak diperlukan (Mutmainah dkk., 2025). Selama proses fermentasi, analis laboratorium melakukan pewarnaan Gram secara berkala untuk memastikan bahwa starter yang aktif adalah *Lactobacillus bulgaricus* yang berbentuk basil Gram-positif membentuk rantai pendek, serta *Streptococcus thermophilus* yang berbentuk kokus Gram-positif tersusun berantai panjang.

CONTOH

Pengamatan morfologi *Streptococcus thermophilus* pada sampel fermentasi susu dilakukan dengan mengambil satu lup suspensi sampel secara aseptis, membuat preparat apusan tipis di atas kaca objek, memfiksasi di atas api bunsen, lalu mewarnainya dengan kristal violet, iodin, alkohol dekolorisasi, dan safranin. Di bawah mikroskop cahaya dengan perbesaran 1000x berbantuan minyak imersi, sel akan tampak berwarna ungu (Gram-positif) dengan bentuk bulat sferis yang tersusun berjejer rapat membentuk rantai panjang yang khas.

Jika di bawah mikroskop terdeteksi bentuk basil Gram-negatif atau kokus berpasangan yang tidak sesuai dengan morfologi starter asli, hal tersebut mengindikasikan terjadinya kontaminasi oleh bakteri enterik patogen. Integrasi keterampilan identifikasi morfologi bakteri ke dalam paket pembelajaran terapan, baik di bidang pangan maupun peternakan, terbukti efektif meningkatkan kompetensi teknis mahasiswa secara signifikan (Suryaningsih, 2026). Melalui visualisasi morfologi yang jelas, mahasiswa tidak hanya belajar mengenali bentuk fisik sel, melainkan mampu menghubungkan bentuk tersebut dengan peran fisiologis spesifik dalam ekosistem mikroba.

F. KLASIFIKASI DAN IDENTIFIKASI BAKTERI

1. Sistem Klasifikasi Fenotipik Berdasarkan Bergey's Manual

Klasifikasi dan identifikasi bakteri merupakan pilar utama dalam sistematika mikroba yang bertujuan untuk mengelompokkan bakteri berdasarkan hubungan kekerabatan dan memberikan nama ilmiah yang sah. Secara historis, klasifikasi bakteri mengandalkan pendekatan fenotipik yang meliputi karakter morfologi, pewarnaan Gram, kebutuhan oksigen, serta profil biokimia. Skema klasifikasi fenotipik yang paling komprehensif dan diakui secara global tertuang dalam *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Manual ini menyediakan kunci dikotomi sistematis yang memungkinkan peneliti mengidentifikasi isolat bakteri yang belum dikenal hingga tingkat genus berdasarkan serangkaian uji laboratorium yang terstandarisasi.

2. Implementasi Kunci Determinasi Bergey's Manual

Dalam skenario praktis, mahasiswa mikrobiologi dapat mengimplementasikan skema klasifikasi Bergey's Manual untuk mengidentifikasi isolat bakteri tidak dikenal dari makanan fermentasi tradisional Indonesia, seperti *tape* singkong khas Bandung atau *growol* dari Kulon Progo. Ketika seorang mahasiswa berhasil mengisolasi bakteri berbentuk batang, Gram-positif, dan membentuk endospora dari sampel fermentasi tersebut, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan serangkaian uji biokimia dasar. Berdasarkan kunci determinasi Bergey's Manual, uji hidrolisis pati, uji katalase, dan uji motilitas dijalankan secara sistematis. Jika isolat tersebut menunjukkan

hasil positif pada uji katalase (menghasilkan gelembung oksigen saat ditetesi hidrogen peroksida) dan mampu menghidrolisis pati secara aktif, mahasiswa dapat dengan yakin mengarahkan identifikasi pada genus *Bacillus*.

i CATATAN

Ketelitian dalam membaca hasil uji biokimia sangat menentukan ketepatan identifikasi genus bakteri. Kesalahan kecil dalam interpretasi uji katalase atau uji fermentasi karbohidrat dapat mengarahkan penelusuran kunci determinasi Bergey's Manual ke genus yang salah, sehingga berisiko mengacaukan diagnosis klinis atau analisis kontaminasi pangan.

Proses identifikasi yang sistematis ini memerlukan tingkat literasi sains dan pemahaman metodologis yang mendalam. Penggunaan media pembelajaran interaktif di perguruan tinggi terbukti mampu mempercepat penguasaan langkah-langkah klasifikasi dikotomi ini oleh mahasiswa, mengubah pembelajaran taksonomi yang awalnya dianggap teoretis menjadi lebih aplikatif (Deviana, 2021). Di samping itu, penguatan literasi dasar mikrobiologi melalui modul praktikum yang terstruktur membantu mahasiswa menguasai konsep identifikasi fenotipik sebelum mereka melangkah ke metode genotipik berbasis sekuensing DNA 16S rRNA (Setiawan, 2021). Klasifikasi yang akurat ini juga menjadi rujukan penting saat membandingkan isolat lokal dengan database global, mirip dengan pentingnya pendokumentasian taksonomi keanekaragaman hayati dunia (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

G. PERANAN BAKTERI DALAM KESEHATAN DAN PENYAKIT

1. Patogenisitas dan Eksploitasi Ekologis Bakteri

Bakteri memainkan peran ganda yang sangat signifikan dalam kehidupan manusia, baik sebagai agen pemelihara kesehatan melalui hubungan simbiotik maupun sebagai agen penyebab penyakit (patogen). Di dalam tubuh manusia, triliunan bakteri hidup sebagai bagian dari mikrobiota normal yang mendukung

fungsi pencernaan, mensintesis vitamin esensial, dan melatih sistem imun. Sebaliknya, bakteri patogen memiliki berbagai faktor virulensi, seperti endotoksin (LPS pada dinding sel Gram-negatif) dan eksotoksin (protein toksik yang disekresikan), yang dapat merusak jaringan inang dan memicu manifestasi klinis penyakit infeksi yang parah.

2. **Pemilihan Bakteri sebagai Agens Biokontrol dan Probiotik**

Mahasiswa mikrobiologi dituntut mampu memilih jenis bakteri yang berpotensi sebagai agens biokontrol atau probiotik berdasarkan analisis mendalam terhadap peran ekologis dan patogenisitasnya. Sebagai contoh di Indonesia, demam berdarah dengue (DBD) merupakan penyakit endemis tahunan yang menimbulkan beban kesehatan masyarakat yang besar di wilayah perkotaan seperti Jakarta Timur. Untuk mengendalikan populasi vektor nyamuk *Aedes aegypti* tanpa merusak lingkungan dengan insektisida kimia, bakteri *Bacillus thuringiensis* subspecies *israelensis* (Bti) dipilih sebagai agens biokontrol hayati. Bakteri ini memproduksi kristal protein paraspora (delta-endotoksin) selama fase sporulasi yang sangat toksik secara spesifik bagi larva nyamuk, namun sepenuhnya aman bagi organisme non-target dan manusia.

⚠ PERHATIAN

Penggunaan antibiotik berspektrum luas secara tidak rasional (irrational antibiotic use) dapat memicu dysbiosis, yaitu kerusakan drastis pada populasi bakteri menguntungkan di dalam usus. Hal ini menghilangkan efek penghalang protektif alami (colonization resistance) sehingga bakteri oportunistik patogen seperti *Clostridioides difficile* dapat mengkolonisasi usus dengan cepat dan menyebabkan diare parah.

*Di sisi lain, pemanfaatan bakteri sebagai probiotik untuk menjaga keseimbangan mikrobiota usus terus berkembang. Penggunaan bakteri asam laktat seperti *Lactobacillus acidophilus* kini sering dikombinasikan dengan pangan fungsional herbal lokal. Sebagai contoh, penggabungan probiotik dengan mikrokapsul ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) yang kaya akan senyawa*

fenolik aktif tidak hanya menekan pertumbuhan bakteri patogen usus seperti *Salmonella enterica*, tetapi juga meningkatkan viabilitas probiotik itu sendiri di dalam saluran pencernaan (Unknown, 2022). Penyampaian konsep aplikasi bakteri yang kompleks ini di bangku kuliah kini sangat terbantu oleh pemanfaatan media pembelajaran interaktif berbasis komputer yang mampu memvisualisasikan mekanisme interaksi seluler antara bakteri patogen, probiotik, dan sistem imun inang secara dinamis (Nurpratiwiningsih, 2021). Penggunaan representasi visual yang kreatif ini sejalan dengan prinsip efektivitas media belajar dalam meningkatkan pemahaman serta literasi peserta didik (SUKAJAYA, 2025).

H. RANGKUMAN

Bakteri sebagai organisme prokariotik uniseluler memiliki materi genetik sirkular tunggal pada wilayah nukleoid serta dinding sel khas yang kaya akan peptidoglikan. Keunikan struktural ini, bersama dengan kapasitas pembelahan biner yang cepat dan keragaman metabolisme yang mencakup fotoautotrof hingga kemolitotrof, memberikan bakteri kemampuan adaptasi yang luar biasa terhadap berbagai cekaman lingkungan. Dalam konteks mikrobiologi terapan, pemahaman karakteristik fisiologis bakteri sangat kurisial, misalnya pada pemanfaatan bakteri pelarut fosfat lokal untuk menetralisasi pengikatan unsur hara di tanah Alfisol melalui sekresi asam organik. Keberadaan aktivitas ini dapat dievaluasi secara laboratoris melalui pembentukan zona bening pada media selektif Pikovskaya. Selain aspek fisiologis, pemahaman arsitektur dinding sel bakteri menjadi fondasi utama dalam memprediksi efektivitas agen antimikroba. Perbedaan mendasar antara bakteri Gram-positif yang memiliki lapisan peptidoglikan tebal tanpa pelindung luar, dengan bakteri Gram-negatif yang memiliki membran luar kaya lipopolisakarida, berdampak langsung pada sensitivitas terapeutik antibiotik. Bakteri Gram-positif sangat rentan terhadap penisilin yang menghambat sintesis peptidoglikan, sementara struktur membran luar pada bakteri Gram-negatif, seperti *Pseudomonas aeruginosa*, bertindak sebagai barier hidrofobik selektif yang menuntut penggunaan antibiotik tingkat lanjut seperti sefalosporin generasi ketiga atau karbapenem dalam penanganan klinis infeksi nosokomial. Keanekaragaman bentuk dasar bakteri

yang meliputi kokus, basil, dan spiral, beserta pola penataan sel akibat pembelahan biner, tidak hanya mempermudah identifikasi taksonomis tetapi juga merefleksikan spesialisasi fungsional dalam kolonisasi inang dan pertahanan hidup pada relung ekologisnya. Dengan demikian, penguasaan konsep bakteriologi dasar menjembatani teori biologi seluler dengan pemecahan masalah nyata di bidang pertanian berkelanjutan dan manajemen kesehatan modern.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana sekresi asam organik oleh bakteri pelarut fosfat yang diisolasi dari lahan Alfisol mampu mengubah ketersediaan hara bagi tanaman, dan evaluasi relevansi pembentukan zona bening pada media Pikovskaya sebagai parameter kuantitatif aktivitas fisiologis tersebut.
2. Bandingkan perbedaan struktural dinding sel bakteri Gram-positif dan Gram-negatif, lalu analisis mengapa perbedaan arsitektur tersebut menyebabkan bakteri Gram-positif jauh lebih sensitif terhadap antibiotik golongan penisilin dibandingkan dengan bakteri Gram-negatif.
3. Evaluasi tantangan klinis dalam mengatasi infeksi nosokomial yang disebabkan oleh *Pseudomonas aeruginosa*. Hubungkan analisis Anda dengan keberadaan komponen spesifik pada membran luar bakteri Gram-negatif yang membatasi efektivitas antibiotik lini pertama berspektrum sempit.
4. Rumuskan sebuah hipotesis mengenai bagaimana kombinasi antara kecepatan pembelahan biner bakteri dan keragaman jalur metabolisme mereka (seperti kemolitotrof) dapat dimanfaatkan untuk memulihkan lahan pertanian yang tercemar oleh residu pupuk kimia atau logam berat.
5. Telaah hubungan fungsional antara bentuk morfologi bakteri (kokus, basil, spiral) serta susunan sel hasil pembelahan biner dengan kemampuan mereka untuk melakukan kolonisasi permukaan inang dan bertahan hidup dari aliran hidrodinamika di lingkungannya.

b. Pilihan Berganda

1. Manakah dari karakteristik berikut yang secara tegas membedakan organisme dalam domain Bacteria dari domain Archaea dan Eukarya?
 - a. Memiliki materi genetik berupa DNA sirkular tunggal
 - b. Adanya peptidoglikan sebagai komponen penyusun dinding sel
 - c. Kemampuan melakukan pembelahan biner dengan sangat cepat
 - d. Ketidadaan membran inti sel yang menyelimuti materi genetik
 - e. Memiliki sistem metabolisme bervariasi seperti kemolitotrof
2. Pada pengujian bakteri pelarut fosfat (BPF) dari tanah Alfisol di media Pikovskaya, terbentuknya zona bening di sekeliling koloni bakteri disebabkan oleh...
 - a. Sekresi enzim hidrolitik ekstraseluler yang menguraikan dinding sel bakteri pesaing
 - b. Akumulasi senyawa organik nitrogen yang merangsang pertumbuhan eksponensial bakteri
 - c. Sekresi asam-asam organik yang menurunkan pH mikro untuk melepas ikatan kation dengan fosfat
 - d. Penyerapan aktif senyawa trikalsium fosfat larut ke dalam sitoplasma sel bakteri pelarut
 - e. Pembentukan lapisan peptidoglikan baru yang mengikat sisa-sisa mineral fosfat bebas
3. Berdasarkan perbedaan arsitektur dinding selnya, komponen manakah yang hanya dapat ditemukan pada dinding sel bakteri Gram-positif tetapi tidak ditemukan pada Gram-negatif?
 - a. N-asetilglukosamin (NAG)
 - b. N-asetilmuramat (NAM)
 - c. Membran luar (outer membrane)
 - d. Asam teikoat
 - e. Ruang periplasmik
4. Struktur membran luar pada bakteri Gram-negatif memiliki peran penting dalam meningkatkan resistensi alami bakteri terhadap antibiotik berspektrum sempit. Komponen spesifik pada struktur ini yang bertindak sebagai penghalang hidrofobik selektif adalah...

- a. Peptidoglikan dan asam teikoat
 - b. Protein porin dan lipopolisakarida
 - c. Ikatan silang tetrapeptida pada murein
 - d. Enzim transpeptidase periplasmik
 - e. Lipid bilayer dari membran plasma bagian dalam
5. Antibiotik golongan penisilin sangat efektif menghambat pertumbuhan bakteri Gram-positif karena mekanisme kerjanya secara spesifik menargetkan...
- a. Sintesis protein pada subunit ribosom bakteri
 - b. Enzim transpeptidase yang membentuk ikatan silang peptidoglikan
 - c. Integritas fosfolipid pada membran plasma bagian dalam
 - d. Replikasi DNA sirkular tunggal pada wilayah nukleoid
 - e. Transpor aktif kation melalui saluran asam teikoat
6. Ketika menghadapi kasus infeksi nosokomial oleh bakteri Gram-negatif patogen seperti *Pseudomonas aeruginosa*, klinisi menghindari penggunaan penisilin G dan memilih sefalosporin generasi ketiga. Landasan ilmiah pemilihan ini adalah...
- a. Penisilin G dapat merusak porin sehingga memicu pelepasan endotoksin berbahaya
 - b. *Pseudomonas aeruginosa* tidak memiliki dinding sel peptidoglikan yang menjadi target penisilin G
 - c. Sefalosporin generasi ketiga dirancang agar mampu menembus membran luar hidrofobik Gram-negatif
 - d. Sefalosporin generasi ketiga bekerja dengan menargetkan membran plasma, bukan peptidoglikan
 - e. Bakteri Gram-negatif menyerap penisilin G ke dalam ruang periplasmik yang sangat sempit
7. Wilayah nukleoid pada sel bakteri prokariotik dicirikan oleh...
- a. Keberadaan selubung membran ganda yang melindungi materi genetik dari sitoplasma
 - b. Konsentrasi materi genetik berupa molekul DNA sirkular ganda tanpa membran pembungkus
 - c. Kumpulan organel bermembran yang berfungsi memproses sintesis RNA dan protein
 - d. Struktur protein histon kompleks yang membungkus benang-benang kromatin linier

- e. Area khusus yang hanya berisi plasmid hasil transfer materi genetik konjugasi
- 8. Jika sel-sel berbentuk bulat (kokus) membelah diri pada satu bidang secara terus-menerus dan tetap saling melekat satu sama lain, susunan morfologi yang terbentuk disebut...
 - a. Sarkina
 - b. Streptokokus
 - c. Stafilokokus
 - d. Tetrad
 - e. Diplokokus
- 9. Ruang periplasmik yang lebar dan nyata pada bakteri Gram-negatif berfungsi sebagai...
 - a. Tempat penyimpanan cadangan makanan berupa glikogen dan granula lipid
 - b. Lokasi utama sintesis protein oleh ribosom yang melekat pada membran luar
 - c. Tempat akumulasi asam teikoat untuk mengatur transpor kation ke dalam sel
 - d. Lokasi aktivitas berbagai enzim hidrolitik dan protein pengikat hara
 - e. Penghasil energi utama melalui proses rantai transpor elektron anaerob
- 10. Kemampuan bakteri fotoautotrof dalam mempertahankan kelangsungan hidupnya di alam didasarkan pada aktivitas fisiologis berupa...
 - a. Mengoksidasi senyawa anorganik untuk menghasilkan energi kimia tanpa cahaya
 - b. Memanfaatkan cahaya matahari untuk mensintesis senyawa organik dari karbon dioksida
 - c. Mengurai sisa-sisa bahan organik kompleks menggunakan enzim hidrolitik ekstraseluler
 - d. Menyerap nutrisi organik langsung dari jaringan tubuh inang yang hidup
 - e. Memecah ikatan fosfat tidak larut menggunakan sekresi asam laktat dan asam sitrat

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah lahan pertanian di dataran tinggi Jawa Timur dilaporkan mengalami penurunan produktivitas tanaman jagung yang signifikan meskipun petani telah memberikan pupuk fosfat kimia dalam jumlah tinggi. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa kadar fosfat total di dalam tanah sangat tinggi, namun fosfat yang tersedia bagi tanaman sangat rendah akibat terikat kuat oleh mineral tanah pada kondisi pH basa. Anda ditugaskan sebagai seorang mikrobiolog tanah untuk merancang solusi hayati guna mengatasi masalah ini menggunakan bakteri lokal tanpa menambah beban pencemaran kimiawi.

Instruksi analisis: Analisis fenomena penahanan fosfat tersebut berdasarkan prinsip fisiologi bakteri. Rancanglah tahapan sistematis mulai dari isolasi bakteri dari lahan, metode skrining laboratorium untuk mengidentifikasi isolat unggul, hingga penjelasan mekanisme biokimia bagaimana bakteri terpilih tersebut mampu melepaskan fosfat agar dapat diserap oleh tanaman jagung.

2. Di unit perawatan intensif (ICU) sebuah rumah sakit, terjadi lonjakan kasus infeksi saluran kemih pasca-kateterisasi yang disebabkan oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa*. Uji sensitivitas awal menunjukkan bahwa bakteri ini resisten terhadap penisilin G dan ampicilin, yang merupakan antibiotik lini pertama di rumah sakit tersebut. Tim medis membutuhkan panduan segera mengenai dasar biologis resistensi ini untuk menentukan pilihan antibiotik baru yang lebih efektif dan menyusun protokol terapi yang rasional.

Instruksi analisis: Evaluasi penyebab kegagalan terapi penisilin G dan ampicilin pada kasus infeksi *Pseudomonas aeruginosa* berdasarkan perbedaan arsitektur dinding sel bakteri Gram-negatif. Berikan rekomendasi ilmiah mengenai golongan antibiotik alternatif yang tepat beserta penjelasan mekanisme molekulernya dalam menembus pertahanan dinding sel bakteri tersebut.

BAB III

KONSEP DASAR PENCEGAHAN DAN PENGENDALIAN INFEKSI

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menerapkan konsep rantai penularan infeksi untuk menentukan strategi pemutusan transmisi mikroorganisme patogen dalam berbagai skenario laboratorium dan fasilitas kesehatan.*
- 2. Mengimplementasikan prosedur kewaspadaan standar secara tepat guna meminimalkan risiko paparan agen infeksius selama aktivitas praktikum atau pelayanan kesehatan.*
- 3. Memilih metode sterilisasi, desinfeksi, dan antisepsis yang paling efektif berdasarkan karakteristik fisikokimia bahan serta jenis mikroba target yang dihadapi.*
- 4. Mendemonstrasikan teknik pengelolaan, pemilahan, dan pembuangan limbah medis serta benda tajam infeksius sesuai dengan regulasi keselamatan kerja yang berlaku di Indonesia.*
- 5. Menentukan tindakan penanganan darurat yang tepat dalam merespons kecelakaan kerja akibat paparan bahan biologis berbahaya di lingkungan kerja.*

B. PENDAHULUAN

Pencegahan dan Pengendalian Infeksi (PPI) merupakan pilar krusial dalam mikrobiologi terapan dan kesehatan masyarakat yang berdampak langsung pada keselamatan pasien, pekerja laboratorium, serta masyarakat luas. Di Indonesia, tantangan terkait infeksi yang didapat di fasilitas pelayanan kesehatan atau Healthcare-Associated Infections (HAIs) masih menjadi persoalan serius yang memerlukan penanganan sistematis berbasis bukti ilmiah. Sebagai contoh konkret, laporan epidemiologi nasional menunjukkan masih tingginya kejadian Infeksi Daerah Operasi

(IDO) di beberapa rumah sakit rujukan yang dipicu oleh kontaminasi bakteri patogen oportunistik seperti *Staphylococcus aureus* resisten metisilin (MRSA) akibat kegagalan sterilisasi instrumen atau buruknya higienitas tangan tenaga medis. Implikasi dari kegagalan prosedural ini sangat luas, mulai dari perpanjangan masa rawat inap pasien, peningkatan beban biaya kesehatan, hingga risiko penyebaran global strain bakteri yang resisten terhadap berbagai jenis antibiotik (multi-drug resistant organisms). Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai mekanisme transmisi mikroba patogen dan metode eliminasinya menjadi kompetensi mutlak yang harus dikuasai oleh setiap praktisi mikrobiologi.

Bagi mahasiswa program studi Mikrobiologi, penguasaan konsep PPI bukan sekadar menghafal lembar prosedur operasional standar, melainkan sarana untuk memahami aspek ekologi dan fisiologi mikroba dalam lingkungan buatan manusia. Mahasiswa dituntut untuk mampu menganalisis bagaimana faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu, dan jenis permukaan memengaruhi sintasan (survival rate) mikroba patogen. Sebagai ilustrasi, kemampuan bakteri *Acinetobacter baumannii* untuk bertahan hidup pada permukaan kering di unit perawatan intensif (ICU) selama berminggu-minggu memerlukan pendekatan desinfeksi kimiawi yang tidak hanya membunuh sel vegetatif, tetapi juga merusak matriks biofilm pelindungnya. Dengan menguasai dasar mikrobiologis dari tindakan pencegahan ini, lulusan mikrobiologi akan memiliki kapasitas untuk mengevaluasi efektivitas biosida, merancang protokol sanitasi di industri bioteknologi, serta memimpin implementasi biosafety di berbagai laboratorium riset dan diagnostik secara profesional.

Guna membekali mahasiswa dengan kemampuan aplikatif tersebut, bab ini akan menguraikan lima pilar utama pencegahan dan pengendalian infeksi secara berurutan. Pembahasan akan diawali dengan pemaparan mengenai Pengertian dan Tujuan Pencegahan Infeksi guna membangun landasan berpikir filosofis mengenai keselamatan biologis. Selanjutnya, kita akan membedah secara mendalam Rantai Penularan Infeksi sebagai instrumen untuk mengidentifikasi titik lemah transmisi patogen yang dapat diintervensi. Bab ini juga akan mengulas penerapan praktis Kewaspadaan Standar dalam Pelayanan Kesehatan, yang disusul

dengan pembahasan komparatif mengenai prinsip fisika dan kimia di balik proses Sterilisasi, Desinfeksi, dan Antiseptis. Bagian akhir bab ini akan ditutup dengan panduan taktis mengenai Pengelolaan Limbah dan Benda Tajam Infeksius guna memastikan seluruh rangkaian aktivitas penanganan mikroba dapat berjalan secara aman, etis, dan ramah lingkungan.

C. PENGERTIAN DAN TUJUAN PENCEGAHAN INFEKSI

Pencegahan dan Pengendalian Infeksi (PPI) merupakan sebuah disiplin ilmiah dan pendekatan praktis yang dirancang untuk mencegah penyebaran infeksi pada pasien, tenaga kesehatan, dan lingkungan sekitar. Dalam konteks mikrobiologi klinis, pencegahan ini difokuskan pada eliminasi atau minimalisasi paparan mikroorganisme patogen (bakteri, virus, jamur, dan parasit) di fasilitas pelayanan kesehatan. Di Indonesia, implementasi pencegahan infeksi diatur secara ketat melalui regulasi nasional, seperti yang terangkum dalam Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2023 tentang Kesehatan. Regulasi ini menegaskan tanggung jawab hukum dokter dan tenaga kesehatan lainnya dalam menjamin keselamatan pasien melalui standar pelayanan yang aman dan bebas dari risiko infeksi nosokomial (Ginanjari, 2025).

Tujuan utama dari pencegahan infeksi tidak hanya terbatas pada perlindungan individu pasien, melainkan juga mencakup aspek perlindungan hukum—yang selaras dengan urgensi regulasi perlindungan hukum bagi konsumen di sektor kesehatan lainnya (Unknown, 2025)—keselamatan kerja bagi perawat (Putra, 2026), serta minimalisasi pembiayaan kesehatan akibat perpanjangan masa rawat inap. Melalui penerapan protokol pencegahan yang sistematis, rumah sakit dan puskesmas di Indonesia diarahkan untuk mencapai Standar Pelayanan Minimal (SPM) bidang kesehatan yang optimal (Wahyuni, 2021). Keberhasilan pencapaian SPM ini berkorelasi langsung dengan penurunan angka kesakitan akibat infeksi yang didapat di fasilitas kesehatan (Healthcare-Associated Infections atau HAIs).

DEFINISI

Pencegahan Infeksi adalah serangkaian upaya, prosedur, dan kebijakan sistematis yang diterapkan di fasilitas kesehatan untuk mengidentifikasi, mengisolasi, dan mengeliminasi jalur penyebaran mikroorganisme patogen guna melindungi pasien, petugas, dan masyarakat sekitar.

Sebagai ilustrasi konkret, di beberapa rumah sakit umum daerah di Provinsi Jawa Barat, penerapan program PPI difokuskan pada penurunan angka kejadian Infeksi Aliran Darah Primer (IADP) akibat pemasangan kateter vena sentral. Implikasi klinis dari keberhasilan pencegahan ini adalah menurunnya kebutuhan penggunaan antibiotik spektrum luas secara signifikan, yang pada gilirannya menekan laju pertumbuhan bakteri resisten seperti *Escherichia coli* penghasil Extended-Spectrum Beta-Lactamase (ESBL). Dengan demikian, tujuan pencegahan infeksi melampaui proteksi fisik jangka pendek dan berkontribusi langsung pada pengendalian krisis resistensi antimikroba global.

Selain aspek klinis, keberhasilan PPI sangat bergantung pada kesadaran kolektif dan pemberdayaan seluruh elemen masyarakat serta kader kesehatan dalam mengawal program pemerintah (HARNANI, 2025). Ketika kader kesehatan di tingkat desa memahami pentingnya mencegah penularan patogen sejak dini, beban epidemiologis di fasilitas rujukan sekunder dapat ditekan secara dramatis. Untuk mencapai efektivitas tersebut, pendekatan PPI didasarkan pada pemahaman fisiologi mikroba yang mendalam. Penulis dalam studi botani dan taksonomi menekankan pentingnya dokumentasi keanekaragaman hayati untuk mendukung penelitian kesehatan (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Hal serupa berlaku dalam mikrobiologi medis, di mana pemetaan karakteristik biologis agen infeksius menjadi prasyarat mutlak untuk menentukan tindakan pencegahan yang presisi. Melalui pemahaman taksonomi dan ekologi mikroba ini, kita dapat merancang intervensi yang tidak hanya mematikan patogen tetapi juga aman bagi lingkungan biotik sekitar.

D. RANTAI PENULARAN INFEKSI

Penularan infeksi di lingkungan klinis maupun komunitas terjadi melalui siklus interaksi yang terstruktur, yang secara ilmiah disebut sebagai rantai penularan infeksi. Siklus ini terdiri atas enam komponen yang saling berhubungan: agen infeksius, reservoir, pintu keluar (portal of exit), metode transmisi, pintu masuk (portal of entry), dan penjamu rentan. Untuk memutus penularan penyakit yang disebabkan oleh bakteri, virus, atau parasit, praktisi mikrobiologi dan tenaga kesehatan harus mampu mengidentifikasi dan mengintervensi salah satu atau lebih mata rantai tersebut.

*Komponen pertama adalah agen infeksius, yang mencakup mikroorganisme patogen seperti virus influenza atau bakteri oportunistik. Komponen kedua adalah reservoir, tempat agen tersebut hidup dan berkembang biak. Sebagai contoh, dalam ekosistem akuatik di Indonesia, bakteri patogen seperti *Aeromonas hydrophila* dapat bersemayam di reservoir air tawar dan memicu infeksi sistemik pada ikan budi daya, yang berpotensi menular ke manusia jika penanganannya tidak higienis (Pattipeiluhu, 2022). Ketiga, pintu keluar merupakan jalur di mana mikroorganisme meninggalkan reservoir, seperti droplet saluran pernapasan pada kasus Infeksi Saluran Penyebaran Akut (ISPA). Masalah ISPA ini masih menjadi tantangan kesehatan masyarakat yang tinggi di berbagai wilayah Indonesia, seperti di pedesaan Sumatera Selatan, sehingga memerlukan edukasi preventif yang intensif untuk memutus rantai transmisi sejak dari pintu keluarnya (Rofikoh, 2026).*

Keempat, metode transmisi merujuk pada mekanisme perpindahan patogen dari reservoir ke penjamu baru. Transmisi dapat berlangsung secara langsung melalui kontak fisik, atau tidak langsung melalui media perantara (fomit) seperti instrumen medis yang terkontaminasi. Kelima, pintu masuk adalah titik di mana mikroorganisme menginvasi tubuh penjamu, contohnya melalui mukosa mulut, mata, atau luka terbuka pada kulit. Keenam, penjamu rentan adalah individu yang memiliki daya tahan tubuh rendah sehingga mudah terinfeksi. Di Indonesia, kerentanan penjamu ini sering kali diperberat oleh kondisi malnutrisi. Sebagai contoh, di Kabupaten Buleleng, Bali, terdapat korelasi erat antara pencegahan infeksi dan optimalisasi gizi pada wanita usia reproduktif untuk

memutus rantai transmisi infeksi vertikal dari ibu ke janin (Hamidah, 2026).

i CATATAN

Pemutusan rantai penularan pada komponen "metode transmisi" merupakan strategi yang paling cost-effective di fasilitas kesehatan, karena tidak membutuhkan intervensi farmakologis melainkan kedisiplinan dalam tindakan non-farmakologis seperti kebersihan tangan.

Implikasi praktis dari pemahaman rantai penularan ini sangat luas. Jika kita mampu merancang strategi untuk memblokir pintu masuk patogen—misalnya dengan mewajibkan penggunaan masker respiratorik di ruang rawat isolasi—maka paparan infeksi pada penjamu rentan dapat mencegah timbulnya penyakit secara signifikan meskipun agen infeksius di dalam reservoir sangat aktif. Hal ini menuntut pemahaman mendalam tentang siklus hidup patogen agar tindakan pencegahan dapat disesuaikan dengan karakteristik fisikokimia agen spesifik yang dihadapi.

E. KEWASPADAAN STANDAR DALAM PELAYANAN KESEHATAN

Kewaspadaan standar merupakan fondasi utama PPI yang dirancang untuk diaplikasikan kepada semua pasien, tanpa memandang apakah mereka terdiagnosis infeksi atau tidak. Prinsip dasar kewaspadaan standar berasumsi bahwa seluruh darah, cairan tubuh, sekresi, dan ekskresi (kecuali keringat) berpotensi menularkan mikroorganisme patogen. Implementasi kewaspadaan ini meliputi kebersihan tangan, penggunaan alat pelindung diri (APD), dekontaminasi peralatan perawatan pasien, pengendalian lingkungan, hingga penempatan pasien yang tepat.

Di Indonesia, efektivitas sistem pelayanan kesehatan sangat ditentukan oleh kepatuhan tenaga medis terhadap kewaspadaan standar ini. Sebagai contoh, di beberapa Puskesmas di Tangerang Selatan, kepatuhan terhadap protokol cuci tangan lima momen (*five moments for hand hygiene*) menjadi indikator kinerja krusial dalam responsivitas sistem kesehatan menghadapi beban penyakit menular

(Rahim, 2026). Kegagalan menerapkan kewaspadaan standar seperti kebersihan tangan sebelum melakukan tindakan invasif dapat menyebabkan komplikasi fatal, seperti kejadian infeksi saluran kemih (ISK) pada pasien lansia yang terpasang kateter urin (Anas, 2025). Edukasi mengenai personal hygiene dan kepatuhan petugas dalam merawat kateter terbukti menurunkan insidensi bakteriuria secara signifikan di berbagai rumah sakit di Jawa Tengah. Langkah edukatif untuk membangun kepatuhan ini sejalan dengan prinsip internalisasi nilai-nilai karakter dalam pendidikan modern (Rahman, 2025) yang menempatkan individu sebagai subjek didik yang bertanggung jawab penuh atas perilakunya (Ulandari, 2026).

Selain tindakan fisik di ruang perawatan, aspek kesadaran informasi dan pemanfaatan media digital juga memengaruhi kesiapan petugas kesehatan serta masyarakat dalam menyerap protokol pencegahan. Edukasi kewaspadaan standar kini banyak memanfaatkan platform internet, yang selain bermanfaat untuk diseminasi informasi kesehatan, juga menuntut kewaspadaan digital agar tidak memicu kecemasan atau gangguan kesehatan mental akibat maraknya hoaks medis (Yuliana, 2022).

Untuk mengklasifikasikan tindakan klinis dan kebutuhan proteksi yang sesuai, tabel berikut menyajikan panduan operasional penggunaan APD dalam kewaspadaan standar.

Tabel 3. Kebutuhan Alat Pelindung Diri Berdasarkan Risiko Prosedur

Jenis Tindakan Klinis	Tingkat Risiko	Alat Pelindung Diri (APD)	Tujuan Intervensi
Pemeriksaan fisik rutin	Rendah	Tidak perlu APD (kebersihan tangan)	Mencegah transmisi kontak
Pengambilan darah vena	Sedang	Sarung tangan pemeriksaan	Melindungi dari paparan darah
Pemasangan kateter urin	Sedang	Sarung tangan steril, gaun medis	Mencegah kontaminasi bakteri

Jenis Tindakan Klinis	Tingkat Risiko	Alat Pelindung Diri (APD)	Tujuan Intervensi
Intubasi endotrakeal	Tinggi	Goggle, masker N95, gaun, sarung tangan	Proteksi terhadap droplet aerosol
Debridemen luka terinfeksi	Tinggi	Apron anti air, sarung tangan, masker	Mencegah percikan cairan tubuh

Tabel 3. memberikan kerangka kerja bagi tenaga kesehatan dalam memilih jenis perlindungan yang proporsional sesuai dengan estimasi pajanan cairan tubuh yang akan dihadapi. Ketepatan dalam pemilihan APD ini tidak hanya menghemat sumber daya fasilitas kesehatan, tetapi juga memastikan perlindungan maksimal bagi petugas dari risiko infeksi bakteri multi-resisten di area perawatan kritis.

⚠ PERHATIAN

Kepatuhan menggunakan APD harus diimbangi dengan teknik pelepasan (*doffing*) yang benar. Banyak kontaminasi silang terjadi justru saat petugas melepas sarung tangan atau gaun pelindung dengan terburu-buru, sehingga mikroorganisme patogen berpindah ke kulit atau pakaian kerja mereka.

F. STERILISASI, DESINFEKSI, DAN ANTISEPSIS

Pengendalian mikroorganisme pada peralatan medis, permukaan lingkungan, dan jaringan hidup memerlukan pemahaman yang jelas mengenai perbedaan antara sterilisasi, desinfeksi, dan antiseptik. Sterilisasi merupakan proses penghancuran seluruh bentuk kehidupan mikroba, termasuk endospora bakteri yang sangat resisten, baik secara fisik maupun kimiawi. Desinfeksi adalah eliminasi sebagian besar patogen pada benda mati (tidak termasuk spora), sedangkan antiseptik merupakan penggunaan zat kimia (antiseptik) pada jaringan hidup untuk menghambat atau membunuh mikroorganisme guna mencegah infeksi.

DEFINISI

Sterilisasi adalah proses mutlak untuk membebaskan suatu bahan atau objek dari semua bentuk mikroorganisme hidup, baik vegetatif maupun spora, melalui metode fisik (panas basah/kering, radiasi, filtrasi) atau kimiawi (gas etilen oksida).

Pemilihan metode dekontaminasi ini sangat krusial dalam rantai distribusi dan validasi produk farmasi sensitif di Indonesia. Sebagai contoh, dalam industri farmasi nasional yang memproduksi obat-obatan berbasis rantai dingin (cold chain), sterilisasi wadah dan validasi pengiriman harus dijaga secara ketat untuk mencegah kontaminasi bakteri kontaminan tanpa merusak stabilitas bahan aktif obat tersebut (Anggi, 2026). Kegagalan dalam mengontrol mikroba selama proses distribusi dapat memicu degradasi produk dan membahayakan keselamatan pasien.

Metode sterilisasi fisik yang paling umum digunakan adalah autoklaf, yang memanfaatkan uap air jenuh bertekanan tinggi pada suhu 121 derajat Celsius selama 15-20 menit. Panas basah ini bekerja dengan cara mendenaturasi protein esensial dan merusak membran sel mikroba. Sebaliknya, desinfeksi sering kali menggunakan bahan kimia seperti klorin atau senyawa amonium kuaterner pada permukaan non-pori. Dalam konteks penelitian bahan alam dan farmakognosi di Indonesia, pengembangan antiseptik baru banyak memanfaatkan ekstrak tumbuhan herbal lokal yang diidentifikasi memiliki aktivitas antimikroba kuat. Penelitian taksonomi tumbuhan seperti yang terdokumentasi dalam studi keanekaragaman flora menjadi acuan penting untuk melacak spesies potensial yang kaya akan senyawa fitokimia aktif (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

CONTOH

Rumah Sakit Umum Pusat Dr. Hasan Sadikin di Bandung menerapkan protokol sterilisasi ganda untuk instrumen bedah laparoskop. Instrumen yang tidak tahan panas tinggi disterilkan menggunakan gas hidrogen peroksida plasma bersuhu rendah, sedangkan instrumen baja tahan karat disterilkan menggunakan autoklaf standar. Evaluasi berkala menggunakan indikator biologi

berisi spora *Geobacillus stearothermophilus* dilakukan untuk memastikan efektivitas proses sterilisasi tersebut berjalan sempurna.

Implikasi dari ketepatan memilih metode sterilisasi dan antiseptis adalah terjaminnya kualitas layanan bedah dan laboratorium mikrobiologi. Kesalahan dalam membedakan penggunaan desinfektan (untuk benda mati) dan antiseptik (untuk kulit) dapat menyebabkan luka bakar kimiawi pada jaringan pasien atau sebaliknya, menyisakan mikroba patogen pada instrumen medis yang berujung pada infeksi pascabedah. Oleh karena itu, setiap laboratorium mikrobiologi wajib menyusun matriks kompatibilitas bahan kimia terhadap instrumen sebelum mengimplementasikan protokol dekontaminasi secara luas di lapangan.

G. PENGELOLAAN LIMBAH DAN BENDA TAJAM INFEKSIOUS

Aktivitas pelayanan kesehatan dan riset mikrobiologi di laboratorium menghasilkan berbagai jenis limbah yang jika tidak dikelola dengan benar dapat menjadi sumber penularan penyakit dan merusak lingkungan. Limbah medis dikategorikan menjadi limbah infeksius (terkontaminasi darah atau cairan tubuh), limbah benda tajam (jarum suntik, pisau bedah), limbah patologis (jaringan tubuh), serta limbah kimia/farmasi. Pengelolaan limbah ini harus mengikuti regulasi lingkungan hidup yang ketat untuk mencegah kecelakaan kerja dan pencemaran wilayah sekitar.

Di Indonesia, pengelolaan limbah medis diatur secara sinergis antara Kementerian Kesehatan dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Tata kelola adaptif dan mitigasi risiko lingkungan menjadi mutlak diperlukan agar limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) medis tidak bocor ke tempat pembuangan akhir domestik (Pratiwi, 2025). Kasus pencemaran limbah medis berupa jarum suntik bekas di pantai-pantai wisata atau area publik di beberapa daerah menunjukkan pentingnya tata kelola pembuangan yang terintegrasi dan bertanggung jawab demi melindungi kesehatan masyarakat luas (Kiswanto, 2021).

Langkah pertama yang paling krusial dalam pengelolaan limbah adalah pemilahan di sumbernya (point of generation).

Limbah infeksius harus dimasukkan ke dalam kantong plastik berwarna kuning, sedangkan limbah domestik non-medis dimasukkan ke dalam kantong plastik hitam. Benda tajam infeksius harus segera dibuang ke dalam wadah khusus yang tahan tusuk, tahan air, dan dapat ditutup rapat (safety box), tanpa ditekuk atau disarungkan kembali (no recapping) guna menghindari kecelakaan tertusuk jarum (needlestick injury).

⚠ PERHATIAN

Pengisian safety box untuk jarum suntik bekas tidak boleh melebihi tiga perempat (3/4) bagian dari kapasitas wadah. Pengisian yang berlebihan sangat berisiko menyebabkan jarum mencuat keluar dan melukai petugas pengumpul limbah saat proses pengangkutan.

Jika terjadi kecelakaan kerja berupa tertusuk jarum infeksius, protokol penanganan darurat harus segera diaktifkan. Bagian tubuh yang terluka harus segera dibilas dengan air mengalir dan sabun antiseptik tanpa ditekan-tekan secara berlebihan, lalu segera dilaporkan ke Komite K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja) atau unit gawat darurat untuk mendapatkan profilaksis pascapajanan (post-exposure prophylaxis atau PEP) dalam waktu kurang dari 72 jam.

Implikasi dari kedisiplinan mengelola limbah medis ini adalah terciptanya lingkungan kerja biosafety level yang aman. Mahasiswa mikrobiologi yang terlatih dalam melakukan pemilahan limbah kultur bakteri di laboratorium sejak masa perkuliahan akan membawa budaya keselamatan kerja ini ke industri bioteknologi maupun rumah sakit tempat mereka mengabdikan diri di masa depan. Untuk memastikan keamanan selama penyimpanan sementara, limbah infeksius tidak boleh disimpan lebih dari 48 jam pada suhu ruang sebelum dimusnahkan menggunakan insinerator berizin atau diautoklaf pada suhu tinggi. Dengan menerapkan langkah penanganan limbah yang sistematis ini, laboratorium mikrobiologi dapat berkontribusi secara nyata pada pemeliharaan ekosistem yang sehat dan berkelanjutan di Indonesia.

H. RANGKUMAN

*Pencegahan dan Pengendalian Infeksi (PPI) mengintegrasikan prinsip mikrobiologi klinis dengan tindakan preventif sistematis guna menekan angka infeksi nosokomial serta mengendalikan krisis resistensi antimikroba global, seperti penyebaran bakteri *Escherichia coli* penghasil Extended-Spectrum Beta-Lactamase (ESBL). Upaya eliminasi patogen ini bertumpu pada pemahaman mendalam mengenai karakteristik fisiologis, ekologis, dan taksonomi mikroba, yang memandu penentuan intervensi secara presisi tanpa merusak keseimbangan lingkungan biotik. Secara operasional, penyebaran penyakit dikendalikan dengan memutus rantai penularan infeksi yang melibatkan intervensi terstruktur pada enam komponen utama: agen infeksius, reservoir seperti lingkungan akuatik atau saluran pernapasan manusia, pintu keluar, metode transmisi, pintu masuk, dan penjamu rentan. Mengintervensi metode transmisi melalui tindakan non-farmakologis, seperti kepatuhan kebersihan tangan, terbukti sebagai strategi paling efisien dan hemat biaya dalam meminimalkan paparan patogen secara signifikan. Di sisi lain, tingkat kerentanan penjamu yang dipengaruhi oleh status nutrisi serta faktor eksternal lingkungan menunjukkan bahwa intervensi klinis di rumah sakit harus bersinergi dengan pemberdayaan kader kesehatan di tingkat komunitas demi menekan beban epidemiologis sejak dini. Sebagai pilar utama pelayanan medis, kewaspadaan standar berasumsi bahwa seluruh darah dan cairan tubuh pasien berpotensi menularkan patogen tanpa memandang status diagnosis. Implementasi protokol ini secara disiplin—meliputi kepatuhan terhadap lima momen kebersihan tangan, penggunaan alat pelindung diri yang tepat, hingga dekontaminasi peralatan medis—merupakan kunci utama dalam mencegah komplikasi fatal seperti infeksi saluran kemih akibat kateter pada pasien rentan, sekaligus menjamin keselamatan kerja bagi tenaga kesehatan dan pemenuhan standar pelayanan minimal.*

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana keberhasilan program Pencegahan dan Pengendalian Infeksi dalam menekan angka Infeksi Aliran Darah Primer secara klinis dapat berkontribusi langsung pada

- pencegahan krisis global resistensi antimikroba, khususnya terkait bakteri penghasil ESBL.
2. Evaluasi mengapa memutus rantai penularan pada komponen "metode transmisi" dianggap sebagai strategi paling cost-effective di fasilitas kesehatan dibandingkan dengan melakukan intervensi pada komponen "penjamu rentan". Berikan argumentasi ilmiah Anda berdasarkan aspek farmakologis dan non-farmakologis.
 3. Rumuskan korelasi antara pemahaman taksonomi serta karakteristik biologis agen infeksius dengan ketepatan perancangan metode dekontaminasi peralatan medis dalam protokol kewaspadaan standar. Bagaimana ketidakpahaman terhadap aspek ini dapat memicu kegagalan sterilisasi?
 4. Telaah hubungan timbal balik antara status nutrisi masyarakat di tingkat komunitas dengan beban kerja epidemiologis di fasilitas pelayanan kesehatan rujukan sekunder. Mengapa pemberdayaan kader kesehatan dalam pencegahan infeksi sangat krusial dalam konteks ini?
 5. Argumentasikan dampak kegagalan penerapan kewaspadaan standar, seperti ketidakpatuhan terhadap lima momen kebersihan tangan, terhadap aspek keselamatan kerja perawat dan risiko konsekuensi hukum bagi fasilitas kesehatan berdasarkan regulasi kesehatan nasional yang berlaku di Indonesia.

b. Pilihan Berganda

1. Penerapan program Pencegahan dan Pengendalian Infeksi (PPI) yang efektif di rumah sakit terbukti dapat menurunkan penggunaan antibiotik spektrum luas. Dampak ekologis jangka panjang yang paling signifikan dari fenomena ini adalah...
 - a. penurunan biaya operasional pemeliharaan alat medis secara drastis
 - b. peningkatan sistem imun alami seluruh pasien yang dirawat inap
 - c. penekanan laju mutasi dan penyebaran bakteri penghasil ESBL
 - d. eliminasi total seluruh bakteri oportunistik dari reservoir rumah sakit
 - e. percepatan masa inkubasi virus patogen di lingkungan klinis

2. Dalam konteks rantai penularan infeksi, bakteri *Aeromonas hydrophila* yang hidup di ekosistem air tawar dan berpotensi memicu infeksi sistemik pada manusia dikategorikan ke dalam komponen...
 - a. Agen infeksius
 - b. Reservoir
 - c. Pintu masuk
 - d. Metode transmisi
 - e. Penjamu rentan
3. Tindakan non-farmakologis seperti kebersihan tangan dinilai sebagai strategi pencegahan infeksi yang paling *cost-effective*. Hal ini dikarenakan tindakan tersebut bekerja dengan cara memutus rantai penularan pada komponen...
 - a. Pintu keluar agen infeksius
 - b. Kepekaan penjamu rentan
 - c. Karakteristik biologis agen
 - d. Metode transmisi patogen
 - e. Kapasitas reproduksi reservoir
4. Prinsip dasar dari kewaspadaan standar dalam pelayanan kesehatan mengharuskan tenaga medis untuk berasumsi bahwa...
 - a. Pasien dengan diagnosis penyakit menular saja yang memerlukan isolasi ketat
 - b. Semua cairan tubuh kecuali keringat berpotensi menularkan mikroorganisme patogen
 - c. Penggunaan alat pelindung diri hanya dilakukan saat melakukan tindakan bedah mayor
 - d. Pasien lansia merupakan satu-satunya kelompok penjamu yang rentan infeksi
 - e. Proses dekontaminasi peralatan medis cukup dilakukan menggunakan air mengalir
5. Pemberdayaan kader kesehatan di tingkat desa dalam mendeteksi dan mencegah penularan penyakit sejak dini memiliki implikasi epidemiologis berupa...
 - a. pengalihan fungsi klinis rumah sakit rujukan ke fasilitas kesehatan primer
 - b. penurunan beban kunjungan pasien infeksi di fasilitas rujukan sekunder

- c. penghapusan kebutuhan vaksinasi massal di wilayah pedesaan
 - d. peningkatan resistensi alami masyarakat terhadap bakteri oportunistik
 - e. peniadaan jalur transmisi droplet pada penyakit saluran pernapasan
6. Droplet saluran pernapasan yang dihasilkan saat penderita Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) batuk atau bersin merupakan representasi dari komponen rantai penularan...
- a. Agen infeksius
 - b. Pintu masuk
 - c. Pintu keluar
 - d. Penjamu rentan
 - e. Metode transmisi langsung
7. Pada kasus penularan infeksi vertikal dari ibu ke janin di daerah dengan keterbatasan sumber daya, faktor penentu pada komponen "penjamu rentan" yang paling dominan dipengaruhi oleh...
- a. Mutasi genetik patogen dalam plasenta
 - b. Status nutrisi wanita usia reproduktif
 - c. Efektivitas sterilisasi alat persalinan
 - d. Kepatuhan penggunaan masker oleh bidan
 - e. Jenis desinfektan yang digunakan di ruang bersalin
8. Seorang pasien lansia yang terpasang kateter urin di ruang perawatan mengalami demam tinggi akibat Infeksi Saluran Kemih (ISK). Kegagalan prosedur PPI yang paling mungkin mendasari kejadian ini adalah...
- a. Ketidakpatuhan terhadap protokol kebersihan tangan sebelum tindakan invasif
 - b. Penggunaan antibiotik profilaksis dosis tinggi yang tidak rasional
 - c. Penempatan pasien di ruang rawat bersama pasien non-infeksi
 - d. Kurangnya asupan nutrisi protein tinggi selama masa perawatan
 - e. Kegagalan melakukan skrining mutasi bakteri resisten saat pasien masuk

9. Pemetaan karakteristik taksonomi dan fisiologi mikroba sangat penting dalam merancang strategi pencegahan infeksi yang presisi karena bermanfaat untuk...
 - a. Mengubah patogen menjadi bakteri komensal yang menguntungkan tubuh
 - b. Mempercepat waktu generasi pembelahan sel bakteri di laboratorium
 - c. Menentukan agen sterilisasi yang efektif tanpa merusak lingkungan biotik
 - d. Mengeliminasi kebutuhan penggunaan alat pelindung diri bagi tenaga medis
 - e. Mengisolasi seluruh materi genetik virus tanpa bantuan fasilitas laboratorium
10. Berdasarkan regulasi kesehatan nasional di Indonesia, kegagalan fasilitas pelayanan kesehatan dalam menerapkan standar PPI yang aman dapat berkonsekuensi pada...
 - a. Pengambilalihan manajemen rumah sakit oleh organisasi profesi perawat
 - b. Tuntutan hukum akibat kelalaian dalam menjamin keselamatan pasien
 - c. Kewajiban memberikan antibiotik gratis kepada seluruh pasien rawat inap
 - d. Penghapusan kewajiban sertifikasi kompetensi bagi tenaga medisnya
 - e. Penutupan otomatis seluruh fasilitas pelayanan kesehatan tingkat primer

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah Unit Perawatan Intensif (ICU) di sebuah rumah sakit daerah melaporkan lonjakan kasus infeksi nosokomial yang disebabkan oleh *Escherichia coli* penghasil *Extended-Spectrum Beta-Lactamase* (ESBL). Sebagian besar pasien yang terinfeksi menggunakan kateter vena sentral dan kateter urin. Investigasi awal menunjukkan bahwa kepatuhan perawat terhadap protokol kebersihan tangan "lima momen" hanya mencapai 60%, dan terdapat keterbatasan stok cairan antiseptik berbasis alkohol di beberapa bilik pasien. Selain itu, pembersihan lingkungan sekitar tempat tidur pasien tidak terjadwal dengan konsisten.

- Instruksi:* Analisislah skenario di atas berdasarkan konsep rantai penularan infeksi. Identifikasi komponen rantai penularan yang paling berkontribusi terhadap penyebaran infeksi ini, dan rumuskan sebuah strategi intervensi non-farmakologis yang komprehensif serta *cost-effective* untuk mengatasi masalah tersebut di ICU.
2. Di sebuah desa terpencil di Sumatera Selatan, angka kejadian Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) pada balita melonjak tajam dalam tiga bulan terakhir. Wilayah ini memiliki tingkat malnutrisi sedang hingga berat yang cukup tinggi pada ibu menyusui dan balita. Puskesmas setempat memiliki keterbatasan tenaga medis, namun memiliki jaringan kader kesehatan desa yang aktif. Kebiasaan masyarakat yang kurang memperhatikan etika batuk dan ventilasi rumah yang minim memperburuk penyebaran patogen melalui droplet.
- Instruksi:* Hubungkanlah konsep kerentanan penjamu dengan jalur transmisi patogen pada kasus di atas. Rancanglah sebuah program kemitraan berbasis komunitas yang melibatkan kader kesehatan untuk memutus rantai penularan ISPA tanpa bergantung pada intervensi farmakologis tingkat lanjut.

BAB IV

FLORA NORMAL DAN MIKROORGANISME

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menentukan penggolongan flora normal antara kelompok residen dan transien berdasarkan analisis karakteristik fisiologis serta mekanisme interaksinya dengan jaringan inang.*
- 2. Menggunakan prinsip mikroekologi kulit dan mukosa untuk memprediksi profil jenis mikroorganisme yang mendominasi area tubuh tertentu berdasarkan kondisi mikro-lingkungan spesifiknya.*
- 3. Menerapkan data komposisi flora normal saluran pencernaan untuk merancang rekomendasi diet berbasis pangan fungsional lokal dalam menjaga homeostasis mikrobiota usus.*
- 4. Menentukan pengaruh perubahan pH dan fluktuasi hormonal terhadap profil flora normal saluran reproduksi wanita serta dampaknya bagi pertahanan terhadap patogen.*
- 5. Mengimplementasikan konsep dysbiosis untuk memecahkan studi kasus klinis mengenai infeksi oportunistik yang dipicu oleh gangguan keseimbangan flora normal tubuh.*

B. PENDAHULUAN

Tubuh manusia bukanlah sebuah entitas steril, melainkan sebuah ekosistem dinamis yang dihuni oleh triliunan mikroorganisme yang hidup berdampingan secara harmonis. Bagi mahasiswa mikrobiologi, pemahaman mendalam mengenai komunitas mikroba ini sangat krusial karena batas antara kondisi sehat dan sakit sering kali ditentukan oleh keseimbangan interaksi antara inang dan mikrobiota tersebut. Selama ini, perhatian sering kali terpusat pada mikroorganisme patogen penyebab infeksi, padahal keberadaan flora

normal pada permukaan tubuh seperti kulit, rongga mulut, saluran pencernaan, dan saluran reproduksi bertindak sebagai benteng pertahanan utama. Mereka menempati relung ekologis, memanfaatkan nutrisi, dan menghasilkan senyawa antimikroba yang secara aktif menghambat kolonisasi bakteri patogen melalui mekanisme eksklusi kompetitif. Kegagalan dalam menjaga stabilitas populasi mikroba komensal ini dapat memicu transisi ekologis yang merugikan bagi kesehatan inang.

Sebagai ilustrasi konkret, fenomena pergeseran populasi mikroba ini terlihat jelas pada kasus Antibiotic-Associated Diarrhea (AAD) yang kerap terjadi di fasilitas kesehatan di Indonesia, seperti yang sering dilaporkan pada pasien rawat inap pasca-terapi antibiotik intensif di RSUP Dr. Sardjito, Yogyakarta. Secara konsep, pemberian antibiotik berspektrum luas yang ditujukan untuk membunuh bakteri patogen penyebab infeksi sistemik secara tidak sengaja turut menyapu bersih populasi bakteri menguntungkan, khususnya genus *Lactobacillus* dan *Bifidobacterium* di dalam usus (Konsep). Akibat hilangnya tekanan kompetitif dari flora normal ini, spora bakteri oportunistik *Clostridioides difficile* yang resisten terhadap antibiotik tersebut dapat berkecambah, memperbanyak diri, dan memproduksi toksin yang memicu peradangan hebat pada dinding kolon (Contoh). Implikasi klinis dari fenomena ini menegaskan bahwa penanganan infeksi tidak boleh mengabaikan kelestarian flora normal; mahasiswa mikrobiologi harus mampu merancang solusi pemulihan mikrobiota, salah satunya melalui pemanfaatan probiotik berbasis pangan fermentasi tradisional seperti dadih asal Sumatra Barat atau tempe, guna mengembalikan keseimbangan ekosistem usus secara cepat.

Guna membekali mahasiswa dengan kemampuan analisis dan aplikatif tersebut, bab ini akan mengupas tuntas dinamika mikrobiota manusia melalui lima sub-bab utama. Pembahasan akan diawali dengan Pengertian dan Karakteristik Flora Normal untuk meletakkan fondasi teoretis mengenai sifat hidup komensalistik dan mutualistik. Selanjutnya, kita akan menelusuri variasi distribusi spasialnya secara spesifik, yang meliputi Flora Normal pada Kulit dan Mukosa, Flora Normal pada Saluran Pencernaan, serta Flora Normal pada Saluran Reproduksi. Pada bagian akhir, bab ini akan menyajikan analisis mendalam mengenai Perubahan Flora Normal

dan Terjadinya Penyakit. Melalui pendekatan studi kasus nyata di lingkungan sekitar kita, mahasiswa diharapkan mampu menerapkan pengetahuan teoritis ini untuk memecahkan berbagai persoalan klinis maupun preventif di bidang kesehatan.

C. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK FLORA NORMAL

Tubuh manusia merupakan ekosistem kompleks yang dihuni oleh triliunan mikroorganisme. Komunitas mikroba ini secara kolektif dikenal sebagai flora normal atau mikrobiota indigenous. Flora normal didefinisikan sebagai populasi mikroorganisme yang hidup secara alami pada permukaan luar atau dalam tubuh manusia yang sehat tanpa menyebabkan efek patologis yang nyata. Karakteristik interaksi antara flora normal dan inang umumnya bersifat komensalisme (mikroorganisme mendapat keuntungan tanpa merugikan inang) atau mutualisme (kedua belah pihak saling diuntungkan). Memahami karakteristik fisiologis dan klasifikasi flora normal sangat penting bagi mahasiswa untuk memprediksi bagaimana mikroorganisme ini mempertahankan homeostasis tubuh atau justru berubah menjadi patogen (Unknown, 2025).

Berdasarkan analisis karakteristik fisiologis dan durasi kolonisasi pada jaringan inang, flora normal diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu flora residen (*resident flora*) dan flora transien (*transient flora*).

DEFINISI

Flora Residen Kelompok mikroorganisme tetap yang menghuni area tubuh tertentu pada usia tertentu secara konstan dan akan segera terbentuk kembali apabila terjadi gangguan. **Flora Transien** Kelompok mikroorganisme non-patogen atau berpotensi patogen yang mendiami kulit atau mukosa selama beberapa jam, hari, atau minggu, berasal dari lingkungan luar, dan tidak membentuk koloni permanen.

Flora residen telah beradaptasi secara evolusioner dengan kondisi mikro-lingkungan spesifik inang, seperti pH, ketersediaan oksigen, kelembapan, dan keberadaan reseptor seluler tertentu. Sebaliknya, *flora transien* tidak mampu bertahan hidup lama karena

kalah bersaing dengan flora residen, dieliminasi oleh sistem imun inang, atau hanyut oleh pencucian fisik.

Dalam praktiknya, mahasiswa mikrobiologi dapat menerapkan pemahaman penggolongan ini untuk menganalisis efektivitas sanitasi. Sebagai contoh, di fasilitas kesehatan Indonesia, penerapan Gerakan Masyarakat Hidup Sehat (GERMAS) yang dicanangkan oleh Kementerian Kesehatan RI sangat menekankan prosedur cuci tangan dengan sabun. Tindakan mekanis mencuci tangan ini bertujuan utama untuk mengeliminasi flora transien yang menempel pada epidermis kulit setelah kontak dengan pasien atau permukaan lingkungan yang terkontaminasi. Flora residen yang berada di lapisan kulit yang lebih dalam umumnya tidak mudah hilang oleh pencucian biasa. Hal ini dikarenakan mekanisme interaksi fisik flora residen yang terikat kuat pada reseptor keratinosit. Pemahaman ini melandasi pentingnya membedakan tindakan cuci tangan sosial dengan disinfeksi bedah yang memerlukan bahan antiseptik kuat untuk menekan populasi flora residen sebelum prosedur invasif dilakukan.

Secara ekologis, keberadaan flora residen berfungsi sebagai mekanisme pertahanan biologis yang esensial. Mereka mencegah kolonisasi bakteri patogen eksogen melalui fenomena eksklusi kompetitif atau interferensi bakteri. Kompetisi ini mencakup perebutan nutrisi yang terbatas, penguasaan reseptor adhesi pada permukaan epitel, serta sekresi senyawa antimikroba alami seperti bakteriosin dan asam lemak rantai pendek yang menurunkan pH lingkungan sekitar. Keanekaragaman ekosistem mikroba tubuh ini mencerminkan prinsip keseimbangan ekologis yang kompleks, mirip dengan konsep keanekaragaman hayati makro yang diamati dalam studi biogeografi (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Di luar konteks sains murni, keindahan dan keunikan visual keanekaragaman hayati ini juga kerap menginspirasi ekspresi seni dan desain kreatif (Saraswati, 2021). Dengan menjaga kelestarian flora residen, inang secara tidak langsung mempertahankan stabilitas fisiologis seluruh sistem tubuh dari invasi patogen luar.

D. FLORA NORMAL PADA KULIT DAN MUKOSA

Kulit dan membran mukosa merupakan organ pembatas utama yang memisahkan bagian dalam tubuh manusia dengan lingkungan

luar. Kedua jaringan ini memiliki karakteristik mikroekologi yang sangat berbeda, sehingga memengaruhi profil mikroorganisme yang mendominasi area tersebut. Kulit manusia yang kering, asam (pH sekitar 5,5), tinggi kadar garam, dan kaya akan lipid membentuk barier selektif yang hanya dapat dihuni oleh mikroorganisme dengan kemampuan adaptasi spesifik (M Nair, 2024). Mahasiswa dapat menggunakan prinsip mikroekologi ini untuk memprediksi bahwa area kulit yang kaya akan kelenjar sebacea (seperti wajah dan dada) akan didominasi oleh bakteri lipofilik seperti *Cutibacterium acnes*, sedangkan area yang lembap (seperti ketiak dan sela jari) akan padat dihuni oleh *Staphylococcus epidermidis* dan *Corynebacterium spp.*

i CATATAN

Karakteristik lipid permukaan kulit sangat memengaruhi viabilitas bakteri. Penggunaan produk perawatan kulit yang tidak tepat dapat melarutkan lipid pelindung ini, mengganggu keseimbangan mikroekologi, dan memicu kolonisasi bakteri patogen.

Komposisi flora normal pada mukosa, seperti mukosa mulut, sangat dipengaruhi oleh sekresi saliva dan gesekan mekanis. Di Indonesia, salah satu studi klinis yang dilakukan di lingkungan universitas mengevaluasi dampak merokok terhadap perubahan morfologi sel epitel dan mikroekologi mukosa mulut (Yenolinsky, 2024). Paparan asap rokok secara kronis terbukti meningkatkan akumulasi debris organik dan menurunkan kadar oksigen di rongga mulut. Perubahan kondisi mikro-lingkungan ini memicu pergeseran flora normal dari bakteri aerob menjadi bakteri anaerob oportunistik yang berkontribusi pada penyakit periodontal.

Untuk menjaga hidrasi dan regenerasi barier kulit agar terhindar dari disfungsi mikroekologi, penggunaan bahan alam lokal terus dikembangkan. Penelitian farmasi di Indonesia menunjukkan bahwa aplikasi gel berbahan dasar Aloe vera terbukti efektif menjaga hidrasi dan mendukung regenerasi sel keratinosit (Iskandar, 2026). Selain itu, eksplorasi sediaan gel menggunakan ekstrak lamun (*Enhalus acoroides*) dari pesisir Indonesia juga menunjukkan potensi besar sebagai agen pelembap alami yang mampu mempertahankan stabilitas mikroflora residen kulit tanpa memicu iritasi (Arif, 2021).

Aspek distribusi flora normal yang bervariasi ini dapat diringkaskan secara sistematis guna mempermudah analisis komparatif ekosistem tubuh manusia.

Tabel 4. Distribusi Flora Normal pada Berbagai Zona Mikroekologi Kulit dan Mukosa

Zona Tubuh	Kondisi Mikro-lingkungan	Mikroorganisme Dominan	Peran Fisiologis Utama
Sebaceous (Wajah, Dada)	Kaya lipid, sebum tinggi, anaerobik parsial	<i>Cutibacterium acnes</i>	Mendegradasi lipid menjadi asam lemak bebas penurun pH
Lembap (Ketiak, Sela Jari)	Kelembapan tinggi, kadar garam bervariasi	<i>Corynebacterium</i> spp., <i>Staphylococcus epidermidis</i>	Berkompetisi dengan patogen, menghasilkan bau tubuh alami
Kering (Lengan, Tungkai)	Kelembapan rendah, fluktuasi suhu tinggi	<i>Staphylococcus</i> koagulase negatif, <i>Micrococcus</i> spp.	Mempertahankan barier fisik melalui eksklusi kompetitif
Mukosa Mulut	Basah, kaya saliva, kaya glikoprotein	<i>Streptococcus mutans</i> , <i>Streptococcus salivarius</i>	Membentuk biofilm pelindung pada permukaan epitel mulut

Tabel 4. menunjukkan bahwa setiap zona anatomi tubuh manusia memiliki karakteristik biofisika unik yang bertindak sebagai penyaring ekologis. Mahasiswa dapat menyimpulkan bahwa intervensi topikal atau perubahan higienitas pada area tertentu akan langsung memengaruhi komposisi mikroorganisme spesifik yang mendiami zona tersebut.

E. FLORA NORMAL PADA SALURAN PENCERNAAN

Saluran pencernaan manusia merupakan salah satu ekosistem mikroba terpadat di bumi, yang membentang dari rongga mulut, lambung, usus halus, hingga usus besar. Sepanjang saluran ini, terjadi gradien fisiologis yang ekstrem dalam hal nilai pH, konsentrasi oksigen, dan laju peristaltik. Lambung yang sangat asam (pH 1,5–2) membatasi jumlah mikroorganisme hidup, sedangkan usus besar yang bersifat anoksik dengan pH mendekati netral menjadi rumah bagi miliaran bakteri anaerob obligat seperti genus *Bacteroides*, *Bifidobacterium*, dan *Clostridium*. Mahasiswa mikrobiologi dapat menerapkan data komposisi flora usus ini untuk merancang rekomendasi diet yang mendukung kesehatan inang melalui modulasi mikrobiota.

Flora normal usus memainkan peran metabolik yang sangat penting. Mereka menghasilkan enzim pencernaan yang tidak dimiliki manusia, seperti enzim untuk menghidrolisis polisakarida kompleks dinding sel tumbuhan menjadi asam lemak rantai pendek (Short-Chain Fatty Acids/SCFA) seperti asetat, propionat, dan butirat. SCFA bertindak sebagai sumber energi utama bagi kolonosit dan meregulasi diferensiasi sel imun. Selain itu, flora usus menyintesis vitamin esensial seperti vitamin K dan beberapa vitamin B kompleks. Ketika terjadi gangguan pada sistem pencernaan, keseimbangan ini rusak, yang dapat memicu kondisi patologis seperti peritonitis apabila bakteri usus keluar dari lumen dan mengontaminasi rongga steril peritoneum (Kartiwa, 2024).

CONTOH

Pemanfaatan pangan fungsional lokal di Indonesia terbukti efektif dalam menjaga homeostasis mikrobiota usus. Dadih, susu kerbau fermentasi khas Sumatra Barat, mengandung bakteri asam laktat seperti *Lactobacillus plantarum*. Konsumsi dadih secara teratur meningkatkan populasi *Lactobacillus* komensal di usus, meningkatkan produksi SCFA, dan menekan pertumbuhan bakteri patogen penyebab diare.

Penerapan diet berbasis pangan lokal ini sangat relevan dengan upaya pengendalian penyakit infeksi pencernaan di

Indonesia. Berdasarkan data epidemiologi, penyakit infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) dan diare masih menempati urutan teratas penyebab morbiditas di berbagai wilayah kepulauan Indonesia (Erica Yola Pramana Putri, 2022). Penguatan pertahanan mukosa usus melalui asupan makanan fungsional seperti dadih atau tempe yang difermentasi oleh kapang dan bakteri komensal dapat menjadi strategi preventif yang murah dan mudah dijangkau oleh masyarakat. Aktivitas metabolisme mikroorganisme lokal dalam produk fermentasi tersebut membantu menciptakan lingkungan usus yang tidak ramah bagi patogen usus seperti *Escherichia coli* enteropatogenik (Kurniaji, 2024). Di samping untuk kesehatan pencernaan manusia, pemanfaatan agen biologis berupa mikroorganisme lokal ini juga memiliki korelasi erat dengan inovasi bioteknologi lingkungan, seperti pemrosesan limbah organik menjadi media tumbuh produktif (Wanti, 2023). Melalui pendekatan diet ini, mahasiswa dapat merancang program nutrisi berbasis mikrobiologi medis yang langsung menyentuh penyelesaian masalah kesehatan masyarakat di tingkat lokal.

F. FLORA NORMAL PADA SALURAN REPRODUKSI

Saluran reproduksi wanita, khususnya vagina, merupakan contoh klasik bagaimana perubahan lingkungan internal inang dapat mengubah profil flora normal secara dramatis. Ekosistem vagina yang sehat didominasi oleh bakteri genus *Lactobacillus*, khususnya *Lactobacillus acidophilus*, *L. gasseri*, *L. jensenii*, dan *L. crispatus*. Kelompok bakteri ini mendominasi ekosistem vagina sejak masa pubertas hingga menopause. Dominasi ini dikendalikan oleh fluktuasi hormonal estrogenik yang memengaruhi ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme tersebut.

Mekanisme pertahanan biologis di dalam vagina sangat bergantung pada aktivitas metabolisme *Lactobacillus*. Estrogen yang diproduksi oleh ovarium merangsang sel-sel epitel vagina untuk menumpuk dan melepaskan glikogen ke dalam lumen vagina. *Lactobacillus* kemudian memetabolisme glikogen tersebut menjadi asam laktat melalui jalur fermentasi anaerobik. Aktivitas ini menurunkan pH vagina ke kisaran asam yang berkisar antara 3,8 hingga 4,5.

f FORMULA

Penurunan pH akibat akumulasi asam laktat dapat digambarkan secara sederhana sebagai fungsi dari laju fermentasi glikogen:

$$\text{pH}_{\text{vagina}} = \text{pH}_{\text{awal}} - k[\text{Asam Laktat}]$$

Nilai k merupakan konstanta laju hidrolisis glikogen oleh populasi *Lactobacillus* aktif. pH asam ini bersifat toksik bagi sebagian besar mikroorganisme patogen, termasuk bakteri penyebab infeksi menular seksual dan jamur oportunistik seperti *Candida albicans*. Selain asam laktat, *Lactobacillus* juga memproduksi hidrogen peroksida (H_2O_2) dan bakteriosin yang secara aktif menghambat pertumbuhan mikroba pesaing.

Fluktuasi hormonal selama siklus menstruasi, kehamilan, atau pasca-menopause secara langsung memodifikasi profil mikroflora ini. Pada kondisi hipoestrogenik (seperti sebelum pubertas atau setelah menopause), epitel vagina menjadi tipis dan kekurangan glikogen. Akibatnya, populasi Lactobacillus menyusut drastis, menyebabkan pH vagina naik mendekati netral (6,5–7,5). Kondisi ini meningkatkan kerentanan terhadap kolonisasi oleh bakteri anaerob lain seperti Gardnerella vaginalis dan spesies Mobiluncus, yang memicu vaginosis bakterial.

Di wilayah tropis seperti Indonesia, kelembapan udara yang tinggi sering kali meningkatkan akumulasi keringat di area perineum. Kondisi kelembapan berlebih ini, jika dikombinasikan dengan penggunaan pembersih kewanita-an antiseptik secara berlebihan yang mengganggu kelestarian Lactobacillus, dapat memicu disbiosis lokal. Pemahaman siklus ekologi mikroba ini serupa dengan dinamika komunitas tumbuhan di alam liar, di mana perubahan nutrisi tanah dan kelembapan menentukan spesies mana yang akan mendominasi ekosistem tersebut (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Mahasiswa kebidanan dan keperawatan harus mampu mendemonstrasikan edukasi klinis yang tepat mengenai pembatasan penggunaan sabun antiseptik vagina guna menjaga kestabilan populasi Lactobacillus sebagai benteng pertahanan alami tubuh.

G. PERUBAHAN FLORA NORMAL DAN TERJADINYA PENYAKIT

Stabilitas flora normal bukanlah sesuatu yang bersifat statis, melainkan keseimbangan dinamis yang dapat terganggu oleh berbagai faktor eksternal dan internal. Gangguan keseimbangan komposisi dan fungsi komunitas mikroba ini disebut sebagai disbiosis (dysbiosis). Ketika disbiosis terjadi, hubungan mutualistik atau komensalistik antara inang dan flora normal dapat bergeser menjadi hubungan parasitik. Mikroorganisme yang dalam kondisi normal bersifat tidak berbahaya dapat bertransformasi menjadi patogen oportunistik, menginvasi jaringan yang lebih dalam, dan menyebabkan penyakit infeksi yang serius.

Pemicu utama disbiosis di era modern adalah penggunaan antibiotik berspektrum luas yang tidak rasional atau tidak sesuai indikasi medis. Antibiotik tersebut tidak memiliki selektivitas mutlak; selain membunuh patogen target, mereka juga memusnahkan flora normal pelindung di usus, kulit, atau mukosa. Hilangnya tekanan kompetitif dari flora normal menciptakan ruang hampa ekologis yang dapat segera dikolonisasi oleh patogen resisten atau mikroorganisme oportunistik yang pertumbuhannya sebelumnya ditekan oleh flora residen.

⚠ PERHATIAN

Penggunaan antibiotik tanpa resep dokter atau penghentian terapi sebelum waktunya mempercepat timbulnya resistensi antimikroba (AMR) sekaligus memicu disbiosis sistemik yang sulit dipulihkan secara alami.

*Sebagai contoh studi kasus klinis yang sering ditemui di rumah sakit Indonesia, pasien yang menjalani terapi antibiotik intensif sering kali mengalami sariawan hebat pada mukosa mulut atau diare berat. Sariawan tersebut umumnya disebabkan oleh pertumbuhan berlebih jamur oportunistik *Candida albicans* akibat hilangnya bakteri komensal mulut penghasil asam penekan jamur. Jamur ini memanfaatkan momentum hilangnya kompetitor untuk menginvasi epitel mulut.*

Di bidang dermatologi, gangguan homeostasis pada kulit juga memicu berbagai masalah klinis. Penurunan populasi flora normal

pelindung akibat penuaan kulit atau paparan polutan lingkungan dapat dikurangi dengan pemberian senyawa antioksidan alami. Di Indonesia, penelitian molecular docking menunjukkan bahwa ekstrak pegagan (*Centella asiatica*) memiliki aktivitas antioksidan kuat yang mendukung regenerasi sel kulit dan menjaga integritas barier fisik (Budiman, 2025). Kerusakan pada barier kulit ini sangat krusial, karena dapat memicu transisi kondisi patologis yang lebih berat, mulai dari infeksi bakteri sekunder hingga mempermudah deteksi visual lesi keganasan pada kanker kulit yang membutuhkan diagnosis dini berbantuan teknologi komputasi (Lutviana, 2025). Akurasi klasifikasi penyakit kulit secara visual kini banyak dikembangkan di Indonesia dengan memanfaatkan algoritma transfer learning guna mengidentifikasi lesi patologis akibat hilangnya proteksi flora kulit normal (Amaludin, 2025), sejalan dengan masifnya proses adaptasi teknologi dan transformasi digital yang melanda berbagai sektor di era normal baru ini (Wiyono, 2021).

Melalui analisis kasus-kasus tersebut, mahasiswa dapat menyimpulkan bahwa flora normal bertindak sebagai organ fungsional pelindung tubuh. Kegagalan dalam menjaga kelestarian komunitas mikroba ini, baik akibat intervensi medis yang agresif maupun higienitas yang buruk, akan membuka pintu bagi terjadinya infeksi oportunistik yang mengancam jiwa. Kesadaran untuk menerapkan terapi rasional dan menjaga keseimbangan mikroekologi tubuh merupakan kunci utama dalam pencegahan penyakit infeksi di masa depan.

H. RANGKUMAN

Tubuh manusia berfungsi sebagai ekosistem kompleks bagi triliunan mikroorganisme yang berinteraksi secara komensalisme maupun mutualisme untuk menjaga homeostasis. Komunitas mikroba ini diklasifikasikan menjadi flora residen yang menetap secara evolusioner pada relung ekologis spesifik, serta flora transien yang bersifat sementara dan mudah dieliminasi melalui tindakan higienitas fisik seperti mencuci tangan menggunakan sabun. Keberadaan flora residen sangat vital dalam membentuk pertahanan biologis melalui mekanisme eksklusi kompetitif, yang menghambat kolonisasi patogen lewat perebutan nutrisi, pendudukan reseptor adhesi, serta sekresi senyawa antimikroba alami. Distribusi dan

keanekaragaman flora normal ini sangat dipengaruhi oleh kondisi biofisika lingkungan lokal inang. Pada kulit, zona sebacea yang kaya lipid didominasi oleh bakteri lipofilik seperti *Cutibacterium acnes*, sementara area lembap menjadi tempat berkembang biak yang ideal bagi *Staphylococcus epidermidis* dan *Corynebacterium spp.* Sebaliknya, membran mukosa seperti rongga mulut dan saluran pencernaan menghadirkan gradien mikroekologis yang dinamis, di mana faktor eksternal seperti paparan asap rokok dapat menggeser profil mikroba dari aerob menjadi anaerob oportunistik yang memicu patologi periodontal. Upaya mempertahankan stabilitas barier fisik dan kelestarian mikrobiota residen ini dapat didukung melalui pemanfaatan bahan alam lokal, seperti gel Aloe vera dan ekstrak lamun *Enhalus acoroides*, yang menjaga hidrasi seluler tanpa merusak keseimbangan mikroekologi alami tubuh. Melalui pemahaman gradien fisiologis ekstrem ini—mulai dari lingkungan asam lambung hingga kondisi anoksik usus besar—studi mikrobiologi mampu memprediksi dinamika interaksi mikroba-inang demi mencegah transisi flora normal menjadi agen patogen oportunistik.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis perbedaan mendasar antara mekanisme adaptasi evolusioner flora residen dan flora transien pada permukaan kulit manusia. Bagaimana perbedaan mekanisme interaksi fisik ini memengaruhi penentuan metode sanitasi yang tepat antara cuci tangan sosial menggunakan sabun biasa dan disinfeksi bedah di fasilitas kesehatan?
2. Evaluasi peran ekologis flora residen dalam mencegah kolonisasi bakteri patogen melalui fenomena eksklusi kompetitif. Bagaimana gangguan terhadap keanekaragaman mikrobiota ini dapat meningkatkan kerentanan inang terhadap infeksi oportunistik?
3. Bandingkan karakteristik mikroekologi daerah kulit yang kaya kelenjar sebacea dengan daerah kulit yang lembap dalam memengaruhi dominasi spesies bakteri tertentu. Mengapa penggunaan produk kosmetik yang melarutkan lipid permukaan

- dapat memicu ketidakseimbangan mikroflora pada area sebasea tersebut?
4. Telaah bagaimana paparan kronis asap rokok secara mikroekologis dapat mengubah profil mikroflora normal pada mukosa mulut manusia. Hubungkan perubahan kondisi biofisika lingkungan rongga mulut akibat merokok dengan transisi bakteri komensal menjadi patogen oportunistik penyebab penyakit periodontal.
 5. Rumuskan hipotesis mengenai mekanisme kerja ekstrak lamun *Enhalus acoroides* dalam mempertahankan stabilitas flora residen kulit dibandingkan dengan penggunaan antiseptik kimia sintetis yang kuat. Mengapa menjaga hidrasi keratinosit sangat penting bagi kelestarian mikrobiota indigenous?

b. Pilihan Berganda

1. Manakah dari pernyataan berikut yang paling tepat menggambarkan perbedaan antara flora residen dan flora transien pada tubuh manusia?
 - a. Flora residen mudah dihilangkan dengan pencucian mekanis menggunakan sabun biasa.
 - b. Flora transien membentuk koloni permanen di lapisan kulit yang lebih dalam.
 - c. Flora residen memiliki adaptasi evolusioner untuk terikat pada reseptor keratinosit.
 - d. Flora transien selalu bersifat patogen mutlak bagi tubuh inang yang sehat.
 - e. Flora residen tidak dapat terbentuk kembali apabila terjadi gangguan lingkungan.
2. Penerapan Gerakan Masyarakat Hidup Sehat (GERMAS) melalui prosedur mencuci tangan dengan sabun secara mekanis bertujuan utama untuk mengeliminasi...
 - a. Bakteri patogen intraseluler obligat pada jaringan dermis.
 - b. Flora transien yang menempel pada lapisan epidermis kulit.
 - c. Flora residen yang terikat kuat pada reseptor sel keratinosit.
 - d. Seluruh mikroorganisme komensal di lapisan kulit yang lebih dalam.
 - e. Lipid pelindung alami yang diproduksi oleh kelenjar sebasea.

3. Mekanisme pertahanan biologis di mana flora residen mencegah kolonisasi bakteri patogen eksogen dengan memperebutkan nutrisi dan reseptor adhesi disebut...
 - a. Parasitisme obligat.
 - b. Eksklusi kompetitif.
 - c. Simbiosis amensalisme.
 - d. Transmisi mekanis.
 - e. Mutasi adaptif.
4. Daerah kulit yang kaya akan kelenjar sebacea cenderung didominasi oleh bakteri lipofilik. Contoh spesies bakteri yang mendominasi zona mikroekologi tersebut adalah...
 - a. *Staphylococcus epidermidis*
 - b. *Corynebacterium* spp.
 - c. *Streptococcus mutans*
 - d. *Cutibacterium acnes*
 - e. *Micrococcus* spp.
5. Kondisi mikroekologi kulit yang bersifat kering, asam, tinggi kadar garam, dan kaya lipid membatasi kolonisasi mikroba. Berapakah rata-rata pH kulit manusia yang sehat?
 - a. Sekitar 1,5–2,0
 - b. Sekitar 3,5–4,0
 - c. Sekitar 5,5
 - d. Sekitar 7,0
 - e. Sekitar 8,5
6. Perubahan morfologi sel epitel dan mikroekologi mukosa mulut akibat paparan asap rokok secara kronis dapat menyebabkan pergeseran flora normal berupa...
 - a. Penurunan populasi bakteri anaerob secara drastis.
 - b. Peningkatan populasi bakteri aerob yang memproduksi asam.
 - c. Dominasi bakteri anaerob oportunistik penyebab penyakit periodontal.
 - d. Hilangnya seluruh biofilm pelindung pada permukaan epitel mulut.
 - e. Peningkatan kadar oksigen bebas di dalam rongga mulut.
7. Pemanfaatan bahan alam lokal Indonesia seperti ekstrak lamun (*Enhalus acoroides*) dalam sediaan gel bertujuan untuk...

- a. Mengeliminasi seluruh populasi flora residen kulit secara permanen.
 - b. Meningkatkan pH kulit agar bersifat lebih alkalis.
 - c. Membunuh bakteri *staphylococcus epidermidis* pada area lembap.
 - d. Menjaga hidrasi barier kulit untuk mendukung stabilitas flora residen.
 - e. Menggantikan fungsi kelenjar sebacea dalam memproduksi sebum buatan.
8. Flora normal yang mendominasi zona lembap seperti ketiak dan sela jari, serta berperan menghasilkan bau tubuh alami melalui metabolisme keringat adalah...
- a. *Cutibacterium acnes* dan *Streptococcus mutans*
 - b. *Corynebacterium* spp. dan *Staphylococcus epidermidis*
 - c. *Micrococcus* spp. dan *Streptococcus salivarius*
 - d. *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli*
 - e. *Lactobacillus* spp. dan *Helicobacter pylori*
9. Apa peran fisiologis utama dari bakteri *Cutibacterium acnes* pada zona sebacea tubuh manusia?
- a. Menghasilkan saliva untuk mencegah gesekan mekanis pada mukosa.
 - b. Mendegradasi lipid menjadi asam lemak bebas yang menurunkan pH kulit.
 - c. Mensintesis vitamin K yang diperlukan untuk pembekuan darah inang.
 - d. Membentuk barier fisik melalui ekskresi kristal garam berkadar tinggi.
 - e. Membantu pencernaan serat selulosa pada lapisan dermis kulit.
10. Mengapa disinfeksi bedah memerlukan bahan antiseptik yang lebih kuat dibandingkan dengan sabun cuci tangan biasa dalam protokol medis?
- a. Karena disinfeksi bedah hanya bertujuan untuk menghilangkan kotoran makroskopis.
 - b. Untuk mengeliminasi flora residen yang berada di lapisan kulit yang lebih dalam.
 - c. Karena flora transien tidak dapat dibunuh oleh bahan kimia antiseptik kuat.

- d. Untuk merangsang produksi kelenjar sebacea sebelum prosedur invasif dilakukan.
- e. Agar kulit pasien menjadi lebih kering sehingga bakteri patogen mati kelaparan.

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Seorang perawat di unit bedah sebuah rumah sakit di Indonesia melakukan cuci tangan biasa menggunakan sabun sebelum melakukan tindakan bedah minor pada pasien. Beberapa hari pasca-operasi, pasien mengalami infeksi sekunder pada luka sayatan yang disebabkan oleh bakteri *Staphylococcus epidermidis* yang diduga kuat berasal dari kulit perawat tersebut. Kepala komite pencegahan infeksi rumah sakit kemudian mengevaluasi prosedur kebersihan tangan yang dilakukan oleh perawat tersebut. Berdasarkan konsep penggolongan flora normal (residen dan transien) serta prinsip tindakan mekanis versus kimiawi, analisislah mengapa infeksi tersebut dapat terjadi meskipun perawat telah mencuci tangan. Berikan rekomendasi langkah korektif yang sesuai dengan standar klinis.
2. Seorang pasien mengalami iritasi parah, kulit kering, dan jerawat meradang di wajah setelah menggunakan produk pembersih wajah berbahan kimia keras yang diklaim mampu membunuh 99,9% bakteri. Hasil pemeriksaan laboratorium menunjukkan adanya penurunan drastis pada keanekaragaman flora normal kulit wajahnya dan dominasi patogen oportunistik. Dokter menyarankan untuk menghentikan produk tersebut dan beralih ke formulasi pelembap berbahan dasar bahan alam lokal seperti gel *Aloe vera* atau ekstrak lamun *Enhalus acoroides*. Evaluasilah kegagalan penggunaan pembersih wajah berbahan keras tersebut ditinjau dari aspek mikroekologi kulit. Jelaskan pula bagaimana mekanisme bahan alam yang disarankan dapat memulihkan homeostasis kulit pasien.

BAB V

PARASIT PADA KASUS KEBIDANAN

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menentukan jenis interaksi inang-parasit (host-parasite interaction) yang terjadi pada tubuh ibu hamil berdasarkan perubahan fisiologis dan imunologis selama masa kehamilan.*
- 2. Mengimplementasikan metode diagnosis laboratorium yang tepat untuk mengidentifikasi infeksi protozoa oportunistik seperti *Toxoplasma gondii* dan *Plasmodium falciparum* pada spesimen klinis ibu hamil.*
- 3. Menghitung prevalensi dan derajat intensitas infeksi soil-transmitted helminths (STH) pada populasi ibu hamil di daerah endemik menggunakan data epidemiologi klinis.*
- 4. Menyelesaikan studi kasus klinis mengenai komplikasi fetal (seperti mikrosefali atau berat badan lahir rendah) yang diakibatkan oleh transmisi parasit vertikal selama masa gestasi.*
- 5. Memilih regimen kemoterapi antiparasit dan strategi intervensi non-farmakologis yang aman bagi ibu hamil sesuai dengan usia kehamilan (trimester).*

B. PENDAHULUAN

Kehamilan merupakan fase fisiologis unik yang ditandai oleh supresi sistem imun selektif guna mencegah penolakan imunologis maternal terhadap janin yang bersifat alograf. Namun, kondisi imunokompromais fisiologis ini membuka celah kerentanan yang signifikan terhadap berbagai infeksi oportunistik, termasuk infeksi parasit. Bagi mahasiswa mikrobiologi, memahami interaksi inang-parasit dalam konteks kebidanan bukan sekadar mempelajari taksonomi mikroorganisme, melainkan menganalisis bagaimana

perubahan hormonal dan imunologis maternal memengaruhi patogenesis parasit. Sebagai contoh, infeksi *Toxoplasma gondii* yang pada individu imunokompeten umumnya bersifat asimtomatik, dapat berakibat fatal ketika menginfeksi ibu hamil di Indonesia. Di beberapa wilayah pedesaan di Jawa Barat, tingginya interaksi warga dengan kucing liar serta kebiasaan konsumsi lalapan yang kurang higienis memicu tingginya kasus toksoplasmosis kongenital. Implikasi dari fenomena ini sangat berat; parasit dapat menembus barier plasenta dan menyerang sistem saraf pusat janin yang sedang berkembang, menyebabkan hidrosefalus, mikrosefali, hingga keguguran. Oleh karena itu, kompetensi dalam mengidentifikasi, menganalisis, dan memitigasi risiko parasitik pada kehamilan menjadi krusial bagi calon ilmuwan mikrobiologi guna merancang strategi diagnosis dan intervensi yang presisi.

Selain protozoa, infeksi cacing juga memicu krisis kesehatan reproduksi yang serius, khususnya di wilayah agraris Indonesia seperti Nusa Tenggara Timur. Konsep patogenesis cacing tambang (*Ancylostoma duodenale* dan *Necator americanus*) berpusat pada konsumsi darah inang secara kronis di mukosa usus halus. Ketika infeksi ini terjadi pada ibu hamil yang sudah memiliki cadangan zat besi terbatas akibat tuntutan hemodilusi kehamilan, dampaknya tereskalasi secara eksponensial. Ibu hamil di daerah perkebunan yang sering beraktivitas tanpa alas kaki rentan mengalami anemia defisiensi besi berat akibat infestasi cacing ini. Implikasinya tidak hanya menurunkan kapasitas hantaran oksigen maternal yang memicu kelelahan ekstrem dan risiko perdarahan postpartum, tetapi juga membatasi suplai nutrisi ke janin yang berujung pada Intrauterine Growth Restriction (IUGR) dan berat badan lahir rendah. Melalui pemahaman mikrobiologi kebidanan yang komprehensif, mahasiswa diajak untuk melihat parasitologi bukan sebagai ilmu hafalan, melainkan instrumen analisis klinis yang menghubungkan aspek biologi parasit dengan manifestasi klinis pada ibu dan janin.

Guna membekali mahasiswa dengan kemampuan analisis dan aplikatif tersebut, bab ini akan mengupas tuntas dinamika infeksi parasit dalam konteks obstetri. Pembahasan akan diawali dengan pemaparan Konsep Dasar Parasit dalam Kebidanan untuk meletakkan fondasi teoretis mengenai interaksi imunologis maternal-

fetal. Selanjutnya, bab ini akan menganalisis secara mendalam kelompok Protozoa yang Berhubungan dengan Kehamilan dan Helmin yang Berhubungan dengan Kehamilan, dengan fokus pada siklus hidup dan adaptasi patologisnya di dalam tubuh ibu hamil. Dampak sistemik dari infeksi ini juga akan ditelaah dalam sub-bab Dampak Infeksi Parasit terhadap Ibu dan Janin untuk memberikan gambaran patofisiologi yang utuh. Bab ini akan ditutup dengan pembahasan mengenai Pencegahan dan Penanganan Infeksi Parasit pada Kehamilan, yang mengulas metode diagnosis terkini, pilihan terapi yang aman bagi janin, serta program intervensi kesehatan masyarakat yang relevan dengan kondisi geografis dan sosio-demografis di Indonesia.

C. KONSEP DASAR PARASIT DALAM KEBIDANAN

Kehamilan merupakan periode fisiologis unik yang menuntut adaptasi imunologis sistemik dari tubuh seorang wanita. Agar janin yang membawa materi genetik asing dari ayah (bersifat alograf semi-alogenik) tidak ditolak oleh sistem imun maternal, tubuh ibu hamil melakukan pemrograman ulang respon imun. Perubahan ini ditandai dengan pergeseran aktivitas sel T-helper dari profil Th1 (imunitas seluler yang bersifat pro-inflamasi) menuju profil Th2 (imunitas humoral yang bersifat anti-inflamasi). Meskipun pergeseran ini krusial untuk mempertahankan kelangsungan kehamilan, konsekuensi biologisnya adalah penurunan kapasitas imunitas seluler maternal dalam mengeliminasi patogen intraseluler, terutama kelompok parasit protozoa dan helmin.

Interaksi inang-parasit (host-parasit interaction) pada masa kehamilan tidak hanya melibatkan aspek imunologis, melainkan juga aspek vaskular dan nutrisi. Plasenta, yang berfungsi sebagai barier pertahanan sekaligus organ transfer nutrisi antara ibu dan janin, sering kali menjadi target penempelan (sekuestrasi) parasit tertentu. Parasit dapat memanfaatkan sirkulasi darah maternal yang kaya akan nutrisi di ruang interviler plasenta untuk tumbuh dan berkembang biak. Hal ini mengganggu homeostasis aliran darah utero-plasenta, memicu reaksi inflamasi lokal, dan menghambat transfer aktif nutrien serta oksigen ke janin.

Di Indonesia, pemantauan status kesehatan ibu hamil terhadap infeksi oportunistik menjadi bagian penting dari pelayanan antenatal. Sebagai contoh, di wilayah pesisir atau pedesaan dengan sanitasi lingkungan yang kurang optimal, ibu hamil kerap menghadapi paparan parasit ganda. Risiko komplikasi vaskular seperti hipertensi dalam kehamilan dapat meningkat apabila diperberat oleh adanya respon inflamasi sistemik akibat infeksi parasit kronis (Suriyani, 2025). Guna memetakan risiko penularan ini, para ahli mikrobiologi menggunakan data keanekaragaman hayati dan peta ekologis vektor parasit. Pemanfaatan basis data taksonomi flora dan ekosistem seperti yang terdokumentasi dalam studi komprehensif keanekaragaman hayati global membantu peneliti memetakan daerah endemik vektor pembawa parasit (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Melalui integrasi pemahaman biologi seluler parasit dan perubahan imunofisiologis maternal, tenaga kesehatan dapat menentukan stratifikasi risiko infeksi parasit pada setiap trimester kehamilan secara presisi.

DEFINISI

Toleransi Immunologis Maternal-Fetal adalah kegagalan sistem imun maternal untuk menyerang atau menolak janin yang mengekspresikan antigen asing dari paternal, yang dicapai melalui supresi selektif imunitas seluler (Th1) dan penguatan imunitas humoral (Th2).

D. PROTOZOA YANG BERHUBUNGAN DENGAN KEHAMILAN

Kelompok protozoa patogen memiliki mekanisme adaptasi seluler yang sangat efisien untuk mengeksploitasi kondisi imunokompromais fisiologis pada ibu hamil. Dua spesies protozoa yang paling sering menimbulkan komplikasi berat dalam bidang obstetri adalah *Toxoplasma gondii* dan *Plasmodium falciparum*. Kedua parasit ini memiliki kemampuan untuk menembus atau berkolonisasi langsung di dalam jaringan plasenta, yang berdampak langsung pada kelangsungan hidup janin.

Toxoplasma gondii merupakan protozoa koksidia intraseluler obligat dengan siklus hidup kompleks yang melibatkan kucing sebagai inang definitif. Ibu hamil biasanya terinfeksi melalui

konsumsi oosista matang yang mencemari makanan atau air, serta konsumsi jaringan hewan yang mengandung kista jaringan (bradizoit) dalam kondisi kurang matang. Di dalam tubuh ibu, parasit ini berubah menjadi takizoit yang membelah dengan cepat dan menyebar secara hematogen. Ketika takizoit mencapai plasenta, mereka menginvasi sel-sel trofoblas, bereplikasi, dan akhirnya menembus barier plasenta untuk menginfeksi organ janin yang sedang berkembang, terutama sistem saraf pusat dan retina.

Sementara itu, *Plasmodium falciparum* yang ditransmisikan melalui gigitan nyamuk *Anopheles* betina menyebabkan patologi spesifik yang dikenal sebagai malaria plasenta. Eritrosit yang terinfeksi oleh *P. falciparum* mengekspresikan protein permukaan khusus yang disebut *Plasmodium falciparum* erythrocyte membrane protein 1 (PfEMP1), khususnya varian VAR2CSA. Protein ini berikatan secara spesifik dengan molekul kondroitin sulfat A (CSA) yang diekspresikan pada permukaan sel trofoblas di ruang interviler plasenta. Akibatnya, terjadi akumulasi dan sekuestrasi masif eritrosit yang terinfeksi di dalam plasenta, memicu infiltrasi monosit maternal, pelepasan sitokin pro-inflamasi, dan kerusakan arsitektur vaskular plasenta.

⚠ PERHATIAN

Deteksi dini infeksi protozoa pada ibu hamil harus dilakukan secara aktif, terutama di daerah endemik, karena gejala klinis malaria plasenta sering kali bersifat subklinis (tanpa demam) namun tetap menyebabkan kerusakan struktural plasenta yang parah.

Studi kasus di beberapa wilayah timur Indonesia menunjukkan bahwa ibu hamil yang tinggal di daerah endemik tinggi malaria sering kali mengalami anemia berat dan gangguan pertumbuhan janin tanpa menunjukkan gejala malaria sistemik yang khas. Penanganan kasus kehamilan berisiko tinggi akibat infeksi oportunistik ini memerlukan asuhan kebidanan yang komprehensif dan terintegrasi dengan pemantauan laboratorium yang ketat (Unknown, 2025). Selain itu, monitoring ketat terhadap komplikasi vaskular sekunder seperti preeklamsia sangat penting, mengingat kerusakan endotel plasenta akibat sekuestrasi parasit memiliki

kemiripan patofisiologis dengan jalur inflamasi pada preeklamsia (Unknown, 2022).

E. HELMIN YANG BERHUBUNGAN DENGAN KEHAMILAN

Infestasi cacing (*helminthiasis*), khususnya kelompok *Soil-Transmitted Helminths* (STH), merupakan salah satu masalah kesehatan masyarakat yang paling persisten di wilayah tropis. Spesies cacing tambang seperti *Necator americanus* dan *Ancylostoma duodenale*, bersama dengan cacing gelang (*Ascaris lumbricoides*) dan cacing cambuk (*Trichuris trichiura*), memiliki korelasi klinis yang sangat kuat dengan status nutrisi dan hematologi ibu hamil. Patogenesis utama dari infestasi cacing ini berkaitan dengan konsumsi nutrisi inang dan kerusakan mekanis mukosa usus.

Cacing tambang dewasa hidup di dalam lumen usus halus manusia dengan menempelkan bagian mulutnya yang dilengkapi gigi atau lempeng pemotong pada vili mukosa usus. Parasit ini menyekresikan enzim proteolitik dan senyawa antikoagulan (seperti inhibitor faktor Xa) untuk mengalirkan darah inang ke dalam sistem pencernaannya. Satu ekor cacing *Ancylostoma duodenale* dapat mengonsumsi hingga 0,2 mL darah per hari, sedangkan *Necator americanus* mengonsumsi sekitar 0,03 mL darah per hari. Ketika seorang wanita hamil mengalami infestasi ratusan cacing tambang secara kronis, kehilangan darah yang terjadi secara konstan ini dengan cepat menghabiskan cadangan zat besi tubuh. Kondisi ini diperberat oleh fenomena hemodilusi fisiologis kehamilan, sehingga memicu terjadinya anemia defisiensi besi yang ekstrem.

CONTOH

Seorang ibu hamil G2P1A0 berusia 24 tahun di daerah pedesaan Nusa Tenggara Timur datang dengan keluhan lemas kronis dan pucat pada usia kehamilan 20 minggu. Hasil laboratorium menunjukkan kadar hemoglobin (Hb) sebesar 7,2 g/dL (anemia berat) dan pemeriksaan tinja metode Kato-Katz mengonfirmasi adanya telur cacing *Necator americanus* sebesar 2.500 telur per gram tinja (EPG), mengindikasikan infeksi derajat sedang yang mengonsumsi cadangan zat besi maternal secara signifikan.

Masalah penularan helmin di Indonesia sangat erat kaitannya dengan higienitas lingkungan dan paparan pekerjaan. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa faktor perilaku individu dan kesadaran dalam sanitasi memiliki korelasi kuat terhadap keberhasilan pengelolaan lingkungan yang bersih (Ayuningtias, 2025). Ibu hamil yang bekerja di sektor pertanian tanpa menggunakan alat pelindung diri berupa alas kaki yang memadai memiliki risiko sangat tinggi tertular larva filariform cacing tambang melalui penetrasi kulit langsung (Astanti, 2025). Infestasi kronis ini tidak hanya mengancam kesehatan ibu, tetapi juga berdampak buruk pada tumbuh kembang anak yang dilahirkan. Defisiensi mikronutrien kronis sejak dalam kandungan akibat parasit usus dapat memicu gangguan metabolisme jangka panjang, yang pada masa prasekolah sering kali bermanifestasi sebagai kesulitan makan dan gangguan pertumbuhan fisik (Heriyanti, 2022). Dampak jangka panjang ini berpotensi menghambat optimalisasi tumbuh kembang anak sebagai subjek pendidikan di kemudian hari (Ulandari, 2026).

F. DAMPAK INFEKSI PARASIT TERHADAP IBU DAN JANIN

Konsekuensi klinis dari infeksi parasit selama kehamilan bersifat bimodal, memengaruhi kompartemen maternal (ibu) dan kompartemen fetal (janin) secara simultan melalui jalur patofisiologi yang saling terkait. Kerusakan utama dipicu oleh kombinasi antara perebutan nutrisi secara langsung oleh parasit, respon inflamasi sistemik inang yang merusak jaringan, dan kegagalan fungsi plasenta sebagai organ penopang kehidupan janin.

Bagi ibu hamil, dampak paling nyata dari infeksi parasit kronis adalah anemia berat dan malnutrisi energi protein. Anemia membatasi kapasitas pengikatan dan penghantaran oksigen ke organ-organ vital, meningkatkan beban kerja jantung, serta memicu kardiomiopati anemis. Selama proses persalinan, ibu dengan anemia berat memiliki toleransi yang sangat rendah terhadap perdarahan, sehingga meningkatkan risiko syok hipovolemik dan kematian postpartum. Selain itu, infeksi parasit kronis yang menguras sistem imun maternal juga membuat ibu lebih rentan terhadap infeksi patogen oportunistik lainnya, termasuk infeksi bakteri kronis seperti tuberkulosis paru (Marsanda, 2025).

Bagi janin, dampak infeksi bervariasi tergantung pada usia kehamilan saat infeksi terjadi. Infeksi *Toxoplasma gondii* pada trimester pertama sering kali berujung pada kematian mudigah, abortus spontan, atau kerusakan neurologis berat berupa hidrosefalus, kalsifikasi intrakranial, dan korioretinitis. Sementara itu, plasentitis akibat malaria menghambat transpor aktif asam amino dan glukosa melalui membran plasenta, menyebabkan kelaparan intrauterin yang bermanifestasi sebagai Intrauterine Growth Restriction (IUGR) dan berat badan lahir rendah (BBLR). Dalam jangka panjang, bayi yang lahir dari ibu dengan infeksi parasit kronis memiliki risiko tinggi mengalami hambatan pertumbuhan linier atau stunting (Unknown, 2023).

Analisis perbandingan patofisiologi, manifestasi klinis, dan metode identifikasi untuk setiap jenis infeksi parasit selama masa gestasi disajikan secara terstruktur di bawah ini.

Tabel 5. Parameter Patofisiologi dan Manifestasi Klinis Infeksi Parasit Utama pada Kehamilan

Parasit	Patogenesis Utama	Manifestasi Maternal	Dampak Fetal	Metode Diagnosis Utama
<i>Toxoplasma gondii</i>	Invasi takizoit intraseluler ke sel inang	Demam ringan, limfadenopati	Abortus, hidrosefalus, korioretinitis	Serologi (IgM/IgG), PCR cairan amnion
<i>Plasmodium falciparum</i>	Sekuestrasi eritrosit di ruang interviler	Anemia berat, demam, hipoglikemia	BBLR, prematuritas, kematian janin	Apusan darah tebal/tipis, RDT, PCR
<i>Necator americanus</i>	Kerusakan mekanis mukosa, hisapan darah	Anemia defisiensi besi, hipoalbuminemia	IUGR, hambatan kognitif sekunder	Pemeriksaan tinja (Kato-Katz)
<i>Trichomonas vaginalis</i>	Inflamasi mukosa vagina, pelepasan sitokin	Vaginitis, keputihan berbau, pruritus	Ketuban pecah dini, kelahiran prematur	Sediaan basah, kultur, PCR

Data tabel di atas menunjukkan bahwa mekanisme kerusakan akibat infeksi parasit bervariasi dari invasi intraseluler langsung hingga destruksi mekanis lokal. Hal ini mengonfirmasi pentingnya

pendekatan diagnostik yang spesifik dan sensitif pada setiap jenis parasit untuk mencegah kerusakan ireversibel pada janin.

G. PENCEGAHAN DAN PENANGANAN INFEKSI PARASIT PADA KEHAMILAN

Manajemen klinis infeksi parasit pada wanita hamil membutuhkan pendekatan yang sangat hati-hati guna menyeimbangkan antara efikasi terapeutik obat bagi ibu dan keamanan toksikologis bagi janin. Strategi penanganan yang komprehensif mengintegrasikan intervensi farmakologis spesifik per trimester dengan program pencegahan non-farmakologis berbasis komunitas.

Pencegahan primer difokuskan pada pemutusan rantai penularan parasit. Untuk toksoplasmosis, edukasi ditekankan pada penghindaran kontak langsung dengan kotoran kucing, penggunaan sarung tangan saat berkebun, dan memasak daging hingga matang sempurna (suhu internal minimal 74 derajat Celsius). Untuk malaria, pencegahan dilakukan melalui pengendalian vektor dengan penggunaan kelambu berinsektisida (Long-Lasting Insecticidal Nets / LLINs) dan pemberian Terapi Pencegahan Intermiten selama kehamilan (Intermittent Preventive Treatment in pregnancy / IPTp) menggunakan Sulfadoksina-Pirimetamin (SP) yang dimulai pada trimester kedua. Untuk infeksi helmin, edukasi mencakup penggunaan alas kaki secara konsisten, cuci tangan pakai sabun sebelum makan, serta penyediaan fasilitas sanitasi yang layak di lingkungan rumah tangga. Edukasi kesehatan yang intensif bagi ibu hamil terbukti meningkatkan kepatuhan terhadap protokol pencegahan penyakit menular (Amir Tangke, 2026), yang secara konseptual sejalan dengan prinsip dasar penyampaian informasi dan edukasi dalam membangun kesadaran perilaku masyarakat (Rahman, 2025). Keterlibatan aktif ibu dalam menjaga kebersihan diri dan lingkungan juga berkontribusi langsung pada optimalisasi tumbuh kembang bayi pasca-lahir (Ali, 2023).

i CATATAN

Pemberian obat cacing massal (POPM) pada ibu hamil di daerah endemik tinggi cacingan hanya boleh dilakukan setelah trimester pertama kehamilan terlampaui untuk menghindari risiko teratogenik primer selama fase organogenesis janin.

*Secara farmakologis, pilihan obat antiparasit disesuaikan dengan usia kehamilan. Pada kasus toksoplasmosis maternal primer yang terdeteksi pada trimester pertama, pemberian Spiramisin (dosis 3 g/hari dibagi dalam 3-4 dosis) segera dimulai untuk membatasi transmisi parasit melintasi plasenta. Jika amniosentesis mendeteksi adanya DNA *Toxoplasma gondii* dalam cairan ketuban (mengonfirmasi infeksi janin) setelah minggu ke-18 kehamilan, terapi diganti dengan kombinasi Pirimetamin (50 mg/hari) dan Sulfadiazina (3 g/hari), disertai asam folinat (10-20 mg/hari) untuk mencegah supresi sumsum tulang maternal dan fetal. Untuk malaria falciparum tanpa komplikasi pada trimester pertama, terapi pilihan adalah Kina oral ditambah Klindamisin selama 7 hari, sedangkan pada trimester kedua dan ketiga menggunakan Artemisinin-based Combination Therapy (ACT) seperti Dihidroartemisinin-Piperakuin (DHP). Penentuan zona intervensi ini juga dapat dioptimalkan dengan mengacu pada pemetaan distribusi vektor dan habitat parasit di wilayah Indonesia (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).*

H. RANGKUMAN

*Kehamilan memicu adaptasi imunologis sistemik berupa pergeseran profil aktivitas sel T-helper dari Th1 yang bersifat pro-inflamasi menuju Th2 yang bersifat anti-inflamasi guna memfasilitasi toleransi imunologis maternal-fetal agar janin yang bersifat alograf semi-alogenik tidak ditolak oleh sistem imun ibu. Konsekuensi biologis dari pemrograman ulang ini adalah penurunan kapasitas imunitas seluler ibu, sehingga tubuh menjadi lebih rentan terhadap infeksi parasit oportunistik intraseluler. Di dalam ruang interviler plasenta yang kaya nutrisi, terjadi interaksi inang-parasit yang kompleks di mana patogen protozoa seperti *Toxoplasma gondii* menginvasi sel trofoblas secara hematogen untuk menembus barier plasenta dan menginfeksi organ janin yang sedang berkembang.*

Secara paralel, *Plasmodium falciparum* mengeksploitasi lingkungan ini melalui sekuestrasi eritrosit terinfeksi yang diperantarai oleh interaksi spesifik antara protein permukaan PfEMP1 varian VAR2CSA dengan molekul kondroitin sulfat A di permukaan trofoblas. Fenomena ini memicu infiltrasi monosit maternal, inflamasi lokal, gangguan homeostasis vaskular utero-plasenta, serta kerusakan endotel yang patofisiologinya menyerupai preeklamsia, bahkan sering kali bermanifestasi secara subklinis di daerah endemik. Melalui pendekatan asuhan yang komprehensif, pemantauan klinis berbasis laboratorium dapat meminimalkan dampak buruk dari malaria plasenta maupun toksoplasmosis kongenital. Sementara itu, ancaman dari kelompok helmin, khususnya cacing tambang seperti *Necator americanus* dan *Ancylostoma duodenale*, bermanifestasi melalui kerusakan mekanis mukosa usus halus dan sekresi antikoagulan yang menyebabkan kehilangan darah konstan. Ketika beban parasit ini berinteraksi dengan kondisi hemodilusi fisiologis maternal, ibu hamil akan mengalami anemia defisiensi besi ekstrem yang secara drastis menurunkan pasokan oksigen ke janin. Oleh karena itu, integrasi pemahaman biologi seluler parasit, pemetaan ekologis vektor, serta kondisi sosial ekonomi dan higienitas lingkungan sangat krusial bagi tenaga kesehatan dalam melakukan stratifikasi risiko infeksi secara presisi di setiap trimester kehamilan.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana pergeseran respon imun maternal dari profil Th1 ke Th2, yang sejatinya bertujuan untuk mempertahankan kelangsungan hidup janin sebagai alograf, justru menciptakan kerentanan biologis yang mempermudah patogen protozoa intraseluler melakukan invasi hematogen ke plasenta.
2. Bandingkan patofisiologi kerusakan vaskular plasenta yang ditimbulkan oleh sekuestrasi eritrosit terinfeksi *Plasmodium falciparum* dengan mekanisme kerusakan seluler akibat replikasi takizoit *Toxoplasma gondii* pada jaringan trofoblas ibu hamil.
3. Evaluasi hubungan antara sekuestrasi eritrosit yang mengekspresikan PfEMP1 varian VAR2CSA di ruang interviler

plasenta dengan risiko terjadinya komplikasi vaskular sekunder seperti preeklamsia pada ibu hamil di daerah endemik malaria.

4. Telaah bagaimana infestasi kronis cacing tambang seperti *Necator americanus* dapat memicu anemia defisiensi besi yang ekstrem pada ibu hamil dengan mempertimbangkan faktor hemodilusi fisiologis kehamilan dan sekresi enzim antikoagulan oleh parasit tersebut.
5. Rumuskan sebuah strategi skrining antenatal yang komprehensif dan presisi untuk mendeteksi malaria plasenta yang bersifat subklinis di daerah pedesaan, dengan mengintegrasikan data ekologis vektor dan status imunitas maternal.

b. Pilihan Berganda

1. Apa penyebab utama meningkatnya kerentanan ibu hamil terhadap infeksi parasit protozoa dan helmin secara imunologis?
 - a. Peningkatan drastis jumlah sel T-helper profil Th1 secara sistemik.
 - b. Penurunan aktivitas imunitas humoral yang diperantarai profil Th2.
 - c. Pergeseran respons imun maternal dari profil Th1 menuju profil Th2.
 - d. Kegagalan total pembentukan toleransi imunologis maternal-fetal.
 - e. Destruksi langsung sel T-helper oleh hormon plasenta.
2. Protein permukaan spesifik pada eritrosit terinfeksi *Plasmodium falciparum* yang memediasi penempelan pada sel trofoblas adalah...
 - a. Protein sirkumsporozoit (CSP)
 - b. PfEMP1 varian VAR2CSA
 - c. Antigen membran apical 1 (AMA1)
 - d. Protein permukaan merozoit 1 (MSP1)
 - e. Glikoprotein pengikat kondroitin sulfat
3. Reseptor spesifik pada permukaan sel trofoblas di ruang interviler plasenta yang berikatan dengan eritrosit terinfeksi malaria adalah...
 - a. Heperan sulfat proteoglikan
 - b. Kondroitin sulfat A
 - c. Integrin alfa-V beta-3

- d. Molekul adhesi sel vaskular-1
 - e. Reseptor transferin tipe 1
4. Mengapa deteksi dini malaria plasenta pada ibu hamil sering kali menantang secara klinis di daerah endemik?
- a. Gejala klinis sering kali bersifat subklinis tanpa demam yang khas.
 - b. Parasit tidak bereplikasi di dalam sel darah merah maternal.
 - c. Infeksi selalu disertai gejala preeklamsia berat yang membingungkan.
 - d. Parasit hanya menginfeksi sirkulasi darah janin tanpa menyentuh ibu.
 - e. Kadar hemoglobin ibu selalu meningkat akibat infeksi tersebut.
5. Bentuk infeksi dari *Toxoplasma gondii* yang menyebar secara hematogen di dalam tubuh ibu hamil dan mampu menembus plasenta adalah...
- a. Oosista matang
 - b. Bradizoit
 - c. Takizoit
 - d. Kista jaringan
 - e. Sporozoit
6. Bagaimana cara utama penularan *Toxoplasma gondii* kepada wanita hamil yang dapat berujung pada infeksi kongenital?
- a. Melalui gigitan nyamuk *Anopheles* betina di lingkungan pemukiman.
 - b. Penetrasi langsung larva filariform melalui kulit kaki yang tidak beralas.
 - c. Konsumsi oosista matang dari makanan tercemar atau daging mengandung kista jaringan yang kurang matang.
 - d. Kontak langsung dengan droplet saluran pernapasan dari penderita aktif.
 - e. Konsumsi air kelapa mentah yang difermentasi secara tidak higienis.
7. Berapa perkiraan volume darah inang yang dikonsumsi oleh satu ekor cacing *Ancylostoma duodenale* dewasa per hari?
- a. 0,03 mL
 - b. 0,10 mL
 - c. 0,20 mL

- d. 0,50 mL
 - e. 1,00 mL
8. Senyawa yang disekresikan oleh cacing tambang untuk mencegah pembekuan darah inang saat mengonsumsi darah adalah...
- a. Enzim amilase dan lipase
 - b. Inhibitor faktor Xa dan protease
 - c. Sitokin pro-inflamasi Th1
 - d. Glikoprotein permukaan VAR2CSA
 - e. Immunoglobulin kelas G
9. Kondisi fisiologis kehamilan yang memperberat manifestasi klinis anemia defisiensi besi akibat infestasi cacing tambang adalah...
- a. Penurunan volume plasma darah secara drastis.
 - b. Peningkatan drastis kadar hemoglobin maternal.
 - c. Fenomena hemodilusi fisiologis kehamilan.
 - d. Peningkatan drastis absorpsi zat besi di usus.
 - e. Supresi aktivitas eritropoietin ginjal.
10. Integrasi data keanekaragaman hayati global dan peta ekologis vektor parasit digunakan oleh ahli mikrobiologi untuk...
- a. Mengubah toleransi imunologis maternal-fetal secara genetik.
 - b. Memetakan daerah endemik vektor pembawa parasit secara presisi.
 - c. Menentukan dosis obat cacing yang tepat untuk ibu hamil.
 - d. Mencegah sekuestrasi eritrosit di ruang interviler plasenta.
 - e. Mengeliminasi parasit intraseluler secara langsung dari tubuh ibu.

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Seorang ibu hamil G3P2A0 usia kehamilan 22 minggu tinggal di daerah pesisir timur Indonesia. Ia datang ke puskesmas dengan keluhan lemas kronis dan pusing, tetapi tidak memiliki riwayat demam dalam satu bulan terakhir. Pemeriksaan fisik menunjukkan konjungtiva sangat pucat. Hasil pemeriksaan laboratorium menunjukkan kadar hemoglobin (Hb) sebesar 8,0 g/dL. Dokter mencurigai adanya infeksi malaria plasenta yang berjalan subklinis, mengingat wilayah tersebut merupakan

- daerah endemik tinggi *Plasmodium falciparum*. Analisis bagaimana sekuestrasi parasit dapat terjadi tanpa memicu demam sistemik, dan rumuskan langkah diagnostik serta asuhan kebidanan yang harus segera dilakukan untuk mencegah komplikasi pada janin.
2. Seorang wanita hamil berusia 26 tahun, usia kehamilan 18 minggu, bekerja sebagai buruh tani di perkebunan sayur basah tanpa menggunakan alas kaki yang memadai. Hasil pemeriksaan tinja metode Kato-Katz mengonfirmasi adanya infeksi *Necator americanus* dengan kadar EPG sebesar 3.000. Ibu tersebut menunjukkan gejala anemia defisiensi besi sedang dengan Hb 8,5 g/dL. Berdasarkan patofisiologi siklus hidup parasit dan perubahan fisiologis ibu hamil, evaluasi risiko komplikasi ganda yang dihadapi ibu dan janin jika kondisi ini tidak ditangani, serta susunlah rekomendasi intervensi non-farmakologis berbasis higienitas lingkungan untuk memutus rantai penularan di komunitasnya.

BAB VI

DASAR VIROLOGI DAN MIKOLOGI

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menentukan klasifikasi dan rute replikasi suatu virus berdasarkan karakteristik struktur genom serta morfologi kapsidnya yang ditemukan pada sediaan klinis.*
- 2. Menerapkan teknik identifikasi morfologi makroskopis dan mikroskopis untuk membedakan kelompok jamur (kapang, khamir, dan cendawan) dalam sampel lingkungan tropis.*
- 3. Mengimplementasikan prinsip-prinsip biosafety dan metode kontrol fisik maupun kimia untuk menghambat penyebaran virus dan patogen jamur spesifik di laboratorium atau industri.*
- 4. Memilih media pertumbuhan, suplemen nutrisi, dan kondisi inkubasi yang tepat untuk mengisolasi serta membiakkan jamur tertentu dari sampel klinis atau pertanian.*
- 5. Menyelesaikan analisis kasus epidemiologi lokal terkait wabah penyakit virus atau mikosis pada komoditas pertanian di Indonesia melalui perancangan skema penanganan biologis yang efektif.*

B. PENDAHULUAN

Dunia mikrobiologi tidak hanya terbatas pada domain bakteri dan archaea, melainkan juga mencakup entitas aseluler seperti virus serta organisme eukariotik heterotrofik seperti jamur. Sebagai negara tropis dengan megabiodiversitas yang tinggi sekaligus kelembapan udara yang konsisten sepanjang tahun, Indonesia menghadapi tantangan konstan terkait interaksi manusia, hewan, dan tanaman dengan virus serta jamur patogen. Pemahaman mendalam mengenai kedua agen ini menjadi sangat krusial bagi mahasiswa

mikrobiologi karena implikasinya yang luas pada sektor kesehatan, pertanian, dan industri pangan. Sebagai ilustrasi, mari kita tinjau kasus Demam Berdarah Dengue (DBD) yang disebabkan oleh Virus Dengue (DENV) di berbagai wilayah urban Indonesia. Secara teoretis, struktur amplop virus dan keberadaan glikoprotein spesifik menentukan afinitas pengikatan virus pada reseptor sel inang manusia. Implikasi praktis dari konsep biologis ini adalah pengembangan alat deteksi cepat (rapid test) berbasis antigen NS1 yang kini digunakan secara luas di puskesmas-puskesmas Indonesia untuk penanganan dini pasien, membuktikan bahwa pemahaman struktur virus secara langsung memengaruhi efisiensi mitigasi klinis di lapangan.

Di sisi lain, kerajaan Fungi atau jamur menyajikan dinamika yang sama kompleksnya, baik sebagai kawan dalam bioproses maupun lawan sebagai agen perusak. Keberadaan dinding sel kitin dan kemampuan sekresi enzim ekstraseluler membuat jamur sangat adaptif, namun sekaligus destruktif jika menyerang komoditas bernilai ekonomi tinggi. Contoh nyata dari fenomena ini adalah epidemi busuk pangkal batang pada tanaman kelapa sawit di Sumatra dan Kalimantan yang disebabkan oleh jamur *Ganoderma boninense*. Secara teoretis, jamur ini menyebar melalui kontak akar dan spora, memanfaatkan enzim lignolitik untuk mendegradasi lignin pada batang kelapa sawit. Implikasi dari karakteristik biologis ini memaksa para ahli mikrobiologi pertanian di Indonesia untuk merumuskan strategi pengendalian hayati menggunakan mikroba antagonis seperti *Trichoderma harzianum* sebagai agen preventif, alih-alih bergantung penuh pada fungisida kimia yang merusak lingkungan. Hal ini menegaskan bahwa penguasaan taksonomi, fisiologi, dan cara reproduksi jamur bukan sekadar hapalan akademis, melainkan fondasi untuk menyelesaikan krisis ekologi dan ekonomi riil.

Guna membekali mahasiswa dengan kemampuan aplikatif dalam menghadapi tantangan-tantangan tersebut, bab ini dirancang secara sistematis untuk mengupas tuntas biosains virus dan jamur dari sudut pandang teoretis hingga praktis. Pembahasan akan diawali dengan pemaparan mengenai pengertian dan karakteristik virus, diikuti dengan analisis mendalam tentang struktur, klasifikasi, dan replikasi virus. Selanjutnya, fokus pembelajaran akan bergeser

ke dunia mikologi melalui penjelasan mengenai pengertian dan karakteristik jamur, serta klasifikasi dan reproduksi jamur. Pada bagian akhir, bab ini akan mengeksplorasi manifestasi klinis dan ekologis melalui pembahasan komprehensif mengenai penyakit yang disebabkan oleh virus dan jamur, lengkap dengan mekanisme patogenesis dan strategi penanggulangnya di konteks Indonesia. Melalui pemahaman yang terintegrasi ini, mahasiswa diharapkan tidak hanya mampu mengidentifikasi entitas-entitas mikro tersebut, tetapi juga menerapkan prinsip-prinsip mikrobiologi dasar untuk merancang solusi aplikatif di masyarakat.

C. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK VIRUS

Virus merupakan agen infeksius aseluler yang tidak memiliki mesin metabolisme sendiri untuk melaksanakan replikasi secara mandiri. Sebagai parasit intraseluler obligat, virus sepenuhnya bergantung pada organel sel inang untuk memproduksi energi, melakukan sintesis protein, dan menggandakan materi genetiknya. Struktur dasar virus sangat sederhana jika dibandingkan dengan mikroorganisme eukariotik maupun prokariotik yang telah dibahas pada Bab 2 terdahulu. Ukuran virus berkisar antara 20 hingga 400 nanometer, menjadikannya tidak kasat mata di bawah mikroskop cahaya biasa dan hanya dapat diamati menggunakan mikroskop elektron. Karakteristik paling khas dari virus adalah kepemilikan salah satu jenis asam nukleat saja, yaitu DNA saja atau RNA saja, yang diselubungi oleh selubung protein pelindung yang disebut kapsid. Karena tidak memiliki sitoplasma, membran sel, maupun organel otonom, virus berada di batas antara benda mati dan makhluk hidup; ia tampak inert di luar sel inang namun menjadi sangat aktif secara biologis begitu berhasil menginfeksi sel target yang kompatibel.

DEFINISI

Virion adalah partikel virus yang utuh, fungsional, dan bersifat infeksius di luar sel inang, yang terdiri atas genom asam nukleat dan selubung protein luar (kapsid), serta kadang-kadang dilengkapi dengan selubung lipid (amplop).

Di Indonesia, karakteristik biologis virus ini memiliki dampak langsung pada dinamika kesehatan masyarakat, terutama terkait

dengan persebaran virus tropis seperti Virus Dengue (DENV). Karakteristik DENV yang memiliki materi genetik berupa RNA rantai tunggal (ssRNA) positif membuatnya sangat rentan bermutasi, menciptakan empat serotipe berbeda (DENV-1, DENV-2, DENV-3, dan DENV-4) yang menyebar luas di wilayah perkotaan padat penduduk seperti Jakarta, Surabaya, dan Medan. Ketika mahasiswa kedokteran atau analis kesehatan menentukan efektivitas alat diagnostik cepat di puskesmas lokal, mereka harus menerapkan pemahaman bahwa keberadaan protein non-struktural (NS1) yang disekresikan oleh virus selama replikasi aktif merupakan indikator infeksi fase akut yang sangat andal, bahkan sebelum antibodi pasien terbentuk.

Penerapan metode deteksi berbasis molekuler ini menuntut kesiapan kognitif tinggi dari para praktisi laboratorium. Dalam dunia akademik, pendidik dituntut untuk merancang asesmen pembelajaran mikrobiologi yang mampu mengukur kompetensi analitis mahasiswa dalam mengidentifikasi patogen submikroskopis secara presisi (Rosnaeni, 2021). Integrasi nilai-nilai etika ilmiah dalam proses pembelajaran ini sejalan dengan prinsip penanaman karakter dan keteladanan dalam dunia pendidikan (kusumawardani, 2021). Selain itu, kemajuan teknologi informasi kini membantu mengklasifikasikan pola persebaran infeksi virus pada kelompok rentan. Sebagai contoh, klasifikasi otomatis berbasis kecerdasan buatan digunakan untuk memilah pertanyaan konsultasi klinis ibu hamil mengenai risiko transmisi vertikal beberapa jenis virus selama kehamilan (Prasasti, 2026). Melalui integrasi ilmu dasar virologi dan teknologi digital ini, tenaga kesehatan dapat secara cepat menentukan tindakan preventif yang tepat guna menekan laju morbiditas akibat infeksi virus di berbagai wilayah klinis Indonesia.

D. STRUKTUR, KLASIFIKASI, DAN REPLIKASI VIRUS

Partikel virus atau virion dibangun oleh komponen struktural utama berupa genom asam nukleat yang dilindungi oleh cangkang protein bernama kapsid. Kapsid tersusun atas subunit-subunit protein berulang yang disebut kapsomer, yang berikatan secara simetris membentuk struktur heliks (seperti pada virus mosaik tembakau) atau ikosahedral (seperti pada adenovirus). Berdasarkan

keberadaan lapisan tambahan di luar kapsid, virus dikelompokkan menjadi virus telanjang (*naked virus*) dan virus beramplop (*enveloped virus*). Amplop luar ini terdiri atas lapisan lipid bilayer yang diperoleh dari membran sel inang saat virus keluar melalui proses pertunasan (*budding*), yang ditumbuhi oleh glikoprotein spesifik atau spikula. Spikula ini berfungsi sebagai ligan untuk menempel pada reseptor spesifik sel inang.

Sistem klasifikasi virus yang paling luas diterima adalah Klasifikasi Baltimore, yang membagi virus ke dalam tujuh kelompok berdasarkan tipe asam nukleat (DNA atau RNA, untai tunggal/ss atau untai ganda/ds) serta mekanisme sintesis mRNA-nya. Siklus replikasi virus secara umum berlangsung melalui lima tahapan utama yang berurutan, yaitu:

1. Adsorpsi (penempelan spikula virus pada reseptor sel inang);
2. Penetrasi dan Pelepasan Selubung (*uncoating* untuk membebaskan asam nukleat ke dalam sitoplasma atau nukleus);
3. Biosintesis (replikasi genom dan sintesis protein kapsid);
4. Pematangan atau Perakitan (*assembly* komponen virion baru); dan
5. Pelepasan (melalui lisis sel atau pertunasan).

Dalam konteks penanganan penyakit zoonosis di Indonesia, pemahaman siklus replikasi ini sangat krusial, misalnya pada kasus penanggulangan Virus Rabies (RABV) di daerah endemik seperti Nusa Tenggara Timur (NTT) dan Bali. RABV merupakan virus beramplop dengan genom sRNA negatif berbentuk peluru. Ketika virus masuk lewat gigitan hewan penular rabies, glikoprotein amplopnya menempel pada reseptor asetilkolin nikotinik di ujung saraf perifer manusia. Dengan memahami rute replikasi dan migrasi retrograd virus ini menuju sistem saraf pusat, dokter di klinik lokal dapat menentukan urgensi pemberian Serum Anti Rabies (SAR) sesaat setelah gigitan terjadi guna memblokir tahap adsorpsi virus pada sel saraf target sebelum terjadi replikasi masif di otak.

Guna mempermudah visualisasi proses replikasi submikroskopis yang rumit ini bagi mahasiswa, penggunaan media pembelajaran interaktif berbasis visual terbukti efektif memperjelas perbedaan struktural antar-kelompok virus (Suryani, 2023). Pengelolaan pembelajaran yang inovatif ini memerlukan kesiapan

perangkat ajar yang matang, sebagaimana pentingnya peningkatan kompetensi guru dalam penyusunan silabus dan RPP secara berkelanjutan (Oktaviani, 2021). Pemahaman mendalam ini juga mendorong para peneliti farmasi Indonesia untuk melakukan skrining fitokimia dari ekstrak tanaman herbal lokal, seperti simplisia daun suji, yang terbukti mengandung senyawa aktif potensial untuk menghambat enzim replikasi virus tertentu (Nirmala, 2022). Selain itu, pengembangan teknik enkapsulasi juga mulai diterapkan pada bahan herbal lain seperti ekstrak daun kelor yang kaya akan senyawa fenolik berkhasiat (Unknown, 2022). Dengan menggabungkan pengetahuan struktur virus dan kekayaan alam tropis, formulasi antivirus baru yang lebih aman dan terjangkau dapat dikembangkan secara mandiri di dalam negeri.

E. PENGERTIAN DAN KARAKTERISTIK JAMUR

Jamur atau fungi merupakan organisme eukariotik yang bersifat heterotrof, tidak berklorofil, dan memperoleh nutrisi dengan cara mengabsorpsi molekul organik dari lingkungannya. Dinding sel jamur memiliki keunikan tersendiri karena tersusun atas kitin—suatu polimer glukosamin yang kuat—berbeda dengan dinding sel tumbuhan yang didominasi selulosa atau peptidoglikan pada bakteri yang telah diulas pada Bab 2. Karakteristik ini membuat jamur sangat kokoh namun tetap fleksibel. Sel jamur juga mengandung ergosterol pada membran plasmanya, yang menjadi target utama bagi agen kemoterapi antifungi. Jamur dapat hidup sebagai saproba yang mengurai materi organik mati, sebagai parasit yang merugikan inangnya, atau dalam hubungan mutualistik dengan organisme lain.

Secara morfologis, jamur dibedakan menjadi tiga kelompok utama: a. Khamir (yeast): organisme uniseluler yang berbentuk bulat atau oval dan bereproduksi melalui pembentukan tunas (budding); b. Kapang (mold): organisme multiseluler yang membentuk filamen bercabang yang disebut hifa, yang jalinannya membentuk massa menyerupai jala bernama miselium; c. Cendawan (mushroom): jamur makroskopis yang membentuk tubuh buah berukuran besar yang mudah diamati dengan mata telanjang.

Di wilayah tropis dengan kelembapan tinggi seperti Indonesia, karakteristik pertumbuhan jamur sangat menentukan kualitas pangan dan kesehatan lingkungan. Salah satu kasus klasik adalah

kontaminasi kapang *Aspergillus flavus* pada komoditas kacang tanah dan jagung di pasar-pasar tradisional Jawa Barat dan Jawa Tengah. Kapang ini tumbuh subur pada kadar air tinggi dan mengekskresikan metabolit sekunder beracun berupa aflatoxin yang bersifat hepatotoksik dan karsinogenik pada manusia. Analisis pangan harus menggunakan teknik identifikasi mikroskopis untuk menentukan keberadaan struktur konidiofor khas *Aspergillus* pada sampel bahan pangan guna mencegah keracunan massal di masyarakat.

i CATATAN

Jamur memiliki peran ganda dalam kehidupan manusia; selain sebagai agen pembusuk makanan dan penyebab mikosis, beberapa spesies jamur uniseluler maupun multiseluler dimanfaatkan secara luas dalam industri fermentasi pangan tradisional Indonesia seperti tempe, oncom, dan tape.

Untuk memahami lebih lanjut mengenai perbedaan mendasar antara agen aseluler seperti virus dan organisme eukariotik seperti jamur, mari pelajari tabel berikut:

Tabel 6. Perbedaan Karakteristik Struktural dan Fungsional antara Virus dan Jamur

Parameter	Virus	Jamur
Tingkat Organisasi	Aseluler (non-seluler)	Eukariotik (uniseluler atau multiseluler)
Ukuran Umum	20–400 nanometer	2–10 mikrometer (sel tunggal) hingga meter (miselium)
Asam Nukleat	DNA atau RNA saja	Memiliki DNA dan RNA secara bersamaan
Dinding Sel	Tidak ada (hanya kapsid protein)	Ada (terutama tersusun atas kitin dan glukan)
Metabolisme	Tidak ada (bergantung penuh pada inang)	Mandiri (menghasilkan ATP melalui respirasi/fermentasi)

Parameter	Virus	Jamur
Sensitivitas Agen	Sensitif terhadap antivirus, inert terhadap antibiotik	Sensitif terhadap antifungi (seperti golongan azol)

Tabel 6. ini menunjukkan perbedaan mendasar antara virus dan jamur, di mana virus tidak memiliki infrastruktur seluler dasar sementara jamur memiliki struktur eukariotik lengkap yang mandiri. Hal ini menegaskan mengapa strategi pengobatan infeksi jamur membutuhkan target obat yang berbeda secara spesifik, seperti dinding sel kitin atau ergosterol, agar tidak merusak sel manusia yang juga bersifat eukariotik.

Penerapan bioteknologi jamur ini juga diimplementasikan dalam pengembangan produk pangan baru berbahan lokal. Sebagai contoh, pemanfaatan jamur fermentatif dalam pengolahan yoghurt nabati berbasis sari hanjeli berhasil meningkatkan nilai gizi dan karakteristik sensori minuman fungsional tersebut (Mutmainah, 2025). Pengelolaan keanekaragaman hayati ini sejalan dengan dokumentasi taksonomi modern yang menekankan pentingnya inventarisasi spesies flora dan fungi tropis guna mendukung ketahanan pangan dan obat-obatan nasional (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

F. KLASIFIKASI DAN REPRODUKSI JAMUR

Klasifikasi jamur secara tradisional didasarkan pada karakteristik morfologi tubuh buah dan jenis spora seksual yang dihasilkan selama siklus hidupnya. Berdasarkan kriteria tersebut, kerajaan Fungi dibagi menjadi empat filum utama, yaitu:

1. Zygomycota: menghasilkan zigospora (seksual) dan sporangiospora (aseksual), dengan hifa aseptat (tidak bersekat);
2. Ascomycota: menghasilkan askospora di dalam kantung yang disebut askus, serta konidiospora secara aseptat;
3. Basidiomycota: menghasilkan basidiospora di atas struktur berbentuk gada bernama basidium, umumnya memiliki tubuh buah makroskopis;
4. Deuteromycota: dikenal sebagai "Fungi Imperfecti" karena fase reproduksi seksualnya belum diketahui atau tidak ditemukan dalam siklus hidupnya.

Jamur bereproduksi melalui dua jalur, yaitu aseksual dan seksual. Reproduksi aseksual merupakan cara utama jamur menyebar dengan cepat dalam kondisi lingkungan yang mendukung, dilakukan melalui fragmentasi hifa, pembentukan tunas (*budding*), atau pembentukan spora aseksual (seperti konidia dan sporangiospora). Sebaliknya, reproduksi seksual dipicu oleh cekaman lingkungan dan melibatkan tiga tahapan berurutan: plasmogami (peleburan sitoplasma dua sel hifa yang kompatibel), kariogami (peleburan dua inti haploid menjadi diploid), dan meiosis (pembelahan sel menghasilkan spora seksual haploid yang memiliki rekombinasi genetik baru).

Di Indonesia, penerapan klasifikasi dan teknologi pengembangbiakan jamur memiliki nilai ekonomi yang sangat tinggi. Pada sektor pertanian di Sleman, Yogyakarta, dan Lembang, Jawa Barat, budidaya jamur tiram putih (*Pleurotus ostreatus*—anggota Basidiomycota) menjadi komoditas unggulan masyarakat. Para petani jamur lokal harus menentukan formulasi media tanam baglog (campuran serbuk gergaji, dedak, dan kapur) serta mengontrol suhu dan kelembapan agar miselium tumbuh merata sebelum akhirnya memicu pembentukan tubuh buah (*basidiokarp*) yang bernilai jual tinggi.

Guna meningkatkan nilai ekonomis hasil panen jamur tiram putih di pedesaan, penerapan teknologi pengolahan produk pascapanen menjadi sate atau bakso jamur terbukti mampu memperpanjang masa simpan sekaligus meningkatkan pendapatan UMKM kuliner lokal (Sugianto, 2021). Selain itu, untuk jenis jamur kuping (*Auricularia auricula*), optimasi mesin pengering mekanis berbasis kipas dan pengontrol suhu sangat membantu petani mempertahankan kualitas spora dan tekstur jamur kering di bawah kondisi iklim tropis Indonesia yang lembap (Purwadianto, 2022). Di era digital saat ini, identifikasi jamur di alam liar juga dipermudah dengan penggunaan aplikasi klasifikasi berbasis kecerdasan buatan (*Convolutional Neural Network*) pada ponsel pintar, yang membantu masyarakat awam membedakan jamur liar konsumsi (*edible*) dari jamur liar beracun secara cepat dan akurat demi menghindari insiden keracunan fatal (Unknown, 2026).

G. PENYAKIT YANG DISEBABKAN OLEH VIRUS DAN JAMUR

Penyakit akibat infeksi virus (virosis) dan jamur (mikosis) menghadirkan tantangan klinis dan epidemiologis yang signifikan bagi sistem kesehatan di Indonesia. Patogenesis infeksi virus umumnya diawali dengan destruksi langsung sel inang akibat replikasi intraseluler yang masif, pelepasan toksin virus, atau akibat respon imun inang yang berlebihan (cytokine storm). Contoh penyakit virus yang endemik di Indonesia adalah Demam Berdarah Dengue (DBD) yang ditularkan oleh vektor nyamuk *Aedes aegypti*, Hepatitis B yang menyerang organ hati dan berisiko memicu sirosis atau kanker hati, serta infeksi HIV yang merusak sel T-helper (CD4+) sehingga menurunkan kekebalan tubuh pasien secara drastis.

Di sisi lain, penyakit akibat jamur atau mikosis biasanya dikelompokkan berdasarkan kedalaman penetrasi patogen ke dalam jaringan tubuh inang, yang meliputi: a. Mikosis Superfisial: infeksi pada lapisan terluar kulit, rambut, dan kuku (contoh: panu atau *Tinea versicolor* yang disebabkan oleh *Malassezia furfur*); b. Mikosis Subkutan: infeksi yang menembus dermis dan jaringan bawah kulit akibat trauma fisik (contoh: sporotrikosis); c. Mikosis Sistemik: infeksi jamur oportunistik atau patogenik dalam organ dalam tubuh, terutama paru-paru (contoh: aspergillosis dan kriptokokosis yang sering menyerang pasien dengan imunodefisiensi seperti penderita HIV/AIDS).

⚠ PERHATIAN

Penggunaan antibiotik spektrum luas yang tidak rasional atau tanpa resep dokter di masyarakat dapat membunuh flora normal bakteri tubuh, sehingga memicu pertumbuhan berlebih jamur oportunistik seperti *Candida albicans* pada mukosa vagina atau rongga mulut.

Dalam praktik kebidanan dan keperawatan di Indonesia, kasus kandidiasis vaginalis (keputihan akibat infeksi jamur *Candida albicans*) merupakan salah satu keluhan kesehatan reproduksi yang paling sering ditemui di klinik-klinik pratama. Ibu hamil sangat rentan mengalami kondisi ini karena adanya perubahan hormonal

yang meningkatkan kadar glikogen pada mukosa vagina, menciptakan lingkungan asam yang sangat mendukung pertumbuhan jamur tersebut. Untuk menangani kasus ini secara efektif, tenaga kesehatan harus mampu memilih pengobatan topikal golongan azol (seperti nistatin atau klotrimazol) yang aman bagi janin, serta mengedukasi pasien mengenai pentingnya menjaga higienitas area kewanitaan guna meminimalkan kelembapan yang mempercepat proliferasi sel ragi.

Studi mengenai perubahan biokimiawi pada membran mukosa menunjukkan bahwa fluktuasi kadar elektrolit dan pH cairan tubuh secara signifikan memengaruhi adhesi patogen jamur pada sel epitel inang (Fitrya, 2023). Untuk menekan angka kejadian infeksi ini pada kelompok risiko tinggi, pemanfaatan platform layanan konsultasi kesehatan daring kini semakin dioptimalkan di Indonesia. Melalui sistem klasifikasi otomatis, keluhan-keluhan klinis terkait infeksi saluran reproduksi selama masa kehamilan dapat dipilah secara cepat guna memberikan rekomendasi rujukan medis dini ke fasilitas kesehatan terdekat (Prasasti, 2026). Melalui integrasi pemahaman patofisiologi mikroba dan pemanfaatan teknologi tepat guna, pencegahan serta penanggulangan penyakit akibat virus dan jamur di Indonesia dapat terlaksana secara komprehensif, terstruktur, dan efisien.

H. RANGKUMAN

Pemahaman komprehensif mengenai dasar-dasar virologi dan mikologi menjadi fondasi krusial dalam mendeteksi serta mengendalikan berbagai agen patogen penyebab penyakit infeksi di wilayah tropis seperti Indonesia. Sebagai agen aseluler yang bersifat parasit intraseluler obligat, virus tidak memiliki mesin metabolisme mandiri sehingga kelangsungan hidupnya sepenuhnya bergantung pada mesin seluler inang untuk memproduksi energi dan menggandakan genom. Struktur virus yang sangat sederhana—hanya berupa materi genetik DNA atau RNA yang dilindungi oleh kapsid protein, serta terkadang dilengkapi selubung lipid—menentukan spesifisitas inang melalui interaksi ligan-reseptor yang spesifik selama fase adsorpsi. Siklus replikasi virus yang meliputi penempelan, penetrasi, biosintesis, perakitan, hingga pelepasan virion baru, memberikan titik target penting bagi intervensi klinis

taktis, seperti pemblokiran adsorpsi virus rabies di ujung saraf perifer menggunakan serum antirabies, maupun pengembangan senyawa antivirus baru dari ekstrak herbal lokal seperti daun suji dan kelor. Di sisi lain, jamur sebagai organisme eukariotik heterotrof menyajikan tantangan biologis yang berbeda melalui kepemilikan dinding sel berbasis kitin serta membran sel kaya ergosterol yang menjadi sasaran utama terapi antifungi modern. Keberagaman morfologi jamur, mulai dari khamir uniseluler yang bereproduksi melalui pertunasan, kapang multiseluler berfilamen hifa yang membentuk anyaman miselium, hingga cendawan makroskopis, menegaskan peran ekologisnya yang luas baik sebagai pengurai materi organik maupun agen infeksi oportunistik pada manusia. Dengan mengintegrasikan karakteristik struktural patogen ini bersama kemajuan teknologi diagnostik molekuler seperti deteksi antigen spesifik serta sistem klasifikasi digital, para praktisi kesehatan dapat merumuskan tindakan preventif dan kuratif yang presisi demi menekan laju morbiditas penyakit infeksi di masyarakat.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis mengapa status virus sebagai parasit intraseluler obligat menuntut pendekatan terapeutik yang sangat berbeda dibandingkan dengan penanganan infeksi bakteri, terutama terkait dengan risiko efek samping toksik pada sel inang manusia.
2. Bandingkan mekanisme pertahanan struktural antara dinding sel jamur yang tersusun atas kitin dengan membran selnya yang mengandung ergosterol, serta evaluasi bagaimana perbedaan komponen ini dimanfaatkan dalam perancangan target kerja obat antifungi spesifik.
3. Evaluasi urgensi pemberian Serum Anti Rabies (SAR) sesegera mungkin pada area gigitan hewan penular rabies berdasarkan rute migrasi retrograd virus menuju sistem saraf pusat, dan analisislah konsekuensi klinis jika pemberian terapi ini terlambat dilakukan.
4. Telaah implikasi klinis dari karakteristik mutasi genom single-stranded RNA (ssRNA) positif pada Virus Dengue terhadap tantangan pengembangan vaksinasi universal dan akurasi alat diagnostik cepat yang mendeteksi protein non-struktural seperti NS1 di puskesmas.

5. Argumentasikan efektivitas pengelompokan virus berdasarkan Klasifikasi Baltimore dibandingkan dengan klasifikasi berdasarkan morfologi luar (virus telanjang vs beramplop) dalam memprediksi strategi biosintesis protein virus dan replikasi genom di dalam sel inang.

b. Pilihan Berganda

1. Manakah dari pernyataan berikut yang paling tepat mendefinisikan partikel virion yang utuh?
 - a. Segmen asam nukleat bebas yang aktif bereplikasi di dalam sitoplasma inang.
 - b. Partikel virus fungsional dan infeksius di luar sel inang yang memiliki genom dan kapsid.
 - c. Selubung protein pelindung tanpa materi genetik yang menempel pada reseptor sel inang.
 - d. Molekul RNA utas tunggal tanpa selubung protein yang menginfeksi tanaman.
 - e. Membran fosfolipid bilayer yang lisis akibat proses pertunasan dari sel inang.
2. Virus Dengue (DENV) memiliki materi genetik berupa single-stranded RNA (ssRNA) positif yang membuatnya sangat mudah bermutasi di wilayah perkotaan padat penduduk. Karakteristik klinis utama yang dimanfaatkan untuk mendeteksi infeksi akut DENV pada fase awal sebelum antibodi terbentuk adalah...
 - a. Terbentuknya hifa semu pada sampel darah pasien.
 - b. Keberadaan protein non-struktural NS1 yang disekresikan selama replikasi aktif.
 - c. Deteksi langsung terhadap glikoprotein amplop di bawah mikroskop cahaya biasa.
 - d. Penurunan kadar ergosterol dalam serum darah pasien secara drastis.
 - e. Munculnya spikula virus yang bebas berenang di dalam plasma darah.
3. Pemberian Serum Anti Rabies (SAR) pada korban gigitan hewan penular rabies bertujuan untuk memblokir siklus hidup virus pada tahap tertentu. Tahap replikasi manakah yang dihambat oleh pemberian SAR tersebut?

- a. Perakitan komponen virion baru di dalam sitoplasma sel saraf.
 - b. Penetrasi dan pelepasan selubung asam nukleat ke dalam nukleus.
 - c. Adsorpsi atau penempelan spikula virus pada reseptor asetilkolin nikotik.
 - d. Biosintesis protein struktural dan replikasi genom RNA negatif.
 - e. Pelepasan virion baru melalui proses lisis sel inang.
4. Struktur dinding sel jamur memiliki karakteristik unik yang membedakannya secara jelas dari kelompok organisme tumbuhan dan bakteri. Komponen penyusun utama dinding sel jamur tersebut adalah...
 - a. Peptidoglikan yang tebal.
 - b. Selulosa yang kaku.
 - c. Kitin yang kokoh namun fleksibel.
 - d. Lipopolisakarida pada membran luar.
 - e. Ergosterol yang berikatan dengan glikoprotein.
 5. Klasifikasi Baltimore merupakan sistem klasifikasi virus yang paling luas diterima oleh para mikrobiolog. Pengelompokan ini didasarkan pada...
 - a. Jumlah kapsomer penyusun simetri kapsid heliks dan ikosahedral.
 - b. Keberadaan atau ketidakadaan amplop lipid yang mengelilingi kapsid.
 - c. Tipe asam nukleat serta mekanisme yang digunakan untuk sintesis mRNA.
 - d. Rute transmisi patogen dari hewan penular ke inang manusia.
 - e. Kerentanan virus terhadap paparan senyawa metabolit sekunder herbal.
 6. Virus beramplop memperoleh lapisan lipid bilayer tambahan yang mengelilingi kapsid mereka melalui proses...
 - a. Sintesis mandiri menggunakan enzim replikasi virus di luar sel inang.
 - b. Pertunasan (budding) saat keluar dari membran sel inang.
 - c. Penggabungan kapsomer-kapsomer simetris selama fase pematangan.

- d. Absorpsi molekul organik bebas dari lingkungan cairan ekstraseluler.
 - e. Pelepasan selubung (uncoating) di dalam sitoplasma sel target.
7. Virus Rabies (RABV) merupakan salah satu zoonosis berbahaya dengan karakteristik struktural yang khas, yaitu...
- a. Memiliki genom DNA untai ganda dengan simetri kapsid ikosahedral utuh.
 - b. Berbentuk bulat dengan selubung glikoprotein yang menempel pada reseptor selulosa.
 - c. Berbentuk peluru, memiliki amplop, dan membawa genom ssRNA negatif.
 - d. Merupakan virus telanjang yang resisten terhadap pelarut organik di luar inang.
 - e. Memiliki struktur aseluler tanpa materi genetik yang bermigrasi secara cepat.
8. Berdasarkan morfologinya, jamur dikelompokkan ke dalam beberapa bentuk fisik. Jamur uniseluler yang berbentuk bulat atau oval dan bereproduksi melalui pembentukan tunas (budding) digolongkan sebagai...
- a. Kapang.
 - b. Khamir.
 - c. Hifa.
 - d. Cendawan.
 - e. Miselium.
9. Mengapa senyawa ergosterol pada membran plasma jamur sering dijadikan target utama dalam pengembangan obat atau agen kemoterapi antifungi?
- a. Karena ergosterol merupakan penyusun utama dinding sel luar jamur yang bersifat kaku.
 - b. Karena sel manusia tidak mengandung ergosterol sehingga toksisitas selektif obat dapat terjaga.
 - c. Karena ergosterol menghambat pembentukan spikula pada virus sekunder yang menginfeksi jamur.
 - d. Karena senyawa ini hanya ditemukan pada jamur multiseluler berbentuk kapang berfilamen.
 - e. Karena ergosterol mengontrol sintesis kitin di dalam sitoplasma jamur secara langsung.

10. Jalinan filamen bercabang pada organisme multiseluler kapang yang membentuk massa menyerupai jala disebut sebagai...
- Kapsomer.
 - Budding.
 - Saproba.
 - Miselium.
 - Spikula.

c. Soal Project / Studi Kasus

- Sebuah puskesmas di wilayah perkotaan padat penduduk sedang menghadapi lonjakan kasus demam tinggi mendadak pada warga lokal. Sebagai analis kesehatan, Anda diminta untuk menentukan alat diagnostik cepat (Rapid Diagnostic Test) yang paling efektif untuk memilah pasien yang berada pada hari kedua demam. Puskesmas memiliki dua pilihan kit diagnostik: kit deteksi antibodi (IgM/IgG) dan kit deteksi antigen protein non-struktural 1 (NS1). Berdasarkan pemahaman Anda mengenai karakteristik biologis Virus Dengue (DENV) dan siklus replikasinya, analisislah opsi alat diagnostik mana yang paling andal untuk mendeteksi infeksi fase akut ini. Berikan argumentasi ilmiah Anda dengan mengaitkan waktu sekresi protein NS1 selama replikasi aktif virus dibandingkan dengan kinetika pembentukan antibodi pasien.
- Di sebuah klinik kesehatan di Nusa Tenggara Timur, seorang dokter menerima pasien yang baru saja digigit oleh anjing liar di bagian ujung jari tangannya. Jari tangan merupakan area yang kaya akan ujung saraf perifer. Dokter harus segera memutuskan tindakan preventif darurat antara hanya memberikan vaksin rabies (aktif) atau mengombinasikannya dengan Serum Anti Rabies (SAR) yang mengandung antibodi siap pakai. Mengingat karakteristik Virus Rabies (RABV) yang bermigrasi secara retrograd menuju sistem saraf pusat, analisislah kegunaan mendesak dari pemberian SAR langsung di sekitar luka gigitan. Hubungkan analisis Anda dengan konsep struktur luar virus (glikoprotein amplop) dan reseptor target pada ujung saraf untuk mencegah replikasi masif di otak pasien.

BAB VII

METABOLISME

MIKROORGANISME

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menggunakan parameter kinetika enzim (seperti nilai K_m dan V_{max}) untuk memprediksi laju reaksi metabolisme spesifik pada isolat bakteri industri.*
- 2. Menghitung rendemen (yield) ATP dan efisiensi konversi energi dari berbagai jalur katabolisme glukosa (Glikolisis, Entner-Doudoroff, dan Pentosa Fosfat) pada kondisi lingkungan yang berbeda.*
- 3. Menerapkan prinsip respirasi anaerob dan fermentasi dalam merancang parameter operasional bioreaktor untuk produksi metabolit sekunder.*
- 4. Memodifikasi faktor-faktor lingkungan fisikokimia seperti suhu, pH, dan potensial redoks untuk mengendalikan laju metabolisme mikroorganisme fungsional.*
- 5. Menentukan jalur anabolisme dan katabolisme yang dominan pada konsorsium mikroba pengolah limbah berdasarkan ketersediaan donor dan akseptor elektron.*

B. PENDAHULUAN

Metabolisme mikroorganisme bukan sekadar rangkaian reaksi kimia abstrak di dalam sel, melainkan motor penggerak utama bagi kelangsungan biosfer dan fondasi industri bioteknologi modern. Bagi mahasiswa mikrobiologi, memahami bagaimana jasad renik memperoleh energi dan mensintesis biomolekul adalah kunci utama untuk memecahkan berbagai tantangan global, mulai dari krisis energi hingga pencemaran lingkungan. Mikroorganisme memiliki fleksibilitas metabolisme yang luar biasa; mereka mampu hidup di

lingkungan ekstrem dengan memanfaatkan senyawa yang bagi organisme lain bersifat toksik. Tanpa pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme biokimia ini, upaya untuk merekayasa mikroba demi kepentingan industri atau penyelamatan lingkungan akan kehilangan arah ilmiahnya dan hanya menjadi spekulasi coba-coba yang tidak efisien. Oleh karena itu, bab ini hadir untuk menjembatani teori termodinamika seluler dengan aplikasi praktis di laboratorium dan lapangan.

Dalam tataran praktis, penguasaan konsep metabolisme ini terwujud dalam teknologi bioremediasi lahan tercemar minyak bumi, seperti yang diterapkan pada penanganan lumpur minyak (oil sludge) di wilayah kerja pertambangan Riau. Secara teoritis, katabolisme senyawa hidrokarbon rantai panjang oleh bakteri melibatkan enzim spesifik seperti alkana monooksigenase yang memecah ikatan karbon menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron terminal. Sebagai contoh konkret, penggunaan isolat bakteri lokal *Pseudomonas aeruginosa* dalam mendegradasi limbah minyak bumi di Riau menunjukkan bahwa efisiensi degradasi sangat bergantung pada pasokan oksigen dan rasio nutrisi karbon-nitrogen-fosfor di dalam tanah. Implikasi nyata dari pemahaman kinetika enzim dan jalur katabolisme ini adalah kemampuan para mikrobiolog untuk merancang teknik biostimulasi, yaitu memodifikasi faktor lingkungan dengan menambahkan nutrisi pembatas guna memicu metabolisme intrinsik bakteri pendegradasi, sehingga lahan yang semula mati akibat racun hidrokarbon dapat pulih dalam waktu beberapa bulan saja.

Untuk membekali mahasiswa dengan kemampuan aplikatif tersebut, bab ini akan mengupas tuntas lima pilar utama metabolisme mikroba. Pembahasan akan dimulai dari konsep dasar metabolisme mikroorganisme yang meletakkan dasar termodinamika seluler, dilanjutkan dengan peran krusial enzim dalam metabolisme mikroorganisme sebagai biokatalisator spesifik. Selanjutnya, mahasiswa akan mempelajari detail proses katabolisme dan anabolisme untuk memahami bagaimana energi dipanen dan digunakan untuk biosintesis. Bab ini juga akan membedakan secara tajam mekanisme respirasi aerob, anaerob, dan fermentasi yang menjadi dasar adaptasi energetik mikroba di berbagai relung ekologi. Akhirnya, bab ini akan ditutup dengan analisis mendalam

tentang faktor yang memengaruhi metabolisme mikroorganisme, yang menjadi panduan praktis dalam mengendalikan dan mengoptimalkan aktivitas mikroba dalam sistem buatan manusia.

C. KONSEP DASAR METABOLISME MIKROORGANISME

Metabolisme mikroorganisme adalah jaringan reaksi kimia terorganisasi yang memungkinkan sel untuk mempertahankan hidup, tumbuh, dan bereproduksi. Proses ini diatur oleh prinsip-prinsip termodinamika seluler yang ketat, di mana mikroorganisme harus memanen energi dari lingkungan dan mengonversinya menjadi bentuk energi kimia universal, seperti Adenosin Trifosfat (ATP). Berdasarkan cara memperoleh energi dan karbon, mikroorganisme diklasifikasikan secara beragam. Memahami aliran elektron dari donor elektron (senyawa organik atau anorganik) ke akseptor elektron terminal adalah kunci untuk menentukan bagaimana suatu konsorsium mikroba beroperasi di habitat alami maupun sistem buatan. Kemampuan memprediksi dan menentukan jalur metabolisme yang dominan sangat penting dalam mengelola rekayasa lingkungan, terutama saat menghadapi kontaminan kompleks yang memerlukan biodegradasi spesifik.

Sebagai contoh konkret di Indonesia, bioremediasi lahan tercemar limbah minyak bumi (oil sludge) di wilayah eksplorasi minyak Riau sering kali memanfaatkan konsorsium bakteri lokal. Dalam skenario ini, para mikrobiolog harus menentukan jalur metabolisme yang dominan berdasarkan ketersediaan donor elektron berupa hidrokarbon rantai panjang dan akseptor elektron seperti oksigen atau sulfat (Evania, 2025). Ketika oksigen tersedia melimpah, jalur respirasi aerobik mendominasi karena menghasilkan energi bebas Gibbs yang paling negatif, memicu proliferasi bakteri pendegradasi hidrokarbon secara cepat. Namun, pada kedalaman tanah tertentu di mana oksigen terbatas, penambahan biochar biomassa kelapa sawit dapat memodifikasi struktur fisik tanah dan merangsang aktivitas metabolisme mikroorganisme anaerobik fungsional dengan menyediakan matriks konduktif untuk transfer elektron ekstraseluler (Hidayat, 2021). Efektivitas matriks berbasis karbon dalam memodifikasi kondisi lingkungan ini juga sejalan

dengan prinsip kapasitas penyerapan material karbon aktif yang berasal dari berbagai bahan nabati (Sahsiny, 2021).

Implikasi dari penguasaan konsep dasar ini adalah kemampuan praktis mahasiswa untuk merancang strategi biostimulasi yang efisien di lapangan. Dengan mengukur potensial redoks tanah dan menganalisis profil akseptor elektron yang tersedia, seorang profesional mikrobiologi dapat menentukan apakah sistem pengolahan limbah harus dioperasikan dalam kondisi aerobik atau anaerobik. Jika akseptor elektron eksternal habis, mikroorganisme akan beralih ke fermentasi untuk mempertahankan kelangsungan hidupnya. Oleh karena itu, manipulasi termodinamika lingkungan melalui penambahan nutrisi spesifik secara langsung mengendalikan arah aliran elektron seluler, mengoptimalkan laju pembersihan polutan, dan memulihkan ekosistem yang rusak akibat aktivitas industri.

Untuk menganalisis metabolisme ini secara kuantitatif, mahasiswa harus mampu menghitung perubahan energi bebas standar dari reaksi redoks yang terjadi. Sebagai contoh, oksidasi glukosa dengan oksigen melepaskan energi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan oksidasi menggunakan nitrat atau sulfat. Di bawah kondisi lingkungan Indonesia yang tropis dengan kelembapan tinggi, degradasi bahan organik berlangsung sangat dinamis. Landasan perhitungan matematis dan pemetaan area reaksi ini secara konseptual memiliki keselarasan dengan pemodelan geometris kuantitatif, yang secara analogis juga digunakan dalam analisis luas struktur fisik cagar budaya (Muhammad, 2021). Memahami bagaimana mikroorganisme menyeimbangkan muatan energi seluler (adenylate energy charge) membantu pengevaluasian kesehatan fisiologis dari populasi mikroba fungsional tersebut sebelum diaplikasikan dalam skala bioreaktor industri maupun restorasi lahan terbuka.

D. ENZIM DALAM METABOLISME MIKROORGANISME

Enzim berfungsi sebagai biokatalisator spesifik yang menurunkan energi aktivasi reaksi kimia di dalam sel mikroorganisme, sehingga reaksi metabolik dapat berlangsung jutaan kali lebih cepat pada suhu fisiologis. Kinetika enzimatis

dikarakterisasi oleh parameter penting seperti konstanta Michaelis (K_m) dan laju maksimum (V_{max}). Nilai K_m mencerminkan afinitas enzim terhadap substratnya; nilai K_m yang rendah menunjukkan afinitas tinggi, yang berarti enzim dapat bekerja efisien bahkan pada konsentrasi substrat yang sangat rendah. Sebaliknya, V_{max} menunjukkan kapasitas katalitik maksimum enzim ketika seluruh sisi aktifnya jenuh dengan substrat. Dalam aplikasi mikrobiologi industri, mengukur dan menggunakan parameter kinetika ini sangat krusial untuk memprediksi produktivitas bioproses serta merancang bioreaktor yang efisien.

Sebagai contoh di Indonesia, pemanfaatan isolat jamur termofilik lokal dari kawasan sumber air panas untuk memproduksi enzim industri seperti selulase dan amilase memerlukan optimasi kinetika yang ketat (BERIKTEN, 2021). Dalam proses sakarifikasi pati atau biomassa lignoselulosa, variasi fisikokimia seperti penerapan teknologi ultrasonik dapat digunakan untuk memodifikasi konformasi enzim guna meningkatkan V_{max} (Dağbağlı, 2024). Di samping itu, diversifikasi pemanfaatan sumber biomassa lignoselulosa yang melimpah, seperti ampas tebu dan kulit jagung, juga terus dikembangkan sebagai bahan baku industri yang potensial (Rahmayanti, 2022). Lebih lanjut, untuk meningkatkan stabilitas operasional dan memungkinkan penggunaan berulang dalam industri pengolahan pangan, enzim-enzim mikroba ini sering kali diimobilisasi pada matriks padat (Türköz, 2024). Di samping itu, keanekaragaman hayati tropis yang luar biasa di Indonesia, sebagaimana didokumentasikan dalam katalog keanekaragaman flora global, memberikan basis data yang kaya akan senyawa metabolit tanaman yang dapat bertindak sebagai inhibitor alami bagi enzim-enzim patogen (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

f FORMULA

Persamaan Michaelis-Menten digunakan untuk menghitung laju reaksi enzimatik (v): $v = (V_{max} S) / (K_m + S)$, di mana S adalah konsentrasi substrat. Mahasiswa dapat menggunakan formula ini untuk menentukan konsentrasi substrat optimum di dalam reaktor agar enzim bekerja pada laju mendekati V_{max} tanpa membuang-buang bahan baku secara tidak efisien.

Implikasi praktis dari pemahaman kinetika dan inhibisi enzim ini adalah kemampuan mahasiswa untuk memecahkan masalah penurunan efisiensi produksi pada industri fermentasi. Jika sebuah pabrik mengalami penurunan rendemen akibat akumulasi produk yang bertindak sebagai inhibitor umpan balik (feedback inhibitor), mahasiswa dapat merekomendasikan teknik imobilisasi enzim atau modifikasi tangki reaktor aliran kontinu (continuous stirred-tank reactor) untuk terus mengeluarkan produk dari sistem. Langkah ini menjaga laju reaksi enzimatik tetap berada pada kapasitas maksimalnya tanpa terhambat oleh inhibisi produk yang menumpuk.

E. PROSES KATABOLISME DAN ANABOLISME

Metabolisme mikroorganisme terbagi menjadi dua pilar utama yang saling terintegrasi secara dinamis: katabolisme dan anabolisme. Katabolisme adalah proses degradasi molekul kompleks kaya energi menjadi molekul sederhana disertai pelepasan energi dalam bentuk ATP dan reduktor setara seperti NADH atau NADPH. Jalur katabolisme glukosa utama meliputi jalur Embden-Meyerhof-Parnas (EMP/Glikolisis), jalur Entner-Doudoroff (ED), dan jalur Pentosa Fosfat (PP). Sebaliknya, anabolisme adalah proses biosintesis molekul kompleks dari prekursor sederhana yang membutuhkan masukan energi (ATP) dan daya reduksi. Keseimbangan antara katabolisme dan anabolisme menentukan efisiensi konversi karbon menjadi biomassa seluler, yang diukur sebagai rendemen biomassa sel.

*Di Indonesia, penerapan konsep energetika katabolisme ini terlihat jelas pada aktivitas produksi biobutanol dari limbah tandan kosong kelapa sawit melalui hidrolisis dan fermentasi bakteri *Clostridium acetobutylicum* (Reno, 2023). Jalur katabolisme yang digunakan oleh bakteri ini sangat menentukan jumlah ATP yang dihasilkan, yang selanjutnya memengaruhi pembentukan produk metabolit sekunder. Contoh lain adalah konversi limbah baglog jamur menjadi media tanam produktif menggunakan konsorsium mikroorganisme lokal (MOL), di mana aktivitas katabolisme selulolitik mikroba memecah serat kasar menjadi senyawa sederhana yang siap diasimilasi melalui jalur anabolisme pertumbuhan tanaman (Wanti, 2023).*

CONTOH

Mari kita hitung rendemen ATP dari dua jalur katabolisme yang berbeda untuk memahami efisiensi konversi energinya. Jalur EMP mengonversi 1 mol glukosa menjadi 2 mol piruvat dengan menghasilkan bersih 2 mol ATP dan 2 mol NADH. Sementara itu, jalur Entner-Doudoroff (ED), yang sering ditemukan pada bakteri *Pseudomonas*, hanya menghasilkan bersih 1 mol ATP, 1 mol NADH, dan 1 mol NADPH per mol glukosa. Jika suatu bioreaktor industri di Indonesia menggunakan *Pseudomonas* untuk memproduksi alginat (produk anabolik), efisiensi konversi glukosa menjadi ATP lebih rendah dibandingkan jika menggunakan bakteri berjalur EMP, namun jalur ED menyediakan NADPH yang sangat dibutuhkan untuk biosintesis lipid pertahanan sel.

Implikasi dari perhitungan kuantitatif ini adalah mahasiswa dapat memilih jenis mikroorganisme dan jalur katabolisme yang paling efisien berdasarkan tujuan produksi industri. Jika tujuannya adalah memaksimalkan rendemen biomassa kering sel (seperti pada produksi protein sel tunggal), maka mikroorganisme dengan jalur EMP yang menghasilkan ATP lebih tinggi harus dipilih. Namun, jika tujuannya adalah sintesis metabolit spesifik yang membutuhkan banyak daya reduksi, jalur PP atau ED menjadi pilihan yang lebih rasional meskipun rendemen ATP secara keseluruhan lebih rendah.

F. RESPIRASI AEROB, ANAEROB, DAN FERMENTASI

Mikroorganisme menunjukkan fleksibilitas luar biasa dalam memanen energi melalui tiga mekanisme: respirasi aerob, respirasi anaerob, dan fermentasi. Perbedaan mendasar di antara ketiganya terletak pada akseptor elektron terminal yang digunakan serta efisiensi rantai transpor elektron. Pada respirasi aerob, oksigen molekuler bertindak sebagai akseptor elektron terminal, menghasilkan rendemen ATP tertinggi (mencapai 36-38 ATP per molekul glukosa). Respirasi anaerob menggunakan senyawa anorganik selain oksigen, seperti nitrat, sulfat, atau karbon dioksida, dengan rendemen ATP yang bervariasi namun lebih rendah dari

respirasi aerob. Fermentasi tidak melibatkan rantai transpor elektron; akseptor elektron terminalnya adalah senyawa organik internal (seperti piruvat), dan ATP hanya dihasilkan melalui fosforilasi tingkat substrat dengan rendemen sangat rendah (biasanya 2 ATP).

Di Indonesia, penerapan ketiga prinsip metabolisme ini sangat krusial dalam industri bioproses pedesaan maupun perkotaan. Sebagai contoh, optimasi pembuatan asam laktat dengan menggunakan bakteri asam laktat melalui metode fermentasi batch memerlukan pengendalian kondisi anaerobik yang ketat untuk mencegah respirasi alternatif yang dapat menurunkan kemurnian produk (Nandini, 2021). Pada skala pertanian, pembuatan pupuk organik cair dari biourin kambing Peranakan Etawa (PE) menggunakan mikroorganisme lokal memanfaatkan proses fermentasi anaerobik terkendali untuk mematangkan urin dan memperkaya kandungan nitrogen fungsional tanpa kehilangan amonia ke udara bebas (Paturrahman, 2025).

Tabel 7. Parameter Operasional dan Energetika Jalur Respirasi serta Fermentasi Mikroorganisme

Parameter Operasional	Respirasi Aerob	Respirasi Anaerob	Fermentasi
Akseptor Elektron Terminal	Oksigen (O2)	Senyawa Anorganik (NO3-, SO4^2-)	Senyawa Organik (Piruvat, Asetaldehida)
Rendemen ATP Teoretis	36 - 38 ATP	2 - 30 ATP	2 ATP
Kebutuhan Oksigen Bioreaktor	Tinggi (Aerasi intensif)	Nihil (Mutlak Anaerob/Fakultatif)	Nihil (Tanpa Aerasi)
Kecepatan Agitasi Reaktor	Tinggi (200 - 400 rpm)	Rendah hingga Sedang	Sangat Rendah / Tanpa Agitasi
Produk Akhir Utama	CO2 dan H2O	Senyawa Tereduksi (N2, H2S, CH4)	Asam Organik, Alkohol, CO2

Tabel 7. menunjukkan bahwa setiap jalur metabolisme memerlukan spesifikasi lingkungan bioreaktor yang sangat berbeda. Sebagai contoh, fermentasi asam laktat membutuhkan kondisi tanpa agitasi tinggi untuk meminimalkan paparan oksigen, sedangkan respirasi aerob memerlukan suplai udara konstan melalui sparger dan agitasi kuat untuk menjaga kelarutan oksigen di dalam media kultur.

Implikasi dari pemahaman ini adalah mahasiswa dapat memodifikasi parameter fisik bioreaktor secara presisi. Jika mengoperasikan bioreaktor untuk memproduksi bioetanol menggunakan ragi, mahasiswa harus membatasi suplai oksigen secara ketat (kondisi anaerobik) untuk memaksimalkan jalur fermentasi. Sebaliknya, jika ingin menumbuhkan biomassa ragi itu sendiri untuk industri roti, pasokan oksigen harus ditingkatkan secara maksimal agar ragi melakukan respirasi aerobik yang menghasilkan energi melimpah untuk pembelahan sel yang cepat.

G. FAKTOR YANG MEMENGARUHI METABOLISME MIKROORGANISME

Aktivitas metabolisme mikroorganisme sangat dipengaruhi oleh parameter fisikokimia lingkungan sekitarnya, termasuk suhu, pH, potensial redoks, kadar air, dan ketersediaan nutrisi makro maupun mikro. Setiap spesies mikroorganisme memiliki rentang toleransi spesifik yang menentukan laju reaksi enzimatik internal mereka. Modifikasi faktor-faktor lingkungan ini secara sengaja merupakan instrumen utama bagi para mikrobiolog untuk mengendalikan, merangsang, atau menekan aktivitas metabolisme kelompok mikroba tertentu dalam ekosistem pertanian, industri, maupun kesehatan.

Dalam konteks pertanian tropis di Indonesia, fluktuasi faktor lingkungan seperti sistem olah tanah dan pemupukan secara langsung memengaruhi respirasi tanah dan biomassa karbon mikroorganisme (C-mik), seperti yang teramati pada lahan tanaman kacang hijau di Provinsi Lampung (Aisah, 2024). Pengolahan tanah yang intensif meningkatkan aerasi (kadar oksigen) dan suhu tanah, yang pada gilirannya mempercepat laju metabolisme katabolisme bahan organik oleh mikroorganisme tanah, tercermin dari peningkatan pelepasan gas karbon dioksida. Di sisi lain,

pemanfaatan limbah padat kelapa sawit sebagai bahan pembawa untuk mikroorganisme lokal pengendali hama (eko-pestisida) memerlukan pengaturan pH dan kelembapan yang optimal agar agen pengendali hayati seperti Trichoderma sp. tetap aktif bermetabolisme menghasilkan senyawa metabolit sekunder antifungi (Sriwijaya Soedjadi, 2025). Fenomena interaksi kompleks antara faktor lingkungan abiotik dengan aktivitas metabolisme mikroba tanah ini juga sangat dipengaruhi oleh keanekaragaman vegetasi di atasnya, yang menyuplai berbagai eksudat akar spesifik ke dalam rizosfer (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

i CATATAN

Potensial redoks (Eh) tanah mengukur kecenderungan lingkungan untuk melepaskan atau menerima elektron. Tanah basah tergenang (seperti lahan sawah di Jawa) memiliki potensial redoks negatif yang memicu metabolisme bakteri metanogenik, sedangkan tanah kering berpori memiliki potensial redoks positif yang mendukung bakteri nitrifikasi aerobik.

Implikasi dari konsep ini adalah mahasiswa memiliki kemampuan untuk memodifikasi parameter operasional di lapangan demi mencapai tujuan tertentu. Misalnya, dalam penanganan penyakit infeksi bakteri patogen pada saluran napas atau pencernaan masyarakat Indonesia, pengaturan pH lokal di area infeksi atau pemberian agen pengkelat besi (siderofor) dapat membatasi ketersediaan nutrisi esensial bagi bakteri patogen, sehingga melumpuhkan metabolisme patogen tersebut tanpa merusak sel inang (Erica Yola Pramana Putri, 2022). Dengan memanipulasi faktor pembatas metabolisme ini, kita dapat merancang sistem kontrol hayati yang efektif baik di laboratorium, lahan pertanian, maupun dalam aplikasi klinis.

H. RANGKUMAN

Metabolisme mikroorganisme merupakan jejaring reaksi kimia terintegrasi yang diatur secara ketat oleh hukum termodinamika untuk menopang kehidupan, pertumbuhan, dan reproduksi seluler melalui konversi energi lingkungan menjadi Adenosin Trifosfat. Aliran elektron dari donor menuju akseptor elektron terminal

menjadi kunci penentu dominasi jalur metabolisme, baik respirasi aerobik yang menghasilkan energi bebas Gibbs sangat negatif maupun respirasi anaerobik dan fermentasi yang diaktifkan saat oksigen terbatas. Di lapangan, manipulasi kondisi redoks tanah seperti biostimulasi menggunakan biochar berbasis biomassa kelapa sawit mampu menyediakan matriks konduktif untuk transfer elektron ekstraseluler yang mengoptimalkan biodegradasi polutan hidrokarbon kompleks secara efisien. Kinerja metabolik ini sangat bergantung pada aktivitas enzim sebagai biokatalis spesifik yang menurunkan energi aktivasi. Melalui parameter kinetika Michaelis-Menten, khususnya konstanta Michaelis yang mencerminkan afinitas substrat dan laju maksimum, efisiensi bioproses dapat diprediksi dan dioptimalkan demi mencegah pemborosan bahan baku. Optimasi ini dapat diakselerasi melalui teknologi fisikokimia seperti ultrasonik untuk memodifikasi konformasi enzim atau teknik imobilisasi pada matriks padat guna meningkatkan stabilitas operasional. Seluruh aktivitas enzimatik tersebut menggerakkan dua pilar utama, yaitu katabolisme—melalui jalur Embden-Meyerhof-Parnas, Entner-Doudoroff, atau Pentosa Fosfat yang menghasilkan energi dan daya pereduksi—serta anabolisme yang mengonsumsi energi untuk biosintesis biomassa. Pemahaman mendalam terhadap integrasi aspek termodinamika, kinetika biokatalisis, dan stoikiometri konversi karbon ini membekali para mikrobiolog dengan instrumen ilmiah yang kuat untuk merancang bioremediasi lahan tercemar secara adaptif sekaligus mengoperasikan sistem bioreaktor industri secara produktif dan berkelanjutan.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana fluktuasi ketersediaan oksigen pada kedalaman tanah yang berbeda memengaruhi arah aliran elektron seluler bakteri pendegradasi hidrokarbon dan bagaimana penambahan matriks karbon konduktif seperti biochar dapat memitigasi keterbatasan akseptor elektron terminal tersebut dalam sistem bioremediasi anaerobik.
2. Evaluasi bagaimana parameter kinetika enzim konstanta Michaelis dan laju maksimum dapat digunakan oleh seorang teknolog bioproses untuk mendesain tangki reaktor aliran

kontinu yang efisien, khususnya saat menghadapi masalah akumulasi produk sampingan yang bertindak sebagai inhibitor umpan balik.

3. Bandingkan efisiensi energetika dan rendemen biomassa seluler antara mikroorganisme yang mengandalkan jalur katabolisme Embden-Meyerhof-Parnas dengan yang menggunakan jalur Entner-Doudoroff, serta simpulkan implikasinya terhadap pemilihan isolat bakteri untuk produksi metabolit industri skala besar.
4. Telaah mekanisme fisikokimia di balik penerapan teknologi ultrasonik dalam memodifikasi konformasi enzim termofilik untuk meningkatkan nilai laju maksimum, dan rumuskan bagaimana pendekatan ini dapat disinergikan dengan teknik imobilisasi enzim pada matriks padat untuk meningkatkan efisiensi sakarifikasi biomassa lignoselulosa.
5. Argumentasikan mengapa keseimbangan muatan energi seluler harus dievaluasi secara berkala sebelum mengaplikasikan konsorsium mikroba fungsional dari laboratorium ke dalam skala bioreaktor industri, terutama saat mengonversi bahan baku limbah pertanian yang memiliki kompleksitas nutrisi tinggi.

b. Pilihan Berganda

1. Dalam bioremediasi anaerobik di lapisan tanah dalam, penambahan biochar biomassa kelapa sawit membantu mengoptimalkan metabolisme mikroba fungsional dengan cara...
 - a. Meningkatkan kelarutan oksigen di dalam air tanah secara drastis
 - b. Bertindak sebagai donor elektron utama pengganti hidrokarbon
 - c. Menyediakan matriks konduktif untuk transfer elektron ekstraseluler
 - d. Menurunkan energi aktivasi jalur metabolisme fermentasi secara selektif
 - e. Menghambat aktivitas enzim pencernaan hidrokarbon dari bakteri kompetitor
2. Jika sebuah enzim pencernaan pati memiliki nilai konstanta Michaelis (K_m) yang sangat rendah terhadap substratnya, hal ini mengindikasikan bahwa...

- a. Enzim memerlukan konsentrasi substrat yang sangat tinggi untuk mencapai setengah V_{max}
 - b. Enzim memiliki afinitas yang tinggi terhadap substrat dan bekerja efisien pada konsentrasi rendah
 - c. Laju maksimum reaksi (V_{max}) akan dicapai dalam waktu yang sangat lama
 - d. Enzim sangat rentan terhadap pengaruh inhibitor umpan balik di dalam bioreaktor
 - e. Enzim mengalami denaturasi konformasi akibat perubahan suhu lingkungan yang moderat
3. Berdasarkan persamaan Michaelis-Menten, jika konsentrasi substrat $[S]$ di dalam reaktor diatur sama dengan nilai K_m , maka laju reaksi enzimatis (v) yang dihasilkan adalah...
 - a. Seperempat dari laju maksimum ($0,25 V_{max}$)
 - b. Setengah dari laju maksimum ($0,5 V_{max}$)
 - c. Sama dengan laju maksimum (V_{max})
 - d. Dua kali lipat dari laju maksimum ($2 V_{max}$)
 - e. Nol karena sisi aktif enzim mengalami kejenuhan total
 4. Untuk mengatasi penurunan rendemen fermentasi akibat akumulasi produk yang bertindak sebagai inhibitor umpan balik, langkah rekayasa proses yang paling tepat adalah...
 - a. Menurunkan konsentrasi substrat awal di dalam tangki fermentasi
 - b. Menggunakan reaktor aliran kontinu untuk terus mengeluarkan produk dari sistem
 - c. Menaikkan nilai konstanta Michaelis (K_m) enzim melalui penambahan garam mineral
 - d. Menurunkan suhu operasional bioreaktor hingga di bawah titik beku fisiologis
 - e. Menghentikan penambahan nutrisi agar mikroorganisme beralih ke jalur anabolik
 5. Perbedaan mendasar antara jalur katabolisme glukosa Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) dan jalur Entner-Doudoroff (ED) pada bakteri terletak pada...
 - a. EMP menghasilkan ATP dan NADH yang lebih sedikit dibandingkan jalur ED
 - b. ED menghasilkan intermediate penting untuk biosintesis nukleotida sedangkan EMP tidak

- c. EMP tidak menggunakan enzim pemecah fosfat pada tahap awal reaksinya
 - d. Jumlah bersih ATP dan reduktor setara yang dihasilkan per molekul glukosa
 - e. Jalur ED hanya berlangsung dalam kondisi aerobik ketat sedangkan EMP anaerobik
6. Pada fermentasi biobutanol dari limbah tandan kosong kelapa sawit oleh *Clostridium acetobutylicum*, penentuan jalur katabolisme yang dominan sangat krusial karena secara langsung memengaruhi...
- a. Pembentukan produk metabolit sekunder dan jumlah energi ATP yang dihasilkan
 - b. Kecepatan penyerapan oksigen bebas oleh bakteri anaerobik fungsional tersebut
 - c. Efektivitas teknologi ultrasonik dalam memodifikasi dinding sel bakteri
 - d. Nilai K_m dari enzim ekstraseluler yang mengikat biomassa lignoselulosa
 - e. Kapasitas penyerapan karbon aktif terhadap produk sampingan asam asetat
7. Penerapan teknologi ultrasonik pada enzim termofilik bertujuan untuk meningkatkan V_{max} reaksi sakarifikasi dengan cara...
- a. Menghancurkan seluruh struktur tersier dan kuaterner enzim secara permanen
 - b. Menurunkan nilai K_m secara konstan sehingga afinitas substrat menjadi nol
 - c. Memodifikasi konformasi enzim agar mempermudah interaksi sisi aktif dengan substrat
 - d. Bertindak sebagai koenzim organik yang mendonorkan elektron ke substrat
 - e. Melindungi enzim dari efek degradasi akibat suhu lingkungan yang sangat tinggi
8. Evaluasi terhadap muatan energi seluler (adenylate energy charge) pada populasi mikroba fungsional bermanfaat untuk...
- a. Menghitung laju difusi biochar di dalam matriks tanah yang tercemar minyak
 - b. Menentukan struktur geometris dari enzim imobilisasi pada matriks padat

- c. Mengukur kesehatan fisiologis populasi mikroba sebelum diaplikasikan dalam skala industri
 - d. Menghitung energi bebas Gibbs standar dari reaksi redoks tanpa bantuan enzim
 - e. Mengetahui konsentrasi inhibitor kompetitif yang dihasilkan oleh tanaman lokal
9. Dibandingkan dengan oksidasi menggunakan akseptor elektron berupa nitrat atau sulfat, oksidasi glukosa dengan oksigen menghasilkan energi yang jauh lebih besar karena...
- a. Oksigen memiliki potensial reduksi yang paling negatif di antara semua akseptor
 - b. Reaksi oksidasi dengan oksigen menghasilkan perubahan energi bebas Gibbs yang paling negatif
 - c. Oksigen bertindak sebagai inhibitor kompetitif bagi enzim-enzim jalur fermentasi
 - d. Respirasi aerobik membutuhkan energi aktivasi yang jauh lebih tinggi daripada anaerobik
 - e. Oksigen mampu mereduksi molekul ATP secara langsung tanpa melalui rantai transpor elektron
10. Imobilisasi enzim pada matriks padat dalam industri pengolahan pangan bertujuan untuk...
- a. Mengubah enzim yang awalnya termofilik menjadi mesofilik agar hemat energi
 - b. Meningkatkan stabilitas operasional enzim dan memungkinkan penggunaan berulang
 - c. Memastikan enzim dapat terdegradasi bersama dengan produk pangan yang dihasilkan
 - d. Menurunkan energi bebas Gibbs dari reaksi katabolisme secara keseluruhan
 - e. Mengurangi afinitas enzim terhadap substrat utama guna mencegah kejenuhan cepat

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah perusahaan bioteknologi di Riau sedang menguji bioremediasi tanah yang tercemar oleh limbah minyak bumi dengan konsentrasi tinggi. Berdasarkan analisis awal, tanah tersebut kekurangan oksigen di kedalaman 50 sentimeter ke bawah, menyebabkan bakteri lokal pendegradasi hidrokarbon

bekerja sangat lambat. Tim peneliti mempertimbangkan dua opsi intervensi: melakukan aerasi mekanis secara terus-menerus yang membutuhkan biaya energi sangat tinggi, atau mengaplikasikan kombinasi biochar biomassa kelapa sawit lokal sebagai matriks konduktif penunjang transfer elektron ekstraseluler anaerobik bersama dengan bakteri fungsional pendegradasi hidrokarbon anaerobik. Analisislah kedua opsi tersebut dari sudut pandang efisiensi termodinamika metabolik mikroba, kepraktisan di lapangan, dan kelayakan ekonomi. Berikan rekomendasi teknis yang paling strategis untuk memulihkan ekosistem tanah tersebut.

2. Sebuah pabrik fermentasi biobutanol mengalami penurunan produktivitas yang signifikan setelah memasuki jam ke-24 operasional reaktor batch. Hasil analisis metabolit menunjukkan terjadinya akumulasi butanol di dalam medium yang bertindak sebagai inhibitor umpan balik bagi enzim kunci dalam jalur katabolisme *Clostridium acetobutylicum*. Pabrik tersebut menggunakan hidrolisat tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku utama. Sebagai seorang konsultan mikrobiologi industri, rumuskan sebuah strategi pemecahan masalah yang komprehensif. Solusi Anda harus mencakup rekomendasi modifikasi desain bioreaktor (seperti transisi ke sistem kontinu) atau penerapan teknik imobilisasi enzim/sel, lengkap dengan penjelasan kinetika enzimatik (menggunakan parameter K_m dan V_{max}) untuk memulihkan efisiensi produksi biobutanol tersebut.

BAB VIII

NUTRISI DAN KULTUR ORGANISME

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menentukan formulasi kebutuhan nutrisi makro dan mikro yang spesifik untuk kultivasi kelompok mikroorganisme tertentu berdasarkan karakteristik fisiologisnya.*
- 2. Memilih jenis media kultur yang tepat (sintetis, kompleks, selektif, atau diferensial) untuk mengisolasi bakteri target dari sampel lingkungan maupun klinis.*
- 3. Menghitung parameter sterilisasi thermal (seperti nilai D dan nilai Z) dalam mendesain protokol sterilisasi media kultur menggunakan autoklaf.*
- 4. Mendemonstrasikan teknik inokulasi aseptis dan isolasi (seperti metode cawan gores atau cawan tuang) untuk memperoleh kultur murni dari populasi campuran.*
- 5. Mengimplementasikan metode pemeliharaan dan penyimpanan jangka panjang yang sesuai untuk menjaga viabilitas dan stabilitas genetik isolat mikroorganisme.*

B. PENDAHULUAN

Kemampuan mengkultivasi mikroorganisme di luar habitat alaminya (secara in vitro) merupakan fondasi utama dalam seluruh aplikasi mikrobiologi, baik di bidang industri, kesehatan, maupun lingkungan. Tantangan terbesar dalam kultivasi ini adalah merekonstruksi kondisi nutrisi dan fisikokimia yang sesuai dengan relung ekologi asal mikroba tersebut. Sebagai contoh konkret di Indonesia, dalam upaya mengeksplorasi bakteri pendegradasi plastik dari tempat pembuangan akhir (TPA) seperti Bantar Gebang, para peneliti harus menyusun media kultur sintetik dengan membatasi

sumber karbon organik standar dan menggantinya dengan polimer plastik sebagai satu-satunya sumber karbon. Jika formulasi media tidak dirancang secara spesifik, bakteri pendegradasi plastik yang dicari akan kalah berkompetisi dengan mikroba oportunistik lainnya yang tumbuh cepat menggunakan nutrisi sederhana. Implikasinya, pemahaman mendalam tentang kebutuhan nutrisi makro dan mikro bukan sekadar teori akademis, melainkan kunci keberhasilan dalam domestikasi dan pemanfaatan mikroba liar untuk mengatasi masalah lingkungan riil.

Selain formulasi nutrisi, tantangan teknis berikutnya terletak pada proses sterilisasi dan teknik isolasi untuk menjamin kemurnian kultur. Dalam skala praktis, kegagalan dalam mengendalikan kontaminasi dan memilih metode inokulasi yang tepat dapat menggagalkan seluruh proses penelitian maupun produksi industri. Sebagai ilustrasi, pada industri fermentasi tempe skala rumahan atau produksi starter yogurt lokal di Jawa Barat, kontaminasi oleh kapang liar atau bakteri pembusuk akibat sterilisasi wadah yang tidak sempurna sering kali menyebabkan kegagalan produk secara massal. Kegagalan ini tidak hanya menimbulkan kerugian finansial yang signifikan bagi produsen, tetapi juga menurunkan konsistensi mutu produk biologis yang dihasilkan. Oleh karena itu, penguasaan parameter sterilisasi panas lembap menggunakan autoklaf serta penerapan teknik cawan gores (*streak plate*) yang aseptis menjadi kompetensi mutlak yang harus dikuasai untuk menjaga integritas kultur dari kontaminasi eksternal.

Untuk membekali mahasiswa dengan kemampuan aplikatif tersebut, bab ini akan mengupas tuntas seluruh aspek teknis kultivasi mikroorganisme. Pembahasan akan diawali dengan analisis kebutuhan nutrisi mikroorganisme, diikuti oleh pengenalan jenis dan komposisi media kultur yang bervariasi. Selanjutnya, kita akan mempraktikkan teknik pembuatan dan sterilisasi media secara presisi. Bagian berikutnya akan melatih keterampilan motorik dan kognitif mahasiswa melalui teknik inokulasi dan isolasi mikroorganisme guna memperoleh kultur murni. Bab ini akan ditutup dengan strategi pemeliharaan dan penyimpanan kultur mikroorganisme agar tetap viabel dan stabil secara genetik untuk penggunaan jangka panjang.

C. KEBUTUHAN NUTRISI MIKROORGANISME

Mikroorganisme, seperti halnya organisme tingkat tinggi, membutuhkan suplai nutrisi yang konstan dari lingkungannya untuk mempertahankan aktivitas metabolisme, mendukung pertumbuhan, dan melakukan pembelahan sel. Untuk merancang formulasi media kultur yang optimal, peneliti harus memahami kategori nutrisi yang dibagi menjadi makronutrien dan mikronutrien. Makronutrien adalah elemen yang dibutuhkan dalam jumlah besar karena menyusun komponen struktural utama sel (seperti protein, lipid, asam nukleat, dan karbohidrat). Keseimbangan asupan nutrisi makro ini tidak hanya krusial bagi sel mikroba, tetapi juga terbukti memengaruhi komposisi kimiawi dan kualitas fisik karkas pada organisme tingkat tinggi (Nadia, 2023). Elemen-elemen ini meliputi karbon (C), oksigen (O), hidrogen (H), nitrogen (N), belerang (S), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan besi (Fe). Sebaliknya, mikronutrien atau unsur kelumit (trace elements) seperti mangan (Mn), seng (Zn), kobalt (Co), molibdenum (Mo), nikel (Ni), dan tembaga (Cu) dibutuhkan dalam jumlah sangat kecil namun mutlak diperlukan sebagai kofaktor enzim untuk mengatalisis reaksi biokimia esensial.

DEFINISI

Nutrisi Mikroorganisme adalah zat kimiawi yang diperoleh dari lingkungan luar untuk asimilasi seluler, penyediaan energi, dan bahan pembangun komponen struktural serta fungsional sel mikroba.

Dalam menentukan formulasi nutrisi, pengelompokan fisiologis mikroorganisme berdasarkan sumber karbon dan sumber energi menjadi aspek krusial. Mikroorganisme autotrof menggunakan karbon dioksida (CO₂) sebagai sumber karbon utama, sementara mikroorganisme heterotrof memanfaatkan senyawa organik kompleks. Dari aspek energi, organisme kemotrof memperoleh energi dari oksidasi senyawa kimia (baik organik maupun anorganik), sedangkan fototrof mengonversi energi cahaya matahari.

CONTOH

Pada proses bioremediasi tanah yang tercemar oleh hidrokarbon minyak bumi di Indonesia, efektivitas degradasi polutan sangat bergantung pada manipulasi rasio karbon, nitrogen, dan fosfor (C:N:P) di dalam tanah. Senyawa hidrokarbon bertindak sebagai sumber karbon yang melimpah bagi bakteri pendegradasi, namun pertumbuhan mereka sering kali terhambat oleh keterbatasan nitrogen dan fosfor di lingkungan alami tersebut. Penambahan pupuk organik atau anorganik spesifik untuk mengoptimalkan rasio C:N:P terbukti meningkatkan viabilitas dan aktivitas enzimatis konsorsium bakteri indigenus dalam memecah rantai karbon kompleks (Evania, 2025).

Formulasi nutrisi juga harus memperhatikan kebutuhan akan faktor pertumbuhan (growth factors), yaitu senyawa organik esensial yang tidak dapat disintesis sendiri oleh mikroorganisme tertentu. Kelompok senyawa ini mencakup asam amino, purin, pirimidin, dan vitamin. Pada skala industri di Indonesia, formulasi nutrisi ini diterapkan secara presisi untuk mengoptimalkan produksi metabolit primer maupun sekunder. Sebagai contoh, optimasi media untuk bakteri asam laktat (BAL) dalam fermentasi skala pilot memerlukan pemantauan ketat terhadap konsentrasi nitrogen dari yeast extract dan pepton guna memaksimalkan laju pertumbuhan spesifik dan pembentukan asam laktat (Nandini, 2021). Modifikasi nutrisi lokal juga dapat memanfaatkan bahan yang ekonomis dan mudah didapat. Penggunaan bio-urin kambing Peranakan Etawa (PE) yang diperkaya dengan mikroorganisme lokal (MOL) menunjukkan bahwa penyediaan unsur nitrogen, fosfor, dan kalium organik yang tepat mampu mendukung kelangsungan hidup bakteri fiksasi nitrogen dan pelarut fosfat (Paturrahman, 2025). Selain itu, pemanfaatan bahan aditif organik seperti produk olahan bawang putih juga diketahui memberikan pengaruh positif terhadap kinerja pertumbuhan serta modulasi ekosistem mikroba usus (Tanti, 2023). Melalui pemahaman mendalam tentang kebutuhan nutrisi ini, para akademisi dan praktisi dapat merekayasa media tumbuh yang efisien bagi berbagai aplikasi bioteknologi tanah, pangan, maupun kesehatan (Sriwijaya Soedjadi, 2025).

D. JENIS DAN KOMPOSISI MEDIA KULTUR

Kultivasi mikroorganisme secara in vitro memerlukan media kultur yang mampu menyediakan seluruh kebutuhan nutrisi serta kondisi fisikokimia yang sesuai. Berdasarkan komposisi kimianya, media kultur diklasifikasikan menjadi media sintetik (terdefinisi) dan media kompleks (tidak terdefinisi). Media sintetik dibuat dengan melarutkan senyawa kimia murni dengan konsentrasi yang diketahui secara pasti. Media ini sangat berguna dalam penelitian fisiologi mikroba untuk menentukan kebutuhan nutrisi spesifik suatu spesies. Sebaliknya, media kompleks mengandung bahan-bahan dengan komposisi kimiawi yang bervariasi dan tidak diketahui secara pasti, seperti ekstrak daging (beef extract), ekstrak khamir (yeast extract), atau pepton. Media kompleks digunakan untuk menumbuhkan bakteri heterotrof yang memiliki persyaratan nutrisi rumit (fastidious).

Berdasarkan fungsi aplikatifnya di laboratorium mikrobiologi klinis dan industri, media dibedakan menjadi media umum, media selektif, media diferensial, dan media pengaya. Media selektif dirancang untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme target tertentu sekaligus menghambat pertumbuhan mikroba non-target menggunakan zat penghambat seperti antibiotik, pewarna kationik, atau garam empedu. Media diferensial mengandung senyawa kimia tertentu (seperti indikator pH atau substrat kromogenik) yang memungkinkan identifikasi visual berdasarkan kemampuan biokimia mikroorganisme yang tumbuh. Sebagai contoh, dalam mendiagnosis patogen penyebab Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) dan diare yang memiliki prevalensi tinggi di berbagai wilayah Indonesia, pemilihan media selektif dan diferensial seperti MacConkey Agar sangat krusial untuk memisahkan bakteri enteropatogenik dari flora normal (Erica Yola Pramana Putri, 2022).

Dalam konteks penelitian bioteknologi lingkungan dan energi terbarukan di Indonesia, media kultur juga dimodifikasi untuk mengoptimalkan pertumbuhan organisme fotosintetik. Misalnya, dalam kultivasi mikroalga untuk produksi biofuel di laboratorium, formulasi nutrisi dikendalikan secara ketat menggunakan limbah cair industri lokal seperti limbah cair tahu (Wulan, 2025). Pengaturan parameter fisika-kimia media, termasuk konduktivitas listrik (electrical conductivity) dan konsentrasi nutrisi nitrogen serta fosfor, sangat memengaruhi akumulasi biomassa mikroalga

(Maharani, 2025). Prinsip pengendalian konsentrasi nutrisi dan faktor pembatas lingkungan ini juga sejalan dengan optimasi pertumbuhan tanaman selada pada metode hidroponik sistem sumbu (Wijaya, 2022). Pendekatan formulasi media ini sejalan dengan dokumentasi sistematis keanekaragaman hayati dan kebutuhan ekofisiologis organisme dalam berbagai katalog biologi global (BFG (The Brazil Flora Group), 2021).

Untuk memberikan panduan praktis dalam pemilihan media, klasifikasi jenis media beserta fungsi spesifiknya disajikan pada tabel di bawah ini.

Tabel 8. Klasifikasi dan Aplikasi Media Kultur Utama di Laboratorium

Jenis Media	Komposisi Kunci	Sifat/Fungsi Kerja	Contoh Media	Target Mikroorganisme
Umum	Pepton, ekstrak daging, agar	Non-selektif, menyokong pertumbuhan umum	Nutrient Agar (NA)	Bakteri heterotrof non-fastidious
Selektif	Garam empedu, kristal violet	Menghambat bakteri Gram-positif	MacConkey Agar	Bakteri Gram-negatif enteric
Diferensial	Laktosa, indikator merah netral	Membedakan fermenter laktosa (merah/merah muda)	MacConkey Agar	<i>Escherichia coli</i> vs <i>Salmonella</i> sp.
Selektif/Diferensial	Konsentrasi NaCl tinggi (7,5%), Manitol	Menyeleksi halotoleran, diferensiasi fermentasi manitol	Mannitol Salt Agar	<i>Staphylococcus aureus</i>
Pengaya	Darah domba 5%, tripton	Menyediakan faktor tumbuh X dan V	Blood Agar	Bakteri <i>fastidious</i> (<i>Streptococcus</i> spp.)

Interpretasi dari tabel di atas menunjukkan bahwa formulasi media dapat disesuaikan untuk mencapai tujuan spesifik, baik untuk isolasi selektif maupun identifikasi awal karakteristik biokimia bakteri patogen berdasarkan aktivitas metaboliknya pada media diferensial.

E. TEKNIK PEMBUATAN DAN STERILISASI MEDIA

Keberhasilan penumbuhan kultur mikroorganisme sangat bergantung pada presisi teknik pembuatan media dan kesempurnaan proses sterilisasi. Tahapan pembuatan media diawali dengan penimbangan formulasi bubuk kering secara akurat menggunakan neraca analitis, diikuti dengan pelarutan dalam akuades steril menggunakan pemanas berpengaduk (hotplate stirrer). Selama pelarutan media padat yang mengandung agar, suspensi harus dipanaskan hingga mendidih agar polimer agar-agar terhidrasi dan larut sempurna. Sebelum proses sterilisasi dimulai, pengukuran dan penyesuaian derajat keasaman (pH) media harus dilakukan menggunakan pH meter. Penyesuaian pH ini sangat penting karena deviasi pH yang kecil sekalipun dapat menghambat pertumbuhan mikroba target atau menyebabkan hidrolisis agar selama pemanasan, sehingga media gagal memadat setelah dingin.

Sterilisasi adalah proses mutlak untuk memusnahkan seluruh bentuk kehidupan mikroorganisme, termasuk endospora bakteri yang sangat resisten terhadap panas. Metode sterilisasi yang paling umum untuk media kultur adalah sterilisasi panas lembap menggunakan autoklaf. Mekanisme kematian mikroba akibat panas lembap didasarkan pada denaturasi dan koagulasi protein struktural serta enzim esensial sel. Kondisi standar pengoperasian autoklaf untuk sterilisasi media adalah pada suhu 121 °C dengan tekanan 15 psi (sekitar 1 atmosfer di atas tekanan udara normal) selama 15 menit.

⚠ PERHATIAN

Beberapa komponen media bersifat termolabil (tidak tahan panas), seperti vitamin, antibiotik, dan beberapa jenis karbohidrat sederhana. Sterilisasi komponen termolabil ini tidak boleh dilakukan dengan autoklaf, melainkan harus menggunakan metode filtrasi membran dengan ukuran pori 0,22 mikrometer, kemudian ditambahkan secara aseptis ke dalam media dasar yang telah disterilkan dan didinginkan hingga suhu sekitar 45-50 °C.

Dalam mendesain siklus sterilisasi, peneliti harus memahami kinetika kematian termal mikroorganisme. Dua parameter penting

yang digunakan adalah nilai *D* (Decimal Reduction Time) dan nilai *Z*.

f FORMULA

Nilai *D* (Waktu Reduksi Desimal) adalah waktu dalam menit pada suhu tertentu yang diperlukan untuk menurunkan populasi mikroorganisme target sebesar 90% atau satu logaritma desimal. Persamaan matematisnya adalah:

$$D = t / (\log N_0 - \log N_t)$$

Di mana *t* adalah waktu pemanasan, *N*₀ adalah populasi awal, dan *N*_t adalah populasi akhir setelah waktu *t*. Sementara itu, **Nilai *Z*** didefinisikan sebagai peningkatan suhu dalam derajat Celsius yang diperlukan untuk menghasilkan penurunan nilai *D* sebesar 90% (satu siklus logaritma).

Aplikasi praktis dari perhitungan kinetika sterilisasi ini sangat penting dalam industri pengolahan pangan dan produk susu di Indonesia. Sebagai contoh, pada peternakan sapi perah dan industri pengolahan susu di Jawa Barat, pemantauan jumlah mikroba total dan efisiensi sterilisasi termal dilakukan untuk memastikan produk bebas dari patogen tanpa merusak kualitas nutrisi susu (Mutaqin, 2021). Selain itu, dalam pemanfaatan limbah pertanian seperti baglog jamur tiram untuk dijadikan media tanam atau media tumbuh mikroorganisme lokal (MOL), sterilisasi yang tidak sempurna akan memicu kontaminasi oleh kapang liar seperti *Trichoderma* sp. yang tumbuh lebih cepat dan mendominasi media (Wanti, 2023). Oleh karena itu, perhitungan nilai *D* dan *Z* yang tepat menjamin media steril tanpa mengalami kerusakan nutrisi akibat pemanasan berlebih (over-sterilization).

F. TEKNIK INOKULASI DAN ISOLASI MIKROORGANISME

Isolasi mikroorganisme adalah prosedur memisahkan spesies mikroba tertentu dari populasi campuran di alam untuk mendapatkan kultur murni (pure culture) yang hanya terdiri dari satu jenis sel tunggal. Teknik inokulasi merupakan pemindahan mikroorganisme dari satu medium ke medium baru dengan menerapkan prinsip

aseptis secara ketat untuk mencegah masuknya kontaminan eksternal dari udara, tubuh peneliti, maupun peralatan. Seluruh prosedur inokulasi dan isolasi harus dilakukan di dalam Laminar Air Flow (LAF) cabinet yang telah disterilkan dengan sinar ultraviolet (UV) selama 30 menit, atau minimal bekerja di dekat zona steril yang dihasilkan oleh nyala api pembakar Bunsen.

Metode isolasi yang paling banyak diterapkan untuk memperoleh koloni tunggal yang terpisah adalah teknik cawan gores (streak plate). Prinsip dasar teknik ini adalah pengenceran mikroorganisme secara fisik di atas permukaan medium agar padat menggunakan jarum inokulasi (ose). Penggoresan dilakukan secara bertahap pada beberapa sektor (biasanya metode goresan kuadran). Setiap kali berpindah sektor, ose harus dipanaskan hingga membara di atas api Bunsen untuk mematikan sel mikroba yang tersisa di ose, kemudian didinginkan sejenak sebelum menggores sektor berikutnya dengan cara menarik sebagian kecil koloni dari sektor sebelumnya. Pada sektor terakhir, diharapkan konsentrasi sel bakteri sudah sangat rendah sehingga sel-sel tersebut terpisah secara individual dan tumbuh menjadi koloni tunggal yang terisolasi setelah diinkubasi.

CONTOH

Dalam penelitian pemanfaatan biourin kambing Peranakan Etawa (PE) di Polewali Mandar, Sulawesi Barat, teknik isolasi digunakan untuk mengeksplorasi keberadaan bakteri fungsional yang terkandung di dalam urin fermentasi tersebut. Untuk menguji kualitas fisik dan biologis biourin, peneliti mengisolasi koloni bakteri indigenus menggunakan metode cawan sebar (spread plate) dari pengenceran bertingkat (Risal, 2025). Koloni tunggal yang berhasil diisolasi kemudian diidentifikasi lebih lanjut untuk melihat potensinya sebagai agen pembenah tanah dan pupuk organik cair yang ramah lingkungan (Paturrahman, 2025).

Selain teknik cawan gores dan cawan sebar, metode cawan tuang (pour plate) juga sering digunakan untuk tujuan isolasi sekaligus penghitungan jumlah mikroba hidup (viable count). Pada metode cawan tuang, sampel mikroba hasil pengenceran bertingkat dicampur langsung dengan medium agar cair steril ber-suhu sekitar

45 °C sebelum dituangkan ke dalam cawan petri kosong. Setelah agar memadat, cawan diinkubasi sehingga koloni mikroba akan tumbuh baik di permukaan maupun di dalam matriks agar. Mahasiswa harus dapat mendemonstrasikan kedua metode ini secara aseptis dan memilih teknik yang paling sesuai berdasarkan sifat fisiologis mikroorganisme target, seperti membedakan bakteri aerob obligat yang lebih cocok diisolasi dengan cawan gores/sebar dibandingkan bakteri mikroaerofilik atau anaerob yang dapat tumbuh di dalam matriks agar pada metode cawan tuang.

G. PEMELIHARAAN DAN PENYIMPANAN KULTUR MIKROORGANISME

Setelah kultur murni berhasil diisolasi dan diidentifikasi, langkah krusial berikutnya adalah melakukan pemeliharaan dan penyimpanan kultur untuk menjaga viabilitas sel, stabilitas genetik, dan kemurnian isolat dalam jangka waktu yang diinginkan. Metode penyimpanan mikroorganisme dirancang untuk meminimalkan laju metabolisme sel tanpa menyebabkan kematian seluler. Hal ini dicapai dengan membatasi ketersediaan nutrisi, menurunkan suhu penyimpanan, atau menghilangkan kandungan air bebas dari dalam sel.

Penyimpanan jangka pendek (beberapa minggu hingga bulan) umumnya dilakukan dengan metode subkultur berkala pada medium miring (agar slant) yang disimpan di dalam lemari pendingin pada suhu 4 °C. Meskipun metode ini sederhana dan ekonomis, kelemahan utamanya adalah risiko kontaminasi yang tinggi setiap kali proses subkultur ulang dilakukan, serta potensi terjadinya mutasi genetik spontan akibat replikasi sel yang terus berjalan secara lambat. Untuk memperpanjang masa simpan hingga satu tahun, kultur pada agar miring dapat dilapisi dengan minyak mineral steril (seperti parafin cair) untuk mencegah dehidrasi medium dan membatasi suplai oksigen, sehingga laju respirasi mikroba dapat ditekan secara signifikan.

Untuk penyimpanan jangka panjang (beberapa tahun hingga dekade) tanpa mengubah karakteristik genetik asli mikroba, metode kriopreservasi (pembekuan dalam suhu sangat rendah) dan liofilisasi (freeze-drying) merupakan pilihan terbaik.

DEFINISI

Kriopreservasi adalah teknik penyimpanan sel hidup pada suhu sangat rendah (antara -80°C hingga -196°C menggunakan nitrogen cair) dengan penambahan zat pelindung dingin (*cryoprotectant*) seperti gliserol atau dimetil sulfoksida (DMSO) guna mencegah kerusakan mekanis sel akibat pembentukan kristal es tajam di dalam sitoplasma.

⚠ PERHATIAN

Keberhasilan kriopreservasi sangat dipengaruhi oleh laju pembekuan sel. Pembekuan yang terlalu lambat dapat menyebabkan dehidrasi seluler yang ekstrem akibat efek osmotik ekstraseluler, sedangkan pembekuan yang terlalu cepat tanpa krioprotektan yang memadai akan memicu pembentukan kristal es intraseluler berukuran besar yang dapat merobek membran sel mikroba saat proses pencairan kembali (*thawing*).

Metode liofilisasi bekerja dengan cara membekukan suspensi sel, kemudian mengeringkannya melalui proses sublimasi air di bawah kondisi vakum tinggi, sehingga kandungan air seluler langsung berubah dari fase padat (es) menjadi fase gas tanpa melalui fase cair. Isolat yang telah melalui proses liofilisasi disimpan di dalam ampul kaca tertutup rapat dan stabil pada suhu ruang selama puluhan tahun.

Implementasi teknik penyimpanan ini sangat vital dalam pengelolaan koleksi kultur nasional maupun industri pertanian di Indonesia. Sebagai contoh, dalam perbenihan dan pengiriman bibit setek berakar tanaman bernilai tinggi seperti vanili, teknik penyimpanan kultur pendukung (seperti bakteri endofit atau jamur mikoriza) harus dikelola secara profesional untuk menjaga mutu fisik dan fisiologis bibit selama periode penyimpanan jangka panjang (Udia, 2021). Pengelolaan koleksi kultur mikroba ini memiliki kedudukan fungsional yang setara dengan sistem inventarisasi dan preservasi keanekaragaman hayati skala makro seperti flora nasional, di mana standardisasi protokol penyimpanan mutlak

diperlukan demi menjaga kelestarian sumber daya genetik berharga dari kepunahan (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Mahasiswa diharapkan mampu merancang dan menerapkan metode preservasi yang tepat sesuai dengan karakteristik struktural dan fisiologis dari masing-masing isolat mikroorganisme yang dikoleksi.

H. RANGKUMAN

Kebutuhan nutrisi mikroorganisme mencakup penyediaan makronutrien secara konstan sebagai penyusun utama komponen struktural seluler dan mikronutrien yang berfungsi esensial sebagai kofaktor dalam mengatalisis berbagai reaksi biokimiawi metabolisme. Keberhasilan kultivasi mikroba sangat bergantung pada ketepatan pengelompokan fisiologis berdasarkan sumber karbon, baik autotrof yang memanfaatkan karbon dioksida maupun heterotrof yang menggunakan senyawa organik, serta sumber energi yang membedakan organisme fototrof dari kemotrof. Manipulasi rasio nutrisi esensial seperti karbon, nitrogen, dan fosfor terbukti menjadi faktor penentu dalam menjaga viabilitas mikroba, seperti yang diterapkan pada optimasi biodegradasi senyawa hidrokarbon di lingkungan tercemar maupun pada produksi metabolit industri menggunakan bakteri asam laktat. Selain itu, formulasi media kultur harus disesuaikan secara fisikokimia dan nutrisi, yang secara garis besar diklasifikasikan menjadi media sintetik dengan komposisi murni terdefinisi dan media kompleks yang kaya akan bahan organik tidak terdefinisi untuk menumbuhkan mikroba yang membutuhkan persyaratan tumbuh rumit. Secara fungsional, penggunaan media umum, selektif, diferensial, dan pengaya memegang peranan krusial dalam memisahkan serta mengidentifikasi mikroba target, terutama dalam penanganan kasus klinis infeksi bakteri maupun aplikasi bioteknologi modern. Eksplorasi media berbasis bahan lokal, seperti pemanfaatan bio-urin ternak untuk menyokong bakteri fiksasi nitrogen atau pengolahan limbah cair industri untuk kultivasi mikroalga penghasil biofuel, menegaskan bahwa pemahaman ekofisiologi nutrisi mikroba merupakan instrumen strategis yang menjembatani penelitian teoretis laboratorium dengan aplikasi praktis di sektor lingkungan, pangan, pertanian, dan kesehatan. Integrasi prinsip-prinsip ini memungkinkan para praktisi merekayasa

kondisi lingkungan mikroba secara presisi guna menghasilkan efisiensi proses biokimiawi yang optimal di berbagai sektor industri.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana manipulasi rasio karbon, nitrogen, dan fosfor (C:N:P) dapat memengaruhi efisiensi biodegradasi hidrokarbon oleh bakteri indigenus pada tanah yang tercemar minyak bumi. Hubungkan analisis Anda dengan konsep pembatas pertumbuhan mikroba.
2. Bandingkan efektivitas penggunaan media sintetis terdefinisi dengan media kompleks tidak terdefinisi dalam mengisolasi bakteri heterotrof yang bersifat *fastidious* dari sampel klinis. Evaluasi kelebihan dan kekurangan masing-masing media berdasarkan konsistensi hasil dan kemudahan preparasi.
3. Rumuskan suatu rancangan formulasi media tumbuh yang memanfaatkan bahan lokal ekonomis, seperti bio-urin atau limbah industri cair, untuk mendukung pertumbuhan bakteri pelarut fosfat. Jelaskan parameter fisika-kimia apa saja yang harus dikendalikan agar pertumbuhan bakteri tersebut optimal.
4. Telaah prinsip kerja MacConkey Agar sebagai media yang sekaligus bersifat selektif dan diferensial. Analisis bagaimana penambahan garam empedu, kristal violet, laktosa, dan indikator merah netral dapat membedakan bakteri enteropatogenik dari flora normal pada diagnosis diare.
5. Argumentasikan mengapa pemahaman mengenai perbedaan sumber energi (fototrof vs kemotrof) dan sumber karbon (autotrof vs heterotrof) menjadi sangat krusial dalam merancang sistem kultivasi mikroalga untuk produksi biofuel dibandingkan dengan kultivasi bakteri asam laktat untuk fermentasi pangan.

b. Pilihan Berganda

1. Elemen mikroba yang dibutuhkan dalam jumlah besar karena menyusun komponen struktural utama sel seperti protein, lipid, dan asam nukleat dikategorikan sebagai makronutrien. Manakah kelompok elemen di bawah ini yang seluruhnya termasuk dalam makronutrien?
 - a. Karbon, nitrogen, belerang, dan tembaga
 - b. Oksigen, hidrogen, seng, dan besi

- c. Karbon, fosfor, magnesium, dan kalsium
 - d. Kobalt, mangan, nikel, dan kalium
 - e. Hidrogen, belerang, molibdenum, dan besi
2. Unsur kelumit atau mikronutrien sangat dibutuhkan oleh mikroorganisme meskipun dalam jumlah yang sangat sedikit. Fungsi utama dari unsur kelumit seperti mangan, seng, dan tembaga di dalam sel mikroba adalah...
- a. Berperan sebagai sumber energi utama sel
 - b. Bertindak sebagai kofaktor enzim dalam reaksi biokimia
 - c. Menyusun komponen utama dinding sel bakteri
 - d. Menjadi akseptor elektron terakhir dalam respirasi anaerob
 - e. Menyimpan informasi genetik di dalam nukleoid
3. Suatu mikroorganisme yang menggunakan senyawa organik kompleks sebagai sumber karbon sekaligus memanfaatkan oksidasi senyawa kimia organik sebagai sumber energi diklasifikasikan sebagai...
- a. Fotoautotrof
 - b. Kemoautotrof
 - c. Fotoheterotrof
 - d. Kemoheterotrof
 - e. Kemolitotrof
4. Dalam bioremediasi tanah yang tercemar hidrokarbon minyak bumi, pertumbuhan bakteri pendegradasi sering kali terhambat meskipun sumber karbon melimpah. Faktor utama yang menyebabkan hambatan tersebut adalah...
- a. Ketiadaan bakteri indigenus di lingkungan tercemar
 - b. Keterbatasan unsur nitrogen dan fosfor di dalam tanah
 - c. Konsentrasi oksigen yang terlalu tinggi di dalam tanah
 - d. Pengaruh toksik langsung dari penambahan pupuk organik
 - e. Tingginya kelembapan tanah yang menghalangi difusi gas
5. Perbedaan mendasar antara media sintetis (terdefinisi) dengan media kompleks (tidak terdefinisi) terletak pada...
- a. Keberadaan agar sebagai agen pematid media
 - b. Kemampuan media dalam menumbuhkan bakteri anaerob
 - c. Diketahuinya konsentrasi pasti dari setiap senyawa kimia penyusunnya
 - d. pH media yang disesuaikan dengan kebutuhan fisiologis mikroba

- e. Jenis metode sterilisasi yang digunakan sebelum inokulasi
- 6. MacConkey Agar merupakan media yang sangat berguna dalam mendiagnosis bakteri enteropatogenik Gram-negatif. Komponen dalam MacConkey Agar yang berfungsi sebagai agen selektif untuk menghambat pertumbuhan bakteri Gram-positif adalah...
 - a. Laktosa dan merah netral
 - b. Pepton dan ekstrak daging
 - c. Garam empedu dan kristal violet
 - d. Manitol dan natrium klorida tinggi
 - e. Darah domba dan tripton
- 7. Pada media MacConkey Agar, bakteri pencernaan yang mampu memfermentasi laktosa akan membentuk koloni berwarna merah atau merah muda. Perubahan warna koloni ini terjadi karena adanya...
 - a. Penurunan pH media yang dideteksi oleh indikator merah netral
 - b. Peningkatan pH media akibat hidrolisis pepton
 - c. Reaksi pengendapan garam empedu di sekitar koloni bakteri
 - d. Oksidasi kristal violet oleh enzim beta-galaktosidase
 - e. Lisisnya sel darah domba yang melepaskan hemoglobin
- 8. Mannitol Salt Agar (MSA) merupakan contoh media selektif sekaligus diferensial. Mengapa media ini sangat efektif digunakan untuk menyeleksi spesies *Staphylococcus aureus*?
 - a. Mengandung antibiotik yang membunuh bakteri Gram-negatif
 - b. Memiliki konsentrasi NaCl tinggi yang menyeleksi bakteri halotoleran
 - c. Menyediakan faktor tumbuh X dan V dari darah domba
 - d. Menggunakan indikator merah netral untuk mendeteksi asam
 - e. Tidak mengandung sumber karbon organik selain manitol
- 9. Beberapa bakteri dikategorikan sebagai organisme *fastidious* karena memiliki persyaratan nutrisi yang rumit dan tidak dapat menyintesis faktor pertumbuhan sendiri. Media yang paling tepat digunakan untuk menumbuhkan bakteri kelompok ini adalah...
 - a. Nutrient Agar
 - b. MacConkey Agar
 - c. Mannitol Salt Agar

- d. Blood Agar
 - e. Sintetik Minimal Agar
10. Dalam kultivasi mikroalga untuk produksi biofuel, salah satu limbah cair lokal yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi nitrogen dan fosfor yang ekonomis adalah...
- a. Limbah cair industri tahu
 - b. Limbah minyak bumi olahan
 - c. Bio-urin kambing tanpa pengayaan
 - d. Produk olahan bawang putih murni
 - e. Ekstrak khamir konsentrasi tinggi

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah laboratorium mikrobiologi klinik di sebuah rumah sakit daerah menerima sampel feses dari pasien yang mengalami gejala diare akut pasca mengonsumsi makanan laut. Teknisi laboratorium harus segera mengidentifikasi apakah penyebab infeksi tersebut adalah bakteri Gram-negatif enterik seperti *Escherichia coli* atau patogen lain seperti *Salmonella* sp. Namun, laboratorium tersebut kehabisan stok media MacConkey Agar dan hanya menyisakan Nutrient Agar, Mannitol Salt Agar, dan Blood Agar.

Instruksi: Analisis bagaimana keterbatasan media ini memengaruhi akurasi dan kecepatan diagnosis bakteri target. Rencanakan strategi alternatif terbaik menggunakan media yang tersedia serta evaluasi konsekuensi dari keputusan teknis tersebut terhadap hasil identifikasi bakteri.

2. Sebuah kelompok tani di wilayah pedesaan menghadapi masalah penurunan kesuburan tanah akibat penggunaan pupuk kimia jangka panjang secara berlebihan. Mereka ingin beralih ke pupuk hayati berbasis bakteri fiksasi nitrogen indigenus. Namun, biaya pembelian media kultur standar seperti Nutrient Broth sangat mahal untuk skala aplikasi lapangan. Di sisi lain, wilayah tersebut memiliki kelimpahan bio-urin kambing Peranakan Etawa dan limbah pertanian organik lainnya.

Instruksi: Rumuskan sebuah konsep formulasi media kultur cair berbasis bahan lokal yang ekonomis untuk mengoptimalkan pertumbuhan bakteri fiksasi nitrogen tersebut. Jelaskan rasio nutrisi utama yang harus diperhatikan serta langkah-langkah praktis untuk meminimalkan kontaminasi mikroba liar selama proses fermentasi sederhana di tingkat petani.

BAB IX

PERTUMBUHAN

MIKROORGANISME

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. **Memahami konsep dasar pertumbuhan mikroorganisme.** Mahasiswa dapat menjelaskan definisi pertumbuhan, mekanisme reproduksi sel, serta perbedaan antara pertumbuhan individu dan populasi mikroba.
2. **Menganalisis kurva pertumbuhan mikroorganisme.** Mahasiswa mampu mengidentifikasi dan menjelaskan setiap fase pertumbuhan (lag, log, stasioner, dan kematian) serta faktor yang memengaruhi dinamika kurva tersebut.
3. **Menerapkan metode pengukuran pertumbuhan mikroba.** Mahasiswa dapat memilih dan menggunakan metode pengukuran yang sesuai (langsung maupun tidak langsung) untuk menentukan laju pertumbuhan dan kepadatan populasi mikroba.
4. **Menjelaskan faktor fisik, kimia, dan biologi yang memengaruhi pertumbuhan mikroorganisme.** Mahasiswa mampu menguraikan pengaruh suhu, pH, oksigen, tekanan osmotik, serta interaksi biologis seperti antagonisme, biofilm, quorum sensing, dan sinergisme terhadap pertumbuhan mikroorganisme.
5. **Menginterpretasikan dinamika populasi dan model pertumbuhan mikroba.** Mahasiswa dapat menghitung waktu generasi, laju pertumbuhan spesifik, serta memahami konsep batch dan continuous culture dalam konteks penelitian dan industri.
6. **Menilai dan menerapkan prinsip kontrol pertumbuhan mikroorganisme.** Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan metode fisik maupun kimia untuk mengendalikan

pertumbuhan mikroba, serta memahami prinsip uji efektivitas antimikroba.

7. **Mengaitkan konsep pertumbuhan mikroorganisme dengan aplikasi bioteknologi.** Mahasiswa dapat menjelaskan penerapan konsep pertumbuhan mikroba dalam fermentasi, produksi metabolit sekunder, bioremediasi, dan pengembangan produk industri berbasis mikroba.

B. PENDAHULUAN

Pertumbuhan mikroorganisme adalah salah satu topik penting dalam mikrobiologi. Ketika berbicara tentang pertumbuhan mikroba, yang dimaksud bukan sekadar pertambahan ukuran satu sel, melainkan bertambahnya jumlah sel mikroorganisme tersebut dalam suatu populasi. Proses ini menjadi dasar untuk memahami banyak hal, mulai dari bagaimana penyakit menyebar hingga bagaimana mikroba dimanfaatkan dalam industri pangan dan bioteknologi. Dengan memahami pola pertumbuhan, kita bisa melihat bagaimana mikroorganisme beradaptasi, berkembang, dan bertahan hidup dalam berbagai kondisi.

Di laboratorium, pertumbuhan mikroorganisme biasanya dipelajari melalui kultur murni yang ditumbuhkan pada media tertentu. Dari sini, kita bisa mengamati kurva pertumbuhan yang terdiri atas empat (4) fase penting, yaitu fase lag, log, stasioner, dan kematian. Setiap fase memiliki ciri khas yang mencerminkan kondisi fisiologis mikroba. Misalnya, fase lag menunjukkan masa adaptasi, sedangkan fase log adalah saat mikroba membelah dengan cepat. Pemahaman tentang kurva ini sangat penting karena menjadi dasar dalam penelitian maupun aplikasi praktis, seperti fermentasi atau uji antibiotik.

Selain faktor lingkungan fisik dan kimia seperti suhu, pH, oksigen, dan tekanan osmotik, pertumbuhan mikroorganisme juga dipengaruhi oleh faktor biologi. Mikroba dapat saling berinteraksi, baik dalam bentuk antagonisme (saling menghambat), pembentukan biofilm, maupun komunikasi melalui quorum sensing. Interaksi ini membuat pertumbuhan mikroba menjadi lebih kompleks dan menarik untuk dipelajari, karena menunjukkan bahwa mikroorganisme tidak hidup sendiri, melainkan membentuk jaringan sosial yang memengaruhi kelangsungan hidup mereka.

Untuk memahami pertumbuhan secara lebih mendalam, kita juga perlu mengetahui cara mengukurnya. Ada berbagai metode yang bisa digunakan, baik menghitung secara langsung seperti mengukur kekeruhan kultur dengan spectrophotometer, maupun secara tidak langsung atau viable counting. Data hasil pengukuran ini membantu kita menghitung waktu generasi, laju pertumbuhan, dan bahkan merancang model matematis untuk memprediksi dinamika populasi. Dengan keterampilan ini, mahasiswa tidak hanya memahami konsep, tetapi juga mampu melakukan analisis praktis di laboratorium.

Pada akhirnya, pengetahuan tentang pertumbuhan mikroorganisme memiliki manfaat yang luas. Dari produksi makanan fermentasi tradisional seperti tempe dan yoghurt, hingga pengembangan antibiotik dan bioteknologi modern, semua bergantung pada pemahaman bagaimana mikroba tumbuh dan berinteraksi. Bab ini diharapkan dapat memberikan landasan yang kuat bagi mahasiswa untuk menghubungkan teori dengan praktik, sekaligus menumbuhkan kesadaran akan peran besar mikroorganisme dalam kehidupan sehari-hari dan dunia industri.

Pertumbuhan mikroorganisme dalam mikrobiologi tidak diartikan sebagai bertambahnya ukuran sel tunggal, melainkan sebagai **peningkatan jumlah sel dalam suatu populasi**. Proses ini terjadi melalui mekanisme reproduksi seperti pembelahan biner, budding, atau fragmentasi, yang menghasilkan sel-sel baru dan memperbesar populasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, istilah “pertumbuhan” dalam bab ini lebih menekankan aspek kuantitatif jumlah sel dibandingkan perubahan morfologi individu (Madigan dkk., 2021).

Mempelajari pertumbuhan mikroorganisme sangat penting karena memiliki implikasi luas. Dalam **kesehatan**, pemahaman tentang dinamika pertumbuhan patogen membantu dalam diagnosis, terapi, dan pengembangan antibiotik maupun vaksin. Dalam **industri**, mikroba digunakan untuk fermentasi, produksi enzim, biofuel, dan obat-obatan. Dalam **lingkungan**, mikroorganisme berperan dalam siklus biogeokimia, bioremediasi, dan menjaga keseimbangan ekosistem. Sedangkan dalam **bioteknologi**, mikroba dimanfaatkan untuk rekayasa genetika, produksi probiotik, dan terapi berbasis mikroba (Patil dkk., 2024).

Selain itu, penting juga membedakan antara **pertumbuhan individu** dan **pertumbuhan populasi**. Pertumbuhan individu merujuk pada peningkatan ukuran atau massa sel tunggal, sedangkan pertumbuhan populasi adalah peningkatan jumlah sel dalam komunitas mikroba. Studi terbaru menunjukkan bahwa karakteristik pertumbuhan populasi, seperti laju eksponensial, waktu fase lag, dan yield (jumlah sel per unit sumber), dapat berevolusi berbeda dari sifat pertumbuhan individu. Hal ini menegaskan bahwa dalam ekosistem nyata, seleksi alam lebih banyak bekerja pada tingkat populasi, bukan sel tunggal (Lin dkk., 2020).

Dengan memahami definisi pertumbuhan, pentingnya kajian ini, serta perbedaan antara individu dan populasi, mahasiswa akan memiliki landasan konseptual yang kuat. Pengetahuan ini akan memudahkan dalam mengaitkan teori dengan fenomena nyata, seperti penyebaran penyakit, pembentukan biofilm, atau optimasi fermentasi industri. Pembahasan ini akan menjadi pintu masuk untuk memahami bagaimana mikroorganisme beradaptasi, berkembang, dan berinteraksi dalam berbagai konteks biologis maupun aplikatif.

C. KONSEP DASAR PERTUMBUHAN MIKROORGANISME

Tidak seperti sel eukariot, kebanyakan bakteri dan arkea hanya punya satu set kromosom (haploid). Cara mereka berkembang biak biasanya lewat **pembelahan biner** (Gambar 1). Prosesnya cukup sederhana:

1. Sel akan **memanjang** sambil menyintesis komponen sel baru.
2. Kromosomnya **digandakan**.
3. DNA hasil duplikasi kemudian **dipisahkan**, sehingga tiap sisi sel punya satu kromosom.
4. Setelah itu, terbentuk **dinding pemisah (septum)** di bagian tengah.

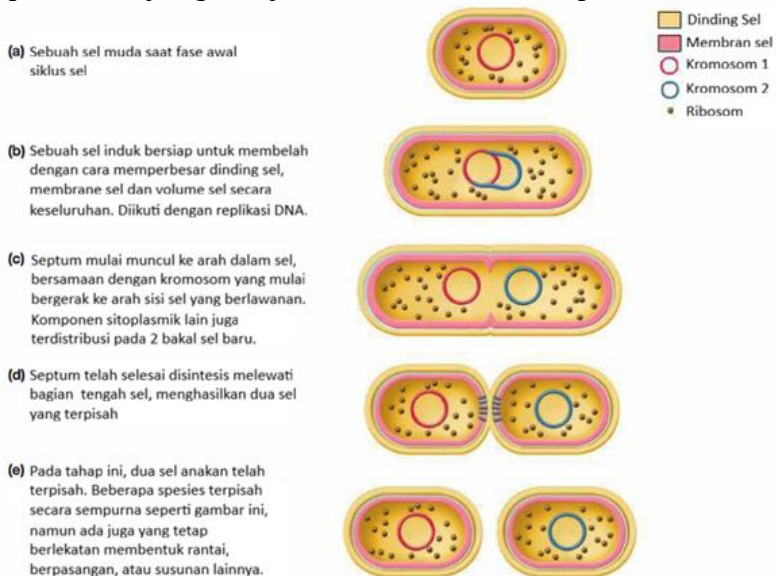
Hasil akhirnya: sel induk terbagi menjadi **dua sel anak**, masing-masing membawa kromosom sendiri serta perlengkapan sel lainnya.

Selain pembelahan biner, bakteri juga memiliki cara lain untuk berkembang biak. Ada jenis bakteri yang memiliki tangkai kecil yang disebut prostheca, misalnya *Hyphomonas*. Bakteri ini memperbanyak

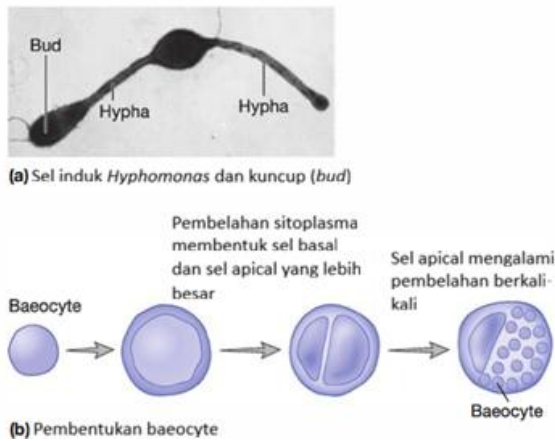
diri dengan cara membentuk tunas (bud) di ujung tangkainya. Sementara itu, beberapa cyanobacteria menggunakan strategi yang berbeda, yaitu pembelahan ganda atau *multiple fission*. Hasil dari proses ini adalah sel-sel anak yang disebut **baeosit**, yang pada awalnya tetap berada di dalam dinding sel induk sebelum akhirnya dilepaskan ke lingkungan (Black, 2012; Madigan dkk., 2021; Willey dkk., 2014).

Ada juga bakteri seperti *Streptomyces* yang membentuk filamen panjang dengan banyak inti/nukleoid (*multinucleoid*), sebuah proses yang dikenal dengan istilah **fragmentasi**. Filamen ini kemudian terpecah menjadi spora berinti tunggal (*uninucleoid*). Spora tersebut mudah menyebar, mirip dengan cara jamur berfilamen menyebarkan sporanya (Willey dkk., 2014).

Walaupun cara reproduksi bakteri terlihat beragam, semuanya memiliki kesamaan penting. Dalam setiap proses, DNA atau genom sel harus digandakan dan dipisahkan menjadi nukleoid yang berbeda. Selanjutnya, setiap nukleoid bersama dengan sitoplasma di sekitarnya akan tertutup oleh membran plasma sendiri. Tahapan-tahapan inilah yang menjadi inti dari siklus hidup sel bakteri.



Gambar 1. Tahapan pada pembelahan biner (Willey dkk., 2014)



Gambar 2. Jenis reproduksi bakteri *bud* dan *baeocyte*

D. PERTUMBUHAN POPULASI DAN DINAMIKA SEL

Waktu yang dibutuhkan sebuah bakteri untuk membelah diri dari satu sel induk menjadi dua sel anak disebut **waktu generasi** atau **waktu penggandaan**. Istilah ini mirip dengan pengertian “generasi” pada manusia, yaitu jarak waktu antara kelahiran seseorang hingga ia memiliki keturunan. Pada bakteri, setiap kali terjadi pembelahan, jumlah sel akan **berlipat dua**. Misalnya, awalnya hanya ada 1 sel. Setelah satu kali pembelahan (generasi pertama), jumlahnya menjadi 2 sel. Generasi kedua menghasilkan 4 sel. Generasi ketiga menjadi 8 sel. Lalu 16, 32, 64, dan seterusnya. Selama kondisi lingkungan mendukung (misalnya ada cukup makanan, suhu sesuai, dan tidak ada gangguan), proses pelipatan ini akan terus berlanjut dengan kecepatan yang sama. Jadi, setiap generasi baru selalu membuat populasi bertambah dua kali lipat dari sebelumnya.

Waktu generasi pada bakteri adalah ukuran penting untuk mengetahui seberapa cepat organisme tersebut tumbuh. Jika dibandingkan dengan makhluk hidup lain, bakteri terkenal memiliki laju pertumbuhan yang jauh lebih cepat. Dalam kondisi ideal, rata-rata waktu generasi bakteri hanya sekitar tiga puluh hingga enam puluh menit. Bahkan, ada jenis bakteri yang mampu membelah diri dalam sepuluh hingga dua belas menit saja. Sebaliknya, beberapa bakteri lain membutuhkan waktu berhari-hari hingga berbulan-bulan

untuk menyelesaikan satu siklus pembelahan. Sebagai contoh, *Mycobacterium leprae*, penyebab penyakit kusta, memiliki waktu generasi antara sepuluh hingga tiga puluh hari, hampir sama panjangnya dengan beberapa hewan. Bakteri lingkungan tertentu bahkan bisa memiliki waktu generasi yang diukur dalam hitungan bulan. Namun, sebagian besar bakteri patogen justru memiliki waktu penggandaan yang relatif singkat. *Salmonella enteritidis* dan *Staphylococcus aureus*, dua bakteri penyebab keracunan makanan, mampu berlipat ganda hanya dalam dua puluh hingga tiga puluh menit. Inilah sebabnya mengapa makanan yang dibiarkan pada suhu ruang meskipun sebentar dapat dengan cepat dipenuhi jutaan sel bakteri. Dalam beberapa jam saja, populasi yang awalnya kecil bisa berkembang menjadi jumlah yang sangat besar. Fenomena ini menjelaskan mengapa kasus keracunan makanan sering terjadi, dan sekaligus menekankan pentingnya menjaga kebersihan serta penyimpanan makanan dengan benar (Cowan, 2012).

Hubungan antara jumlah sel dalam suatu populasi pada waktu tertentu dapat dijelaskan dengan sebuah persamaan sederhana. Persamaan ini melibatkan tiga komponen utama: **jumlah sel pada waktu tertentu (N_t)**, **jumlah sel awal (N_0)**, dan **jumlah pembelahan atau divisi yang telah terjadi atau generasi ke- (n)**. Dengan mengetahui dua dari tiga nilai tersebut, kita dapat dengan mudah menghitung nilai yang ketiga. Persamaan ini menunjukkan bahwa pertumbuhan populasi bakteri bersifat **eksponensial**. Artinya, setiap kali sel mengalami pembelahan, jumlahnya akan berlipat ganda sesuai dengan banyaknya siklus pembelahan yang berlangsung. Misalnya, jika kita mulai dengan sejumlah kecil sel, maka setelah beberapa kali pembelahan jumlahnya bisa meningkat drastis.

Konsep ini sangat penting dalam mikrobiologi karena membantu kita memahami bagaimana populasi bakteri dapat berkembang begitu cepat dalam waktu singkat. Dengan menggunakan persamaan ini, ilmuwan dapat memprediksi jumlah sel pada suatu titik waktu tertentu, sehingga dapat memperkirakan laju pertumbuhan dan dampaknya, baik dalam konteks kesehatan, industri, maupun lingkungan.

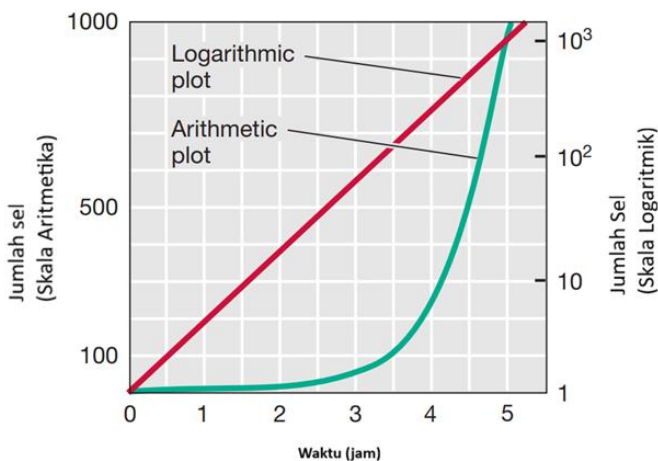
$$N_t = N_0 \times 2^n$$

Sebagai ilustrasi, jika kita mulai dengan satu sel ($N_0 = 1$) dan sel tersebut mengalami tiga kali pembelahan ($n = 3$), maka jumlah

akhirnya adalah 8 sel (1×2^3). Jika jumlah awalnya 2 sel dan terjadi 5 kali pembelahan, maka hasilnya menjadi 64 sel (2×2^5). Bahkan, jika kita mulai dengan 10 sel dan membiarkannya membelah 10 kali, maka jumlah akhirnya dapat dihitung dengan rumus:

$$N_t = 10 \times 2^{10} = 10 \times 1024 = 10.240 \text{ sel}$$

Pertumbuhan bakteri dapat digambarkan dengan dua cara berbeda, yaitu menggunakan angka sel secara **aritmetika** atau menggunakan **logaritma** jumlah sel. Jika jumlah sel diplot secara aritmetika, grafik yang dihasilkan berbentuk kurva melengkung karena populasi bertambah dengan pola eksponensial. Sebaliknya, jika jumlah sel diplot dalam bentuk logaritma, grafik yang muncul berupa garis lurus (Gambar 3). Garis lurus ini menjadi ciri khas pertumbuhan eksponensial, karena setiap generasi selalu melipatgandakan jumlah sel dengan pola yang konsisten. Dengan demikian, penggunaan logaritma dalam analisis pertumbuhan bakteri memudahkan kita untuk melihat hubungan linear antara waktu dan jumlah generasi. Hal ini sangat membantu dalam penelitian mikrobiologi, karena mempermudah perhitungan laju pertumbuhan serta memprediksi dinamika populasi dalam kondisi tertentu.



Gambar 3. Kecepatan pertumbuhan kultur mikroba (Madigan dkk., 2021)

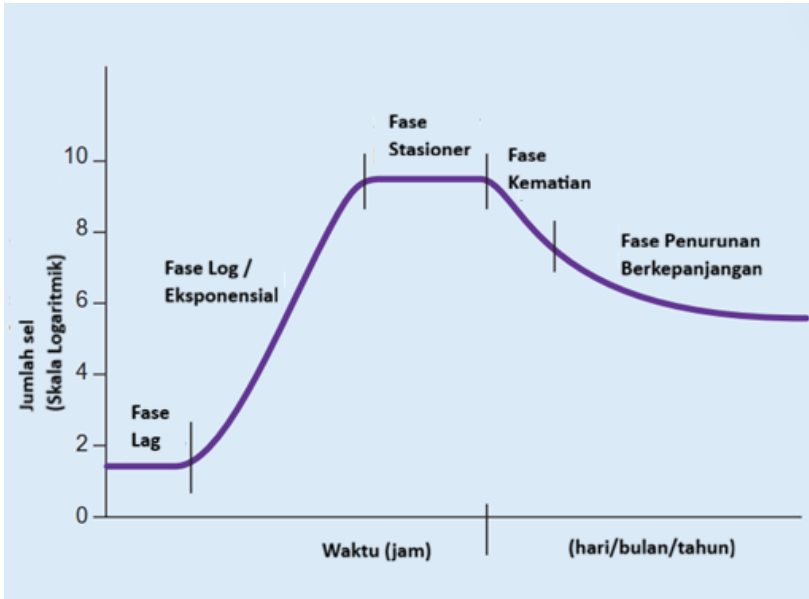
E. KURVA PERTUMBUHAN MIKROOGANISME

Di laboratorium, bakteri biasanya ditumbuhkan dalam media cair di dalam tabung atau labu, atau pada permukaan agar di cawan

petri. Sistem ini disebut sebagai **sistem tertutup** atau **batch culture**, karena nutrisi tidak diperbarui dan limbah tidak dibuang. Dalam kondisi seperti ini, populasi sel akan bertambah dengan pola yang dapat diprediksi, namun pada akhirnya akan menurun ketika sumber daya habis dan limbah menumpuk.

Pertumbuhan bakteri dalam sistem tertutup mengikuti pola 4 tahapan/fase -fase **lag**, **log/eksponensial**, **stasioner**, **penurunan (kematian)**- yang dikenal sebagai **kurva pertumbuhan** (Gambar 4). Kurva ini menggambarkan bagaimana populasi sel berkembang dari fase awal hingga akhirnya menurun (Nester, 2009). Dengan mempelajari kurva pertumbuhan, para peneliti dapat memahami dinamika populasi mikroba, termasuk kapan sel-sel berada dalam fase aktif membelah, kapan mereka mulai melambat, dan kapan populasi menurun.

Untuk menjaga agar sel-sel tetap berada dalam keadaan pertumbuhan yang berkesinambungan, diperlukan sistem yang berbeda dari kultur batch. Dalam sistem ini, nutrisi harus terus-menerus ditambahkan, sementara produk limbah yang dihasilkan harus secara aktif dibuang. Sistem semacam ini disebut **sistem terbuka** atau **kultur kontinu**. Berbeda dengan kultur batch yang memiliki keterbatasan karena nutrisi habis dan limbah menumpuk, kultur kontinu memungkinkan populasi mikroba dipertahankan dalam fase pertumbuhan eksponensial untuk waktu yang lama. Dengan cara ini, laju pertumbuhan dapat dikontrol, hasil biomassa lebih stabil, dan produksi metabolit dapat berlangsung secara konsisten.



Gambar 4. Kurva pertumbuhan mikroorganisme (Nester, 2009)

Fase Lag

Pada fase lag, jumlah sel bakteri belum meningkat secara signifikan, tetapi sel-sel tersebut sangat aktif secara metabolik. Mereka sedang “bersiap-siap” untuk membelah, dengan cara memperbesar ukuran tubuh, mensintesis enzim, ribosom, dan asam nukleat, serta menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Fase ini dapat dianggap sebagai masa adaptasi, di mana bakteri menyesuaikan diri dengan kondisi medium baru sebelum memasuki fase pertumbuhan eksponensial (Black, 2012; Nester, 2009).

Lama fase lag sangat bergantung pada jenis bakteri dan kondisi media. Jika sel dipindahkan dari medium segar yang kaya nutrisi ke medium dengan komposisi serupa, fase lag biasanya singkat—hanya satu hingga dua jam. Namun, jika sel berasal dari kultur lama yang sudah terbiasa dengan keterbatasan nutrisi dan akumulasi limbah, atau jika dipindahkan ke medium dengan nutrisi lebih sedikit, maka fase lag bisa berlangsung lebih lama, bahkan beberapa hari. Hal yang sama juga terjadi ketika sel bakteri dipindahkan dari medium yang kaya nutrisi ke medium yang lebih miskin nutrisi. Pada fase ini, sel harus “menyiapkan diri” dengan cara mensintesis enzim baru yang diperlukan untuk menggantikan

komponen yang tidak tersedia di medium baru. Proses ini membutuhkan waktu, sehingga durasi fase lag cenderung lebih Panjang (Black, 2012; Nester, 2009).

Fase Log/Ekspensial

Pada fase log, atau fase ekspensial, sel-sel bakteri membelah pada interval waktu yang tetap, yang disebut **waktu generasi**. Interval ini ditentukan secara genetik, sehingga setiap spesies memiliki pola pembelahan khasnya sendiri. Selama fase ini, populasi bertambah dengan persentase yang sama pada setiap satuan waktu. Misalnya, sebuah kultur yang berawal dengan 1.000 sel per mililiter dan memiliki waktu generasi 20 menit akan berkembang menjadi 2.000 sel setelah 20 menit. Setelah 40 menit jumlahnya meningkat menjadi 4.000, lalu 8.000 setelah 1 jam. Jika dibiarkan selama 2 jam, populasi melonjak menjadi 64.000 sel, dan setelah 3 jam jumlahnya mencapai 512.000 sel. Pertumbuhan seperti ini yang dikenal dengan ekspensial atau logaritmik (Black, 2012).

Pada fase awal pertumbuhan ekspensial, sel bakteri berfokus pada peningkatan massa tubuh sebelum terus membelah. Mereka mensintesis senyawa penting seperti asam amino dan nukleotida, yang menjadi bahan dasar protein dan asam nukleat. Proses ini berlangsung dengan regulasi yang sangat presisi, sehingga setiap komponen diproduksi dalam jumlah yang tepat untuk perakitan makromolekul secara efisien. Senyawa yang dihasilkan selama periode ini disebut **metabolit primer**, yaitu produk metabolisme yang diperlukan untuk pertumbuhan, termasuk energi dalam bentuk ATP.

Beberapa metabolit primer memiliki nilai komersial tinggi, misalnya digunakan sebagai bahan penyedap atau suplemen makanan. Karena itu, industri bioteknologi berusaha memanfaatkan kemampuan alami bakteri dengan mengembangkan metode agar mereka dapat menghasilkan metabolit primer dalam jumlah lebih besar. Dengan cara ini, proses biologis yang terjadi dalam fase pertumbuhan ekspensial dapat dimanfaatkan untuk kepentingan praktis, mulai dari produksi pangan hingga pengembangan bahan tambahan bernilai ekonomi.

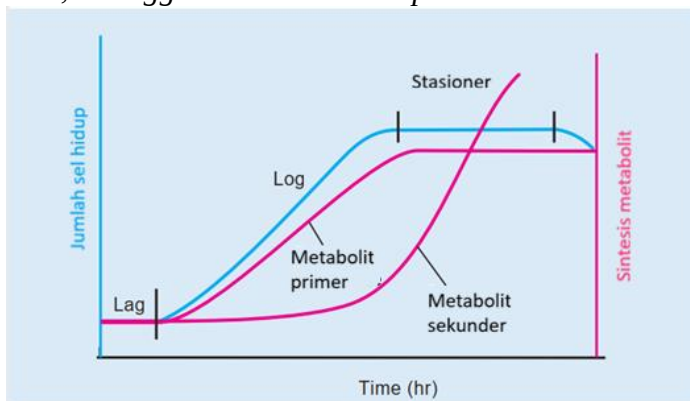
Ketika kultur bakteri memasuki **fase log akhir**, mereka mulai beralih dari pertumbuhan aktif menuju fase stasioner. Perubahan ini terjadi karena nutrisi semakin menipis dan limbah menumpuk dalam

sistem tertutup. Sel-sel yang mampu membentuk endospora akan memulai proses sporulasi, sedangkan yang tidak dapat membentuk spora akan menyesuaikan diri dengan kondisi kelaparan. Pada tahap ini, sel biasanya menjadi lebih bulat, lebih tahan terhadap bahan kimia berbahaya maupun radiasi, serta mengalami perubahan pada dinding sel dan membran plasma.

Selain itu, bakteri mulai mensintesis kelompok senyawa baru yang disebut **metabolit sekunder** (Gambar 5). Berbeda dengan metabolit primer yang diperlukan untuk pertumbuhan, metabolit sekunder muncul sebagai respons terhadap perubahan lingkungan. Salah satu contoh paling penting adalah **antibiotik**, yang berfungsi menghambat atau membunuh organisme lain. Senyawa ini memiliki nilai komersial tinggi dan menjadi dasar bagi banyak aplikasi industri serta medis (Nester, 2009).

Fase Stasioner

Fase stasioner terjadi ketika laju pembelahan sel menurun hingga jumlah sel baru yang terbentuk sama dengan jumlah sel yang mati. Akibatnya, populasi tampak stabil dan digambarkan sebagai garis datar pada kurva pertumbuhan. Kondisi ini muncul karena keterbatasan nutrisi, akumulasi limbah beracun, berkurangnya oksigen bagi organisme aerob, serta perubahan pH yang merugikan. Dengan kata lain, lingkungan tidak lagi mendukung pertumbuhan berkelanjutan, sehingga sel harus beradaptasi untuk bertahan hidup.



Gambar 5. Produksi metabolit primer dan sekunder (Nester, 2009)

Meskipun jumlah total sel hidup relatif konstan, dinamika tetap berlangsung: sebagian sel mati dan melepaskan isi selnya, yang kemudian dimanfaatkan oleh sel lain sebagai sumber energi dan nutrien. Pada fase ini, sel juga terus menghasilkan **metabolit sekunder** dan mempertahankan sifat-sifat adaptif yang muncul sejak fase log akhir, seperti ketahanan terhadap stres lingkungan. Lama fase stasioner bervariasi, tergantung spesies dan kondisi medium; ada populasi yang hanya bertahan beberapa jam, sementara yang lain dapat bertahan berhari-hari.

Fase Penurunan (Kematian)

Fase kematian terjadi ketika kondisi medium semakin tidak mendukung pembelahan sel. Pada tahap ini, jumlah sel hidup menurun karena laju kematian lebih tinggi daripada laju pembelahan. Penurunan populasi berlangsung secara **eksponensial**, mirip dengan pola pertumbuhan pada fase log, tetapi biasanya jauh lebih lambat. Grafiknya digambarkan sebagai garis menurun yang miring ke bawah. Selama fase ini, banyak sel mengalami **involusi**, yaitu perubahan bentuk menjadi tidak biasa sehingga sulit diidentifikasi. Pada organisme pembentuk spora, biasanya lebih banyak spora yang bertahan hidup dibandingkan sel vegetatif yang aktif secara metabolik.

Durasi fase kematian sangat bervariasi, tergantung pada sifat genetik spesies dan kondisi lingkungan. Ada kultur bakteri yang melewati seluruh tahapan pertumbuhan lalu mati dalam hitungan hari, sementara yang lain masih menyisakan sejumlah kecil sel hidup bahkan setelah berbulan-bulan atau bertahun-tahun. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar populasi mati, ada sebagian kecil sel yang mampu bertahan lebih lama, sehingga fase kematian dapat berlanjut cukup panjang sebelum akhirnya masuk ke fase penurunan berkepanjangan.

Kultur Kontinu Mikroorganisme

Kurva pertumbuhan yang baru dibahas di atas diperoleh saat menumbuhkan mikroorganisme dalam **sistem tertutup** atau batch culture. Pada sistem ini, nutrien tidak diperbarui dan limbah tidak dibuang. Akibatnya, pertumbuhan eksponensial hanya berlangsung beberapa generasi sebelum akhirnya mencapai fase stasioner.

Kondisi ini mencerminkan keterbatasan lingkungan yang tidak mendukung pertumbuhan berkelanjutan.

Sebagai alternatif, mikroorganisme dapat ditumbuhkan dalam sistem terbuka yang disebut **continuous culture**. Sistem ini menjaga kondisi lingkungan tetap konstan dengan cara menambahkan nutrisi secara terus-menerus dan sekaligus membuang limbah. Dengan demikian, populasi mikroba dapat dipertahankan dalam fase eksponensial untuk waktu yang lama, dengan laju pertumbuhan yang terkontrol dan konsentrasi biomassa yang stabil.

Keunggulan kultur kontinu adalah memungkinkan penelitian pada kondisi nutrisi rendah, mendekati keadaan alami di lingkungan seperti danau atau kolam. Hal ini sangat penting dalam studi ekologi mikroba, karena interaksi antarspesies dapat dimodelkan lebih realistis. Selain itu, kultur kontinu juga banyak digunakan dalam mikrobiologi pangan dan industri, misalnya untuk produksi enzim, antibiotik, atau fermentasi skala besar.

Ada dua jenis utama sistem kultur kontinu yang sering digunakan, yaitu **chemostat** dan **turbidostat**. Keduanya dirancang untuk mempertahankan populasi mikroba dalam kondisi pertumbuhan berkesinambungan, tetapi dengan mekanisme pengendalian yang berbeda. Kehadiran sistem ini menjadikan kultur kontinu sebagai alat penting dalam riset maupun aplikasi praktis bioteknologi (Willey dkk., 2014).

Chemostat adalah sistem kultur kontinu yang dirancang agar laju masuk medium steril sama dengan laju keluarnya medium yang sudah mengandung mikroorganisme. Medium dalam chemostat biasanya memiliki jumlah terbatas dari satu nutrisi penting, misalnya vitamin. Karena nutrisi ini bersifat pembatas, maka laju pertumbuhan mikroba ditentukan oleh laju aliran medium, sedangkan kepadatan sel akhir bergantung pada konsentrasi nutrisi pembatas.

Laju aliran nutrisi ini disebut *dilution rate* (D), yaitu perbandingan antara laju aliran medium (f , dalam mL/jam) dengan volume wadah kultur (V , dalam mL). Rumusnya adalah: $D = f/V$

Sebagai contoh, jika laju aliran medium 30 mL/jam dan volume wadah 100 mL, maka nilai $D = 0,30 \text{ jam}^{-1}$.

Hubungan antara *dilution rate*, ukuran populasi, dan waktu generasi sangat penting. Pada *dilution rate* rendah, nutrisi yang

tersedia sedikit sehingga energi mikroba lebih banyak dipakai untuk pemeliharaan sel daripada pertumbuhan. Jika dilution rate dinaikkan, lebih banyak nutrisi tersedia sehingga sel dapat tumbuh dan bereproduksi, menyebabkan kepadatan populasi meningkat dan waktu generasi menurun. Namun, bila dilution rate terlalu tinggi, mikroorganisme bisa “terhanyut keluar” dari wadah sebelum sempat bereproduksi, sehingga populasi hilang dari sistem.

Jenis kedua dari sistem kultur kontinu adalah **turbidostat**. Alat ini dilengkapi dengan **fotocell** yang mengukur tingkat kekeruhan kultur, yaitu jumlah cahaya yang dipantulkan atau dihamburkan oleh sel dalam medium. Karena kekeruhan berbanding lurus dengan kepadatan sel, turbidostat secara otomatis mengatur laju aliran medium masuk dan keluar agar kepadatan sel tetap stabil sesuai nilai yang ditentukan.

Berbeda dengan chemostat, dilution rate pada turbidostat tidak konstan, melainkan berubah-ubah sesuai kebutuhan untuk mempertahankan kekeruhan tertentu. Selain itu, medium dalam turbidostat mengandung semua nutrisi dalam jumlah berlebih, sehingga tidak ada nutrisi yang menjadi faktor pembatas (Willey dkk., 2014).

Turbidostat bekerja paling efektif pada dilution rate tinggi, karena sistem ini mampu menyesuaikan aliran medium dengan cepat untuk menjaga populasi tetap tumbuh. Sebaliknya, chemostat lebih stabil dan efektif pada dilution rate rendah, di mana pertumbuhan dikendalikan oleh nutrisi pembatas. Dengan demikian, kedua sistem ini saling melengkapi: chemostat untuk studi pertumbuhan pada kondisi terbatas, dan turbidostat untuk mempertahankan populasi pada kepadatan tinggi dengan suplai nutrisi berlebih. Perbedaan prinsip kerja chemostat dan turbidostat dapat diamati pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan Chemostat dan Turbidostat

Aspek	Chemostat	Turbidostat
Prinsip kerja	Laju masuk medium steril = laju keluar medium kultur	Laju aliran medium diatur otomatis berdasarkan kekeruhan
Kontrol pertumbuhan	Ditentukan oleh nutrisi pembatas dan <i>dilution rate</i> konstan	Ditentukan oleh sensor kekeruhan; <i>dilution rate</i> bervariasi
Nutrien	Satu nutrisi penting dibatasi	Semua nutrisi tersedia berlebih (tidak ada yang membatasi)
Efektivitas	Stabil pada <i>dilution rate</i> rendah	Optimal pada <i>dilution rate</i> tinggi
Aplikasi utama	Studi ekologi mikroba, simulasi lingkungan alami	Industri fermentasi, produksi biomassa tinggi
Kelebihan	Mengontrol pertumbuhan pada kondisi terbatas, realistis untuk ekologi	Menjaga kepadatan sel konstan, cocok untuk produksi berkelanjutan
Keterbatasan	Risiko <i>washout</i> bila <i>dilution rate</i> terlalu tinggi	Tidak cocok untuk studi nutrisi terbatas, lebih kompleks secara teknis

F. PENGUKURAN PERTUMBUHAN MIKROORGANISME

Penghitungan jumlah mikroorganisme merupakan aspek mendasar dalam mikrobiologi, karena memberikan gambaran tentang dinamika populasi sel dalam penelitian maupun aplikasi industri. Secara umum, metode enumerasi dibagi menjadi dua kategori besar: **langsung** dan **tidak langsung**. Metode langsung menghitung sel atau koloni secara nyata, sedangkan metode tidak langsung menggunakan parameter pertumbuhan seperti kekeruhan, biomassa, atau produk metabolit sebagai indikator jumlah sel (Liu dkk., 2025; Madigan dkk., 2021).

Dalam kelompok metode langsung, terdapat dua cabang utama: **total count** dan **viable count**. Total count menghitung semua

sel, baik hidup maupun mati, misalnya dengan hemocytometer atau Coulter counter. Sebaliknya, viable count hanya menghitung sel hidup yang mampu membelah dan membentuk koloni. Contoh metode viable count meliputi plate count (CFU), filtrasi membran, dan Most Probable Number (MPN). Hasil viable count biasanya dinyatakan dalam satuan **CFU/mL** atau **CFU/g**, karena satu koloni dianggap berasal dari satu sel hidup (Black, 2012; Liu dkk., 2025).

Metode tidak langsung, seperti turbidimetri atau pengukuran biomassa, lebih cepat dan praktis, tetapi hanya memberikan perkiraan jumlah sel. Metode ini tidak dapat membedakan antara sel hidup dan mati, sehingga kurang tepat bila tujuan penelitian adalah mengetahui viabilitas populasi. Namun, metode tidak langsung tetap penting dalam monitoring pertumbuhan kultur secara real-time, terutama dalam industri fermentasi dan produksi metabolit. Dengan demikian, pemahaman hubungan antara metode langsung, viable count, dan metode tidak langsung sangat penting agar mahasiswa mampu memilih pendekatan yang sesuai dengan konteks penelitian maupun aplikasi praktis.

Perhitungan Langsung – Total Count

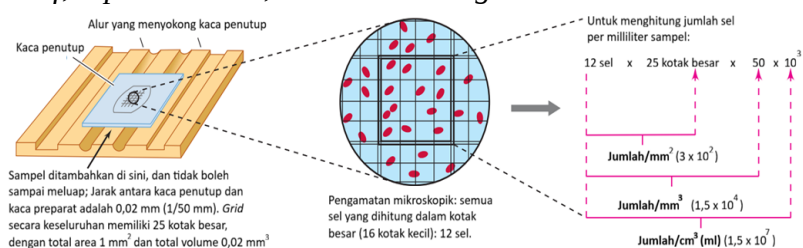
Salah satu cara paling sederhana dan jelas untuk menghitung jumlah mikroorganisme adalah dengan menggunakan **counting chamber**, seperti Petroff-Hausser chamber atau hemocytometer. Metode ini relatif mudah, murah, dan cepat dilakukan. Selain memberikan estimasi jumlah sel, teknik ini juga memungkinkan pengamatan langsung terhadap ukuran dan morfologi mikroorganisme. Counting chamber berupa slide khusus dengan grid terukir di permukaannya. Sampel kultur cair diteteskan ke ruang yang terbentuk antara kaca preparat dan kaca penutup, lalu sel dihitung di bawah mikroskop. Dengan mengetahui volume ruang dan faktor pengenceran, konsentrasi sel dalam sampel dapat diperkirakan (Gambar 6).

Metode ini memiliki kelebihan karena praktis dan dapat digunakan untuk kultur dengan kepadatan tinggi. Namun, ada keterbatasan penting: hasilnya kurang akurat bila kultur terlalu encer, karena jumlah sel yang terhitung terlalu sedikit. Selain itu, chamber tidak dapat membedakan antara sel hidup dan mati, sehingga hanya memberikan total count. Untuk mengatasi hal ini,

teknik pewarnaan fluoresensi kini digunakan agar dapat membedakan sel hidup (berwarna hijau) dan sel mati (berwarna merah). Dengan demikian, meskipun sederhana, metode counting chamber tetap menjadi salah satu teknik dasar yang penting dalam mikrobiologi untuk memperkirakan jumlah mikroorganisme dalam sampel (Liu dkk., 2025).

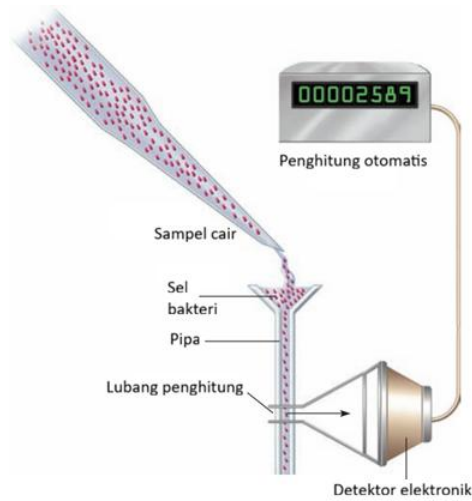
Sel dalam sampel cair juga dapat dihitung menggunakan **flow cytometer**. Alat ini bekerja dengan memanfaatkan sinar laser dan sistem elektronik yang kompleks untuk menghitung sel secara individual. Meskipun jarang digunakan untuk penghitungan rutin sel mikroba, flow cytometry memiliki aplikasi penting di bidang medis, misalnya untuk menghitung dan membedakan sel darah serta jenis sel lain dari sampel klinis.

Selain itu, **Coulter counter** (Gambar 7) adalah instrumen elektronik lain yang digunakan untuk menghitung sel dalam suspensi ketika sel-sel tersebut melewati sebuah lubang kecil secara berurutan. Cairan tempat sel tersuspensi harus bersifat konduktif secara listrik, karena alat ini bekerja dengan mendeteksi perubahan singkat pada resistansi listrik yang terjadi saat partikel non-konduktif, seperti bakteri, melewati lubang tersebut.



Gambar 6. Prosedur perhitungan mikroskopik langsung menggunakan Petroff-Hausser counting chamber

Dengan prinsip ini, Coulter counter mampu memberikan estimasi jumlah sel secara cepat dan otomatis. Metode ini sangat berguna untuk sampel dengan kepadatan tinggi, meskipun tetap memiliki keterbatasan, seperti tidak dapat membedakan antara sel hidup dan mati.



Gambar 7. *Coulter counter*

Perhitungan Langsung – Viable Count

*Penghitungan sel hidup atau **viable count** digunakan untuk mengetahui jumlah mikroorganisme yang masih mampu membelah dan berkembang biak. Metode ini membutuhkan kondisi pertumbuhan yang sesuai bagi mikroba tertentu serta waktu yang cukup agar koloni dapat terbentuk. Dengan bantuan media selektif maupun diferensial, kita bahkan bisa menghitung spesies tertentu secara lebih spesifik. Teknik ini sangat berguna untuk memantau pertumbuhan bakteri dalam sampel makanan atau air, terutama ketika jumlah sel terlalu sedikit untuk dihitung langsung dengan mikroskop.*

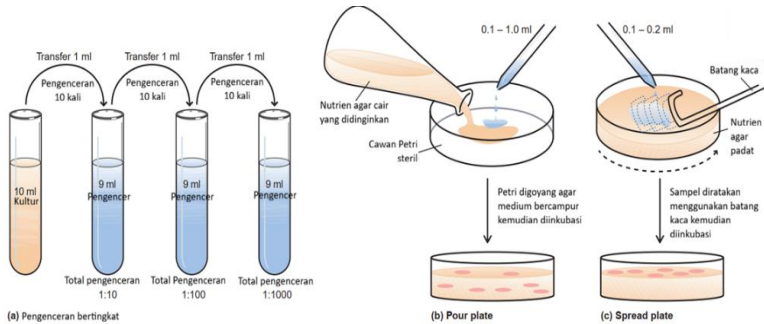
*Dalam konteks ini, sel yang disebut **viable** adalah sel yang benar-benar bisa membelah dan menghasilkan keturunan. Metode viable count sering disebut juga **plate count**, karena menggunakan agar plate sebagai media tumbuh. Prinsip dasarnya sederhana: setiap sel hidup diasumsikan akan berkembang menjadi satu koloni, sehingga jumlah koloni yang terlihat mencerminkan jumlah sel hidup dalam sampel. Hasilnya biasanya dinyatakan dalam satuan **CFU/mL** atau **CFU/g** (CFU: Colony-forming unit), yang menjadi standar dalam analisis mikrobiologi.*

*Ada dua cara utama dalam plate count: **spread plate** dan **pour plate** (Gambar 8). Pada spread plate, sejumlah kecil kultur yang telah diencerkan (biasanya 0,1–0,2 mL) diteteskan ke permukaan agar*

padat, lalu diratakan dengan batang kaca steril berbentuk seperti stik hoki mini. Sedangkan pada pour plate, kultur (0,1–1,0 mL) dimasukkan ke cawan Petri steril, kemudian ditambahkan agar cair yang sudah didinginkan hingga sekitar 50°C. Setelah dicampur dengan lembut, agar akan memerangkap sel, dan koloni terbentuk baik di permukaan maupun di dalam medium.

Agar hasilnya valid, jumlah koloni yang dihitung harus berada dalam kisaran **30–300 koloni per plate**. Jika terlalu banyak, koloni bisa saling bergabung sehingga sulit dihitung; jika terlalu sedikit, hasilnya tidak signifikan secara statistik. Karena sampel biasanya mengandung bakteri dalam jumlah besar, kultur perlu diencerkan terlebih dahulu, umumnya dengan pengenceran bertingkat sepuluh kali lipat menggunakan larutan fisiologis (NaCl 0,85%).

Setelah inkubasi, koloni yang terbentuk dihitung, lalu dikorelasikan dengan faktor pengenceran untuk memperkirakan konsentrasi sel hidup dalam sampel awal. Hasilnya dinyatakan sebagai **colony-forming units (CFU)**, bukan jumlah sel absolut, karena beberapa sel dapat menempel dan membentuk satu koloni.



Gambar 8. Plate count yang didahului oleh pengenceran bertingkat (a) dan dua teknik plate count, pour plate (b) dan spread plate (c)

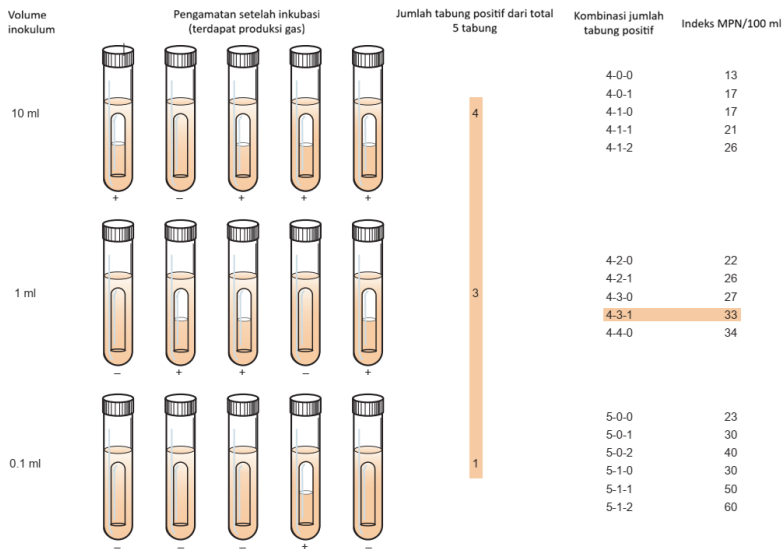
Metode perhitungan langsung-viable count lain yang biasa digunakan adalah **filtrasi membran** dan **Most Probable Number (MPN)**. Filtrasi membran digunakan ketika jumlah mikroorganisme dalam sampel relatif rendah, misalnya pada air alami yang encer. Prinsipnya adalah menyaring sejumlah volume cairan melalui membran steril dengan ukuran pori yang cukup kecil untuk menahan bakteri. Setelah itu, membran ditempatkan di atas medium agar yang sesuai dan diinkubasi. Koloni yang tumbuh di permukaan filter

mencerminkan jumlah sel hidup dalam volume cairan yang disaring. Teknik ini sangat berguna untuk menghitung populasi mikroba dalam air minum, udara, atau lingkungan dengan kepadatan sel rendah. Setiap koloni yang muncul dianggap berasal dari satu sel yang tertahan di filter, sehingga hasilnya dapat dinyatakan sebagai jumlah organisme per liter air atau udara. Dengan cara ini, membrane filtration memungkinkan deteksi mikroba yang tidak dapat dihitung dengan metode langsung lain seperti plate count biasa.

Ketika jumlah mikroorganisme dalam sampel terlalu sedikit untuk dihitung dengan metode plate count standar, atau ketika mikroba tidak dapat tumbuh di agar, metode **Most Probable Number (MPN)** dapat digunakan. Prinsipnya adalah melakukan serangkaian pengenceran bertingkat pada sampel, lalu mengamati tabung yang menunjukkan tanda pertumbuhan, misalnya kekeruhan atau gelembung gas. Dengan membandingkan jumlah tabung positif pada tiap tingkat pengenceran dengan tabel MPN, diperoleh estimasi jumlah mikroba dalam sampel (Gambar 9).

Metode MPN merupakan pendekatan statistik yang didasarkan pada teori probabilitas. Biasanya digunakan tiga set tabung (masing-masing berisi tiga atau lima tabung) dengan medium yang sama. Set pertama diinokulasi dengan volume sampel tertentu, set kedua dengan 10 kali lebih sedikit, dan set ketiga dengan 100 kali lebih sedikit. Setelah inkubasi, hasil positif atau negatif dicatat, lalu dicocokkan dengan tabel MPN untuk memperkirakan konsentrasi sel. Nilai dalam tabel menunjukkan rentang jumlah organisme dengan tingkat kepercayaan sekitar 95%.

Salah satu aplikasi paling penting dari metode MPN adalah dalam **uji kualitas air**, khususnya untuk mendeteksi keberadaan **koliform**. Koliform adalah bakteri Gram-negatif berbentuk batang yang dapat memfermentasi laktosa dan biasanya hidup di usus. Kehadiran koliform menjadi indikator adanya kontaminasi fekal. Dengan demikian, MPN menjadi metode yang sangat berguna dalam bidang kesehatan lingkungan, sanitasi pangan, dan ekologi mikroba, terutama ketika populasi mikroba terlalu kecil untuk dihitung dengan metode lain.



Gambar 9. Metode Most Probable Number (MPN)

Perhitungan Tidak Langsung

Jumlah sel mikroorganisme tidak selalu dihitung secara langsung, melainkan dapat diperkirakan melalui **parameter pertumbuhan**. Metode pengukuran tidak langsung ini menggunakan indikator seperti **kekeruhan kultur (turbiditas)**, **biomassa sel** (misalnya berat kering), atau **produk metabolit** yang dihasilkan selama pertumbuhan. Pendekatan ini memberikan gambaran umum tentang dinamika populasi mikroba tanpa harus menghitung sel satu per satu. Meskipun hasilnya berupa estimasi, metode ini sangat berguna untuk memantau laju pertumbuhan, aktivitas metabolik, dan produktivitas kultur dalam penelitian maupun aplikasi industri, terutama ketika penghitungan langsung sulit dilakukan.

Kekeruhan (turbidity) pada suspensi bakteri, misalnya kultur cair dalam tabung, terjadi karena cahaya yang melewati cairan dihamburkan oleh sel-sel yang ada di dalamnya. Semakin banyak sel, semakin besar cahaya yang dihamburkan, sehingga larutan tampak keruh. Prinsip ini dimanfaatkan untuk memperkirakan jumlah sel dengan menggunakan alat seperti **spektrofotometer** atau **kolorimeter**, yang mengukur intensitas cahaya yang lolos setelah melewati sampel (Gambar 10). Hasil pengukuran dinyatakan sebagai

optical density (OD) pada panjang gelombang tertentu, misalnya OD600.

Metode ini sangat berguna untuk memantau laju pertumbuhan mikroba secara cepat tanpa harus mengganggu kultur. Namun, ada keterbatasan penting: kultur harus memiliki kepadatan sel yang cukup tinggi agar terlihat keruh. Misalnya, larutan dengan 10^6 sel/mL masih tampak jernih, dan baru pada 10^7 sel/mL mulai terlihat sedikit keruh. Artinya, kultur yang tampak jernih tidak selalu bebas dari mikroba. Sebaliknya, kekeruhan juga bisa disebabkan oleh sel mati, sehingga hasil pengukuran tidak selalu mencerminkan jumlah sel hidup.

Untuk mendapatkan estimasi yang akurat, biasanya dilakukan **kalibrasi awal** antara nilai OD dan jumlah sel nyata (misalnya melalui plate count) untuk organisme dan kondisi tertentu. Setelah korelasi ini ditentukan, pengukuran turbiditas menjadi metode yang cepat dan relatif tepat untuk memantau pertumbuhan. Pada kultur dengan kepadatan sangat tinggi, sampel perlu diencerkan agar pembacaan spektrofotometer tetap valid (Black, 2012; Nester, 2009).



Gambar 10. Pengukuran turbiditas menggunakan spektrofotometer (Cowan, 2012)

Selain metode kekeruhan, pertumbuhan mikroba juga dapat diperkirakan melalui pengukuran biomassa sel. Teknik ini biasanya digunakan untuk organisme berfilamen, seperti jamur, yang sulit dipisahkan menjadi sel individu sehingga metode plate count kurang valid. Untuk menentukan berat basah (wet weight), kultur cair disentrifugasi sehingga sel mengendap di dasar tabung, lalu cairan supernatan dibuang. Endapan sel yang terkumpul kemudian ditimbang, dan beratnya dianggap sebanding dengan jumlah sel dalam kultur. Sedangkan untuk berat kering (dry weight), endapan

sel hasil sentrifugasi dikeringkan pada suhu sekitar 100°C selama 8–12 jam sebelum ditimbang. Karena sekitar 70% berat sel terdiri dari air, pengeringan ini memberikan estimasi biomassa yang lebih akurat. Metode ini memang lebih rumit dan memakan waktu dibandingkan penghitungan koloni, tetapi sangat berguna untuk kultur dengan struktur kompleks atau kepadatan tinggi, serta untuk penelitian yang membutuhkan data biomassa total (Nester, 2009).

Selain kekeruhan dan biomassa, pertumbuhan mikroba juga dapat diperkirakan melalui produk metabolit yang dihasilkan selama aktivitas sel. Mikroorganisme yang memecah gula sebagai sumber energi akan menghasilkan berbagai jenis asam, dan perubahan pH akibat produksi asam ini dapat dideteksi dengan indikator pH yang berubah warna sesuai kondisi medium. Selain itu, mikroba juga menghasilkan gas seperti CO₂, yang dapat dipantau dengan metode khusus, misalnya menggunakan molekul fluoresen di laboratorium klinis; penurunan pH akibat gas akan meningkatkan fluoresensi sehingga pertumbuhan dapat terdeteksi. Indikator lain yang sangat penting adalah ATP, sebagai tanda keberadaan sel hidup. Kehadiran ATP dapat diuji dengan enzim luciferase dari kunang-kunang, yang menggunakan energi dari ATP untuk menghasilkan cahaya. Metode ini sering dipakai untuk menguji efektivitas bahan kimia antimikroba, karena cahaya hanya muncul jika masih ada sel hidup (Nester, 2009). Dengan demikian, pengukuran produk metabolit bukan hanya membantu memperkirakan jumlah mikroba, tetapi juga menjadi cara cepat dan praktis untuk mengonfirmasi keberadaan sel hidup dalam sampel, baik dalam penelitian, sanitasi pangan, maupun aplikasi klinis.

G. FAKTOR LINGKUNGAN YANG MEMENGARUHI PERTUMBUHAN MIKROORGANISME

Mikroorganisme tidak hanya bergantung pada nutrien, tetapi juga harus menghadapi berbagai tantangan lingkungan seperti suhu ekstrem, tingkat keasaman (pH), kadar oksigen, tekanan osmotik maupun hidrostatis, radiasi, serta interaksi dengan mikroba lain. Untuk bertahan hidup, mikroorganisme melakukan adaptasi, yaitu penyesuaian biokimia atau genetik yang memungkinkan kelangsungan hidup dan pertumbuhan jangka panjang. Faktor

lingkungan ini sangat memengaruhi kerja enzim metabolik, sehingga kemampuan mikroba untuk bertahan ditentukan oleh apakah sistem enzimnya dapat menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi. Penting dibedakan antara pertumbuhan dalam kondisi tertentu dengan toleransi, yang berarti hanya mampu bertahan tanpa berkembang biak.

Menariknya, ada kelompok mikroba yang disebut **ekstremofil**, terutama dari Domain Archaea, yang justru mampu hidup di lingkungan ekstrem yang biasanya mematikan bagi organisme lain. Dengan memahami faktor-faktor lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan mikroba—seperti suhu, oksigen, pH, dan ketersediaan air—ilmuwan dapat meneliti mikroorganisme di laboratorium sekaligus memahami peran penting mereka dalam ekologi kompleks di bumi.

Temperatur

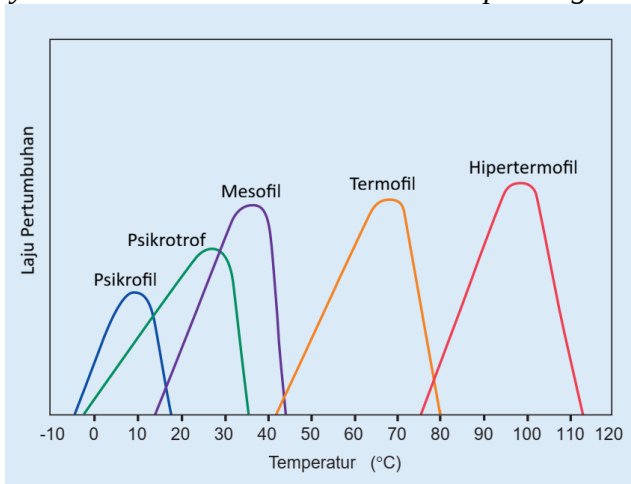
Mikroorganisme tidak mampu mengatur suhu internalnya, sehingga selalu mengikuti suhu lingkungan tempat mereka hidup. Karena itu, suhu menjadi faktor eksternal yang sangat menentukan kelangsungan hidup dan pertumbuhan. Dampaknya terutama terlihat pada enzim, yang memiliki suhu optimum untuk bekerja. Pada suhu di bawah optimum, aktivitas enzim menurun; sebaliknya, setiap kenaikan sekitar 10°C biasanya menggandakan kecepatan reaksi hingga mencapai titik optimum. Namun, jika suhu terus meningkat melewati batas toleransi, enzim dan protein lain akan mengalami denaturasi, membran sel bisa meleleh, dan akhirnya sel mati. Sebaliknya, pada suhu sangat rendah, membran dapat mengeras sehingga fungsi sel terganggu (Cowan, 2012; Madigan dkk., 2021).

Setiap mikroorganisme memiliki tiga **suhu kardinal**: **minimum** (suhu terendah yang masih memungkinkan pertumbuhan), **optimum** (rentang suhu yang mendukung laju pertumbuhan tercepat), dan **maksimum** (suhu tertinggi yang masih memungkinkan metabolisme). Jika suhu naik sedikit di atas maksimum, pertumbuhan berhenti; jika naik lebih jauh, enzim dan asam nukleat rusak permanen. Inilah sebabnya panas efektif digunakan sebagai agen pengendali mikroba. Menariknya, rentang suhu pertumbuhan antarspesies sangat bervariasi: ada yang optimum di sekitar 0°C, ada pula yang di atas 100°C. Secara keseluruhan, mikroba dapat tumbuh dalam rentang ekstrem dari sekitar -15°C hingga 122°C, meskipun tidak ada satu

pun organisme yang mampu hidup seluruh rentang tersebut (Nester, 2009; Willey dkk., 2014).

Untuk memudahkan klasifikasi, prokariota sering dibagi menjadi lima kelompok berdasarkan suhu optimum pertumbuhannya (Gambar 11). Pembagian ini hanyalah skema praktis, karena batas antar kelompok tidak selalu tegas dan tidak semua anggota mampu tumbuh di seluruh rentang suhu yang dikaitkan dengan kelompoknya.

Kelompok pertama adalah **psikrofil**, yang tumbuh baik pada suhu 0°C dengan suhu optimum sekitar 15°C dan maksimum sekitar 20°C. Mereka banyak ditemukan di lingkungan dingin seperti kutub, laut dalam, dan gletser. Adaptasi psikrofil meliputi enzim dan membran yang tetap aktif pada suhu rendah, serta adanya asam lemak tak jenuh yang menjaga fluiditas membran. Banyak psikrofil mengakumulasi senyawa yang disebut *compatible solutes*. Dalam konteks ini, fungsinya bukan untuk melindungi dari stres osmotik, melainkan untuk menurunkan titik beku sitosol, sehingga cairan sel tidak mudah membeku. Selain itu, beberapa psikrofil juga menghasilkan protein antifreeze yang berperan untuk menurunkan titik beku sitosol agar sel tetap stabil dan dapat bertahan hidup pada suhu yang sangat rendah. Ada juga kelompok **psikrotrof (psikrotoleran)**, yang mampu tumbuh pada suhu rendah tetapi memiliki suhu optimum lebih tinggi, sekitar 15–30°C, dan sering menjadi penyebab kerusakan makanan di lemari pendingin.



Gambar 11. Pengelompokan prokariot berdasarkan temperatur pertumbuhan (Nester, 2009)

Kelompok ketiga adalah **mesofil**, yang tumbuh pada suhu sedang dengan optimum 20–45°C. Hampir semua patogen manusia termasuk mesofil, karena suhu tubuh manusia yang konstan 37°C sesuai dengan kisaran optimum mereka. Mikroba ini banyak ditemukan di tanah, air, tumbuhan, dan hewan di daerah beriklim sedang hingga tropis. Ada pula **mikroba termodurik**, yaitu mesofil yang mampu bertahan pada paparan suhu tinggi sementara, misalnya spora *Bacillus* dan *Clostridium* yang tahan proses pasteurisasi.

Kelompok berikutnya adalah **termofil**, yang tumbuh optimal pada suhu 45–85°C, dengan optimum 55–65°C. Mereka hidup di lingkungan panas seperti kompos, sumber air panas, atau daerah vulkanik. Lebih ekstrem lagi adalah **hipertermofil**, yang memiliki suhu optimum 85–113°C dan biasanya tidak tumbuh di bawah 55°C. Mikroba ini banyak ditemukan di dasar laut yang panas atau habitat vulkanik. Termofil dan hipertermofil berbeda dari mesofil karena memiliki enzim dan sistem sintesis protein yang tahan panas, sehingga tetap berfungsi pada suhu tinggi. Stabilitas protein ini disebabkan oleh interior hidrofobik yang teratur, banyaknya ikatan hidrogen dan nonkovalen, serta kandungan asam amino seperti prolin yang membuat rantai polipeptida lebih kaku. Protein mereka juga dibantu oleh chaperone untuk menjaga lipatan tetap stabil. DNA mikroba termofilik diperkuat oleh protein nukleoid khusus, sedangkan hipertermofil memiliki enzim unik reverse DNA gyrase yang meningkatkan stabilitas DNA.

Selain itu, membran sel mereka sangat tahan panas karena tersusun atas banyak lipid jenuh, bercabang, dan bermassa molekul tinggi, sehingga titik leleh meningkat. Pada *Archaea*, lipid membran memiliki ikatan eter yang tahan hidrolisis, bahkan beberapa memiliki diglycerol tetraether yang membentuk monolayer kaku dan stabil.

Tingkat Keasaman (pH)

Keasaman atau kebasaaan suatu larutan dinyatakan dengan nilai pH yang diukur pada skala logaritmik. Titik netral berada pada pH 7, sedangkan nilai pH di bawah 7 menunjukkan sifat asam dan nilai di atas 7 menunjukkan sifat basa atau alkali. Sama halnya dengan suhu, setiap mikroorganisme memiliki rentang pH tertentu, biasanya sekitar 2–3 satuan pH, yang masih memungkinkan mereka

untuk tumbuh. Namun, di dalam rentang tersebut terdapat satu titik pH optimum, yaitu kondisi pH di mana pertumbuhan berlangsung paling baik.

pH bukan sekadar angka, melainkan faktor lingkungan yang sangat menentukan kemampuan mikroorganisme untuk hidup dan berkembang. Berdasarkan toleransinya terhadap tingkat keasaman atau kebasaan, mikroorganisme dapat dibedakan menjadi tiga kelompok utama. Kelompok pertama adalah **asidofil**, yaitu mikroorganisme yang tumbuh baik pada kondisi asam. Kelompok kedua adalah **neutrofil**, yang pertumbuhannya optimal pada kondisi netral. Sementara itu, kelompok ketiga adalah **alkalifil**, yang mampu berkembang dengan baik pada kondisi basa atau alkali.

Asidofil adalah mikroorganisme “pecinta” asam yang tumbuh optimal pada pH di bawah 5,5. Beberapa di antaranya hanya mampu hidup pada kondisi asam lemah, seperti *Lactobacillus* yang menghasilkan asam laktat. Namun, ada pula kelompok ekstrem yang dapat bertahan pada pH sangat rendah, bahkan mendekati nol. Misalnya, bakteri pengoksidasi sulfur mampu menghasilkan asam sulfat hingga pH 1, cukup kuat untuk melarutkan batu kapur dan membentuk gua besar seperti Carlsbad Caverns di Amerika. Koloni bakteri ini sering tampak menggantung menyerupai lendir, sehingga dijuluki “snotites” (Black, 2012; Madigan dkk., 2021).

Keunikan asidofil terletak pada stabilitas membran sitoplasma mereka. Banyak di antara mikroba ini tidak dapat bertahan pada pH netral, karena membran selnya akan rusak dan sel mengalami lisis. Artinya, mereka bukan sekadar toleran terhadap asam, melainkan benar-benar membutuhkan konsentrasi proton tinggi untuk menjaga kestabilan hidupnya (Madigan dkk., 2021).

Contoh ekstrem adalah *Picrophilus oshimae*, anggota Archaea yang ditemukan di tanah vulkanik Jepang. Mikroba ini tumbuh optimal pada pH 0,7 dengan suhu sekitar 60°C, tetapi akan segera hancur jika pH naik di atas 4. Ada juga *Acidothiobacillus ferrooxidans*, bakteri yang hidup pada pH sekitar 2 dengan cara mengoksidasi senyawa sulfur dan menghasilkan asam sulfat. Untuk bertahan, ia menjaga pH internal tetap netral dengan memompa keluar proton yang masuk ke dalam sel (Nester, 2009).

Neutrofil adalah mikroorganisme yang tumbuh optimal pada kisaran pH mendekati netral, yaitu antara 5,4 hingga 8,0. Dalam

rentang ini, sebagian besar bakteri patogen yang menyebabkan penyakit pada manusia ditemukan. Artinya, kondisi tubuh manusia yang umumnya berada di sekitar pH netral menjadi lingkungan ideal bagi bakteri jenis ini untuk berkembang (Black, 2012).

Alkalifil adalah mikroorganisme “pecinta” basa yang tumbuh optimal pada pH tinggi, biasanya di atas 8,5 hingga sekitar 11,5. Mereka banyak ditemukan di habitat sangat alkalis seperti danau soda atau tanah dengan kandungan karbonat tinggi. Contoh yang terkenal adalah *Vibrio cholerae*, penyebab penyakit kolera, yang tumbuh baik pada pH sekitar 9. Ada juga *Alcaligenes faecalis*, yang kadang menginfeksi manusia dengan kondisi tubuh lemah, mampu bertahan pada pH 9 atau lebih. Bahkan, bakteri tanah seperti *Agrobacterium* dapat hidup di tanah dengan pH ekstrem hingga 12 (Black, 2012).

Beberapa spesies memiliki kemampuan luar biasa, misalnya *Bacillus firmus* yang dapat tumbuh dalam rentang luas antara pH 7,5 hingga 11. Ada pula *Bacillus alcalophilus* yang tumbuh optimal pada pH 10,5. Adaptasi mereka memungkinkan menjaga pH internal tetap netral dengan cara menukar ion natrium (Na^+) dari dalam sel dengan proton (H^+) dari luar (Nester, 2009).

Selain keunikan biologisnya, alkalifil juga memiliki nilai industri. Mereka menghasilkan enzim luar sel (exoenzim) seperti protease dan lipase yang tetap aktif pada kondisi basa. Enzim ini diproduksi secara komersial dalam jumlah besar dan digunakan, misalnya, sebagai bahan tambahan pada deterjen untuk menghilangkan noda protein dan lemak (Madigan dkk., 2021).

pH optimum suatu organisme merujuk pada kondisi lingkungan ekstraseluler tempat ia tumbuh, bukan pada pH di dalam sel. Hal ini penting karena pH internal harus tetap mendekati netral agar makromolekul seperti DNA dan RNA tidak rusak. DNA sangat rentan terhadap kondisi asam, sedangkan RNA mudah rusak dalam kondisi basa. Oleh karena itu, sel harus menjaga kestabilan pH internal agar kedua molekul penting ini tetap berfungsi dengan baik. Meski demikian, penelitian menunjukkan bahwa beberapa mikroorganisme ekstrem, seperti asidofil dan alkalifil kuat, memiliki pH sitoplasma yang dapat menyimpang dari netralitas. Nilai pH internal mereka tercatat bisa serendah di bawah 5 hingga setinggi di atas 9. Jika angka ini bukan batas mutlak, maka setidaknya sangat mendekati

batas kemampuan sel dalam mempertahankan kestabilan pH internal (Madigan dkk., 2021).

Konsentrasi Gas Oksigen

Tingkat oksigen (O_2) di lingkungan sangat bervariasi, sehingga menciptakan beragam habitat bagi mikroorganisme. Di atmosfer, oksigen menyumbang sekitar 20% dari udara. Namun, di bawah permukaan tanah atau di rawa-rawa, oksigen bisa sangat terbatas, bahkan hampir tidak ada. Tubuh manusia sendiri menyediakan berbagai kondisi: kulit yang terpapar udara kaya oksigen, sementara lambung dan usus justru bersifat anaerob, artinya hampir tidak mengandung oksigen.

Oksigen bukan hanya gas penting untuk respirasi, tetapi juga merupakan agen pengoksidasi kuat yang dapat hadir dalam bentuk beracun. Peran oksigen bagi pertumbuhan mikroorganisme sangat bergantung pada cara mereka memperoleh dan menyimpan energi. Bagi sebagian mikroba, oksigen adalah nutrisi esensial. Tanpa oksigen mereka tidak bisa melakukan metabolisme maupun tumbuh. Sebaliknya, ada mikroorganisme lain yang justru tidak mampu hidup dalam keberadaan oksigen, bahkan bisa mati karenanya (Madigan dkk., 2021; Nester, 2009).

Mikroorganisme memiliki kebutuhan oksigen yang berbeda-beda, sehingga dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori. Kelompok pertama adalah **aerob obligat**, yaitu organisme yang mutlak membutuhkan oksigen untuk hidup. Mereka menggunakan oksigen sebagai penerima elektron terakhir dalam respirasi aerob, sehingga menghasilkan energi dalam jumlah besar. Contoh yang termasuk kelompok ini adalah spesies *Micrococcus* yang banyak ditemukan di lingkungan.

Berbeda dengan itu, ada **anaerob obligat** yang justru tidak dapat bertahan bila ada oksigen. Bagi mereka, oksigen bersifat toksik dan dapat membunuh sel. Energi diperoleh melalui fermentasi atau respirasi anaerob. Contoh yang terkenal adalah *Clostridium botulinum*, penyebab penyakit botulisme, serta *Bacteroides* yang menjadi penghuni utama usus besar manusia. Diperkirakan hampir separuh biomassa sitoplasma di bumi berasal dari bakteri anaerob.

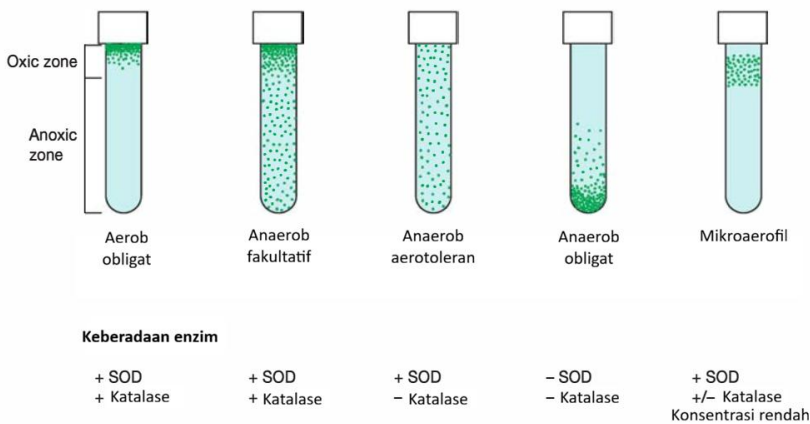
Selanjutnya, ada kelompok **anaerob fakultatif**. Mikroba ini fleksibel: mereka dapat tumbuh tanpa oksigen, tetapi lebih cepat

berkembang bila oksigen tersedia karena respirasi aerob menghasilkan energi (ATP) lebih banyak. *Escherichia coli*, penghuni umum usus besar, adalah contoh klasik dari kelompok ini.

Ada pula **mikroaerofil**, yang hanya membutuhkan oksigen dalam kadar rendah, sekitar 2–10%. Konsentrasi oksigen normal justru merusak mereka. Contoh mikroba ini adalah *Helicobacter pylori*, penyebab tukak lambung dan duodenum.

Terakhir, terdapat **anaerob aerotoleran**. Mikroba ini tidak menggunakan oksigen untuk metabolisme, tetapi tetap dapat bertahan hidup bila oksigen ada. Mereka bergantung pada fermentasi sebagai sumber energi. *Streptococcus pyogenes*, penyebab radang tenggorokan (strep throat), termasuk dalam kelompok ini.

Meskipun oksigen (O_2) sendiri tidak bersifat beracun, keberadaannya dapat memicu terbentuknya senyawa turunan yang sangat berbahaya bagi sel. Selama proses respirasi, O_2 dapat direduksi menjadi berbagai produk reaktif seperti radikal **superoksida (O_2^-)**, **hidrogen peroksida (H_2O_2)**, dan radikal **hidroksil ($OH^\cdot$)**. Senyawa-senyawa ini merupakan oksidator kuat yang mampu merusak makromolekul penting, termasuk DNA, protein, dan lipid. Jika tidak dinetralkan, mereka dapat menyebabkan kerusakan fatal pada sel. Untuk bertahan hidup di lingkungan beroksigen, banyak mikroorganisme memiliki **enzim pelindung**. Enzim **superoksida dismutase (SOD)** mengubah radikal superoksida menjadi hidrogen peroksida, sementara **katalase** dan **peroksidase** memecah hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen yang tidak berbahaya. Kombinasi enzim ini berfungsi sebagai sistem detoksifikasi yang menjaga sel dari ancaman oksigen reaktif. Namun, **anaerob obligat** biasanya tidak memiliki enzim-enzim tersebut, atau hanya dalam jumlah sangat sedikit. Akibatnya, mereka tidak mampu menetralkan senyawa beracun hasil reaksi oksigen dan akan mati bila terpapar O_2 . Sebaliknya, aerob obligat dan anaerob fakultatif umumnya memiliki sistem enzim lengkap sehingga dapat bertahan dan memanfaatkan oksigen untuk menghasilkan energi (Madigan dkk., 2021; Willey dkk., 2014).



Gambar 12. Hubungan antara kebutuhan oksigen dan pertumbuhan bakteri (Willey dkk., 2014)

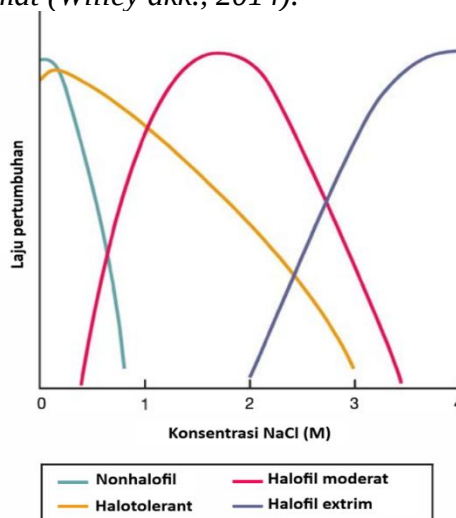
Hubungan antara kemampuan menghadapi toksisitas oksigen dengan pola pertumbuhan mikroorganisme dapat diamati dalam tabung reaksi kultur thioglycolate broth. Aerob obligat tumbuh di bagian atas tabung, tempat oksigen melimpah (oxic zone). Anaerob obligat hanya tumbuh di dasar tabung, jauh dari oksigen (Anoxic zone). Anaerob fakultatif tumbuh di seluruh tabung, tetapi lebih padat di bagian atas karena respirasi aerob menghasilkan energi lebih banyak. Mikroaerofil tumbuh sedikit di bawah permukaan, pada zona dengan kadar oksigen rendah, sedangkan anaerob aerotoleran tersebar merata di seluruh tabung karena mereka tidak menggunakan oksigen tetapi juga tidak terganggu oleh keberadaannya (Gambar 12).

Konsentrasi zat terlarut dan aktivitas air

Pertumbuhan bakteri tidak hanya dipengaruhi oleh faktor pH dan oksigen, tetapi juga oleh **konsentrasi zat terlarut (solute)** dan **aktivitas air (water activity)** di lingkungannya. Aktivitas air menggambarkan ketersediaan molekul air bebas yang dapat digunakan mikroorganisme untuk proses metabolisme. Semakin tinggi kadar zat terlarut seperti garam atau gula dalam suatu medium, semakin rendah aktivitas airnya, sehingga air bebas yang bisa dimanfaatkan bakteri menjadi terbatas.

Bakteri membutuhkan air untuk mempertahankan fungsi sel, termasuk transportasi nutrisi, reaksi enzimatik, dan stabilitas membran. Jika aktivitas air terlalu rendah, sel akan mengalami tekanan osmotik yang tinggi, menyebabkan dehidrasi dan gangguan metabolisme. Karena itu, hanya mikroorganisme tertentu yang mampu beradaptasi dengan kondisi ekstrem ini. Misalnya, **halofil** dapat tumbuh di lingkungan dengan kadar garam tinggi, sedangkan **osmofil** mampu bertahan di lingkungan kaya gula.

Halofil adalah mikroorganisme yang membutuhkan keberadaan garam NaCl dengan konsentrasi di atas 0,2 M. Ada halofil ekstrem yang bahkan hanya dapat hidup pada kondisi sangat asin, dengan konsentrasi garam antara 2 M hingga mendekati jenuh (sekitar 6,2 M). Misalnya genus *Archaea Halobacterium*, yang ditemukan di habitat ekstrem seperti Laut Mati di Timur Tengah dan Great Salt Lake di Utah, US (Gambar 13). Untuk bertahan di lingkungan hipertonik, halofil menggunakan strategi *compatible solutes*, yaitu molekul yang dapat disimpan dalam konsentrasi tinggi di dalam sel tanpa mengganggu metabolisme. Ada dua pendekatan utama: pertama, mempertahankan kadar tinggi solut anorganik seperti kalium klorida (KCl) dalam sitoplasma; kedua, meningkatkan konsentrasi internal dengan solut organik seperti betaine, kolin, prolin, atau glutamat (Willey dkk., 2014).



Gambar 13. Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap pertumbuhan mikroba (Willey dkk., 2014)

Selain bakteri, organisme lain seperti jamur dan protista fotosintetik juga memanfaatkan compatible solutes, misalnya sukrosa dan poliol (arabitol, gliserol, manitol), untuk menjaga tekanan osmotik internal tetap lebih tinggi daripada lingkungannya. Dengan cara ini, membran plasma selalu menempel rapat pada dinding sel, sehingga struktur sel tetap stabil (Antón, 2011; Dijksterhuis & de Vries, 2006).

Tekanan hidrostatis

Air di laut dan danau memberikan tekanan hidrostatis yang meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Tekanan ini berlipat ganda setiap 10 meter, sehingga pada kedalaman 50 meter tekanannya bisa mencapai 32 kali tekanan atmosfer. Di palung laut dalam yang kedalamannya lebih dari 7.000 meter, tekanan bisa mencapai lebih dari 1.000 atm. Hanya mikroorganisme tertentu yang mampu bertahan di kondisi ekstrem ini, yaitu **barofil** atau **piezofil**. Barofil adalah mikroba yang tidak hanya mampu menoleransi tekanan tinggi, tetapi justru membutuhkan tekanan agar enzim dan membran mereka tetap berfungsi. Tanpa tekanan, struktur tiga dimensi enzim akan rusak dan sel akan mati. Ada barotoleran yang masih bisa hidup meski tekanan tinggi merugikan mereka, tetapi piezofil sejati hanya tumbuh optimal pada tekanan jauh di atas 1 atm. Misalnya, mikroba dari Palung Mariana hanya dapat tumbuh pada tekanan sekitar 400–500 atm. Adaptasi penting piezofil adalah perubahan komposisi lipid membran. Mereka meningkatkan jumlah asam lemak tak jenuh atau memperpendek rantai asam lemak agar membran tetap cair dan fleksibel di bawah tekanan ekstrem. Dengan cara ini, fungsi membran dan enzim tetap terjaga (Black, 2012; Cowan, 2012; Willey dkk., 2014).

H. INTERAKSI ANTAR MIKROORGANISME YANG MEMENGARUHI PERTUMBUHAN (QUORUM SENSING DAN BIOFILM)

Apakah bakteri bersel tunggal yang tidak memiliki sistem saraf, penglihatan, atau pendengaran bisa berkomunikasi? Ternyata bisa. Sejak tahun 1994, istilah quorum sensing digunakan untuk menjelaskan kemampuan bakteri berkomunikasi melalui molekul sinyal. Satu sel bakteri tidak mampu menghasilkan cahaya

bioluminesensi yang terlihat, tetapi jika jumlahnya cukup banyak, mereka bersama-sama menyalakan gen tertentu sehingga cahaya muncul. Dengan cara ini, energi tidak terbuang sia-sia.

Quorum sensing tidak hanya mengatur cahaya, tetapi juga produksi toksin, enzim pencernaan, dan molekul perekat. Hasilnya adalah terbentuknya biofilm, yaitu komunitas mikroba yang melekat pada permukaan dan terbungkus matriks lendir (EPS). Biofilm bisa ditemukan di plak gigi, lapisan licin di batu sungai, pipa air, kateter medis, bahkan tirai kamar mandi. Biofilm bertindak seperti “superorganisme,” di mana tiap lapisan sel memiliki kondisi berbeda—ada yang mendapat lebih banyak oksigen, nutrisi, atau perlindungan.

Biofilm juga menjadi masalah medis serius. Sel di dalam biofilm sering kali kebal terhadap antibiotik, bukan hanya karena terlindung oleh matriks EPS, tetapi juga karena metabolisme mereka berubah. Ada sel “persister” yang tetap hidup setelah terapi dan kemudian menghidupkan kembali biofilm. Karena itu, infeksi biofilm sulit diatasi dengan antibiotik, dan terapi alternatif seperti bakteriofag (virus pemakan bakteri) mulai digunakan.

Selain kerja sama, mikroba juga menunjukkan persaingan. Mereka bisa menghasilkan senyawa beracun untuk menghambat koloni lain, bahkan koloni “saudara” dari spesies yang sama. Fenomena ini disebut “sibling warfare.” Bentuk lain adalah antibiosis, yaitu produksi antibiotik alami oleh bakteri atau jamur untuk mengalahkan pesaing.

Biofilm bukan fenomena baru; bukti keberadaannya ditemukan dalam fosil berusia 3,4 miliar tahun. Biofilm dapat terbentuk di hampir semua permukaan, mulai dari batu di sungai hingga implan medis. Matriks EPS yang dihasilkan berisi polisakarida, protein, glikolipid, dan DNA, yang membuat biofilm semakin stabil. DNA dalam biofilm bahkan bisa berpindah antar sel, memungkinkan terjadinya transfer genetik.

I. RANGKUMAN

1. Konsep Dasar Pertumbuhan Mikroorganisme

Tidak seperti sel eukariot, kebanyakan bakteri dan arkea hanya memiliki satu set kromosom (*haploid*). Cara utama mereka

berkembang biak adalah melalui pembelahan biner, sebuah proses sederhana namun efektif.

Tahapan pembelahan biner: (1) Sel memanjang sambil menyintesis komponen baru. (2) Kromosom digandakan. (3) DNA hasil duplikasi dipisahkan ke tiap sisi sel. (4) Septum terbentuk di tengah sel. (5) Sel induk terbagi menjadi dua sel anak lengkap.

Selain pembelahan biner, terdapat bentuk reproduksi lain yang menunjukkan keragaman strategi mikroba, yaitu:

Budding (tunas): misalnya pada *Hyphomonas*, sel baru tumbuh dari ujung tangkai kecil (*prostheca*).

Multiple fission: digunakan oleh cyanobacteria, menghasilkan sel anak bernama baeosit yang awalnya tertahan dalam dinding sel induk sebelum dilepaskan.

Fragmentasi: terjadi pada *Streptomyces*, membentuk filamen panjang berinti banyak (*multinucleoid*) yang kemudian pecah menjadi spora *uninukleoid*, mirip dengan sporulasi jamur berfilamen.

2. Pertumbuhan Populasi dan Dinamika Sel

Pertumbuhan populasi mikroba terjadi melalui pembelahan biner, di mana jumlah sel selalu berlipat ganda setiap kali terjadi satu siklus pembelahan. Waktu yang dibutuhkan untuk satu siklus ini disebut waktu generasi.

Waktu generasi merupakan periode dari satu pembelahan ke pembelahan berikutnya.

Pertumbuhan mikroorganisme bersifat eksponensial, yang berarti jumlah sel bertambah dua kali lipat setiap generasi.

Rumus pertumbuhan:

$$N_t = N_0 \times 2^n$$

di mana N_t = jumlah sel akhir, N_0 = jumlah sel awal, dan n = jumlah generasi.

Contoh:

1 sel $\rightarrow$ 3 kali pembelahan $\rightarrow$ 8 sel.

10 sel $\rightarrow$ 10 kali pembelahan $\rightarrow$ 10.240 sel.

Kecepatan Pertumbuhan

Bakteri memiliki variasi waktu generasi yang sangat beragam. Bisa sangat cepat, sekitar 10–12 menit (beberapa bakteri tertentu), atau sangat lambat, bisa berhari-hari hingga berbulan-

bulan (contoh: *Mycobacterium leprae* dengan waktu generasi 10–30 hari). Beberapa patogen umum juga memiliki waktu generasi yang relatif singkat, misalnya *Salmonella enteritidis* dan *Staphylococcus aureus* (20–30 menit).

3. Kurva Pertumbuhan Mikroorganisme

Batch culture (sistem tertutup): nutrisi tidak diperbarui, limbah menumpuk → pertumbuhan terbatas.

Tahapan Kurva Pertumbuhan

Fase Lag (adaptasi): Sel belum bertambah banyak, tetapi aktif secara metabolik. Sintesis enzim, ribosom, asam nukleat, dan ATP. Durasi bergantung pada kondisi media dan asal kultur.

Fase Log/Ekspansional: Sel membelah dengan interval tetap (waktu generasi). Pertumbuhan eksponensial → populasi berlipat ganda secara konsisten. Produksi metabolit primer (asam amino, nukleotida, energi ATP). Pada log akhir: muncul metabolit sekunder (misalnya antibiotik).

Fase Stasioner: Jumlah sel baru $\approx$ jumlah sel mati → populasi stabil. Penyebab: nutrisi menipis, limbah menumpuk, oksigen berkurang, pH berubah. Sel beradaptasi, menghasilkan metabolit sekunder, dan memanfaatkan isi sel mati.

Fase Penurunan (kematian): Laju kematian > laju pembelahan. Populasi menurun eksponensial, meski lebih lambat dari fase log. Sel mengalami involusi (bentuk abnormal), spora lebih tahan dibanding sel vegetatif. Durasi bervariasi, bisa berlangsung lama dengan sebagian kecil sel bertahan.

Kultur Kontinu

Chemostat: Laju masuk medium steril = laju keluar medium kultur. Pertumbuhan dikendalikan oleh nutrisi pembatas. Cocok untuk studi ekologi mikroba dan simulasi lingkungan alami.

Turbidostat: Menggunakan sensor kekeruhan untuk menjaga kepadatan sel konstan. Nutrien berlimpah, tidak ada faktor pembatas. Cocok untuk produksi biomassa tinggi dan fermentasi industri.

4. Pengukuran Pertumbuhan Mikroorganisme

Metode langsung: menghitung sel atau koloni secara nyata.

Metode tidak langsung: menggunakan indikator pertumbuhan (kekeruhan, biomassa, produk metabolit).

Penting untuk penelitian, industri, dan monitoring kultur mikroba.

Metode Langsung – *Total Count*

Counting chamber (Petroff-Hausser, hemocytometer): praktis, murah, cepat; menghitung semua sel (hidup/mati).

Flow cytometer: menggunakan laser, lebih banyak dipakai di bidang medis.

Coulter counter: mendeteksi perubahan resistansi listrik saat sel melewati lubang kecil; cepat, otomatis, tetapi tidak membedakan sel hidup/mati.

Metode Langsung – *Viable Count*

Plate count (CFU): menghitung sel hidup yang membentuk koloni.

Spread plate: sampel diencerkan, ditetaskan di permukaan agar, lalu diratakan.

Pour plate: sampel dicampur dengan agar cair, koloni tumbuh di permukaan dan dalam medium.

Valid bila jumlah koloni 30–300 per plate.

Filtrasi membran: menyaring sampel encer (misalnya air), lalu menumbuhkan koloni di atas filter.

Most Probable Number (MPN): metode statistik dengan pengenceran bertingkat; digunakan untuk sampel dengan populasi sangat rendah, misalnya uji kualitas air (indikator koliform).

Metode Tidak Langsung

Turbidimetri (OD600): mengukur kekeruhan kultur dengan spektrofotometer; cepat, real-time, tetapi tidak membedakan sel hidup/mati.

Biomassa: menimbang berat basah atau kering sel hasil sentrifugasi; berguna untuk mikroba berfilamen.

Produk metabolit: mendeteksi asam (pH), gas (CO₂), atau ATP (uji luciferase); indikator keberadaan sel hidup.

5. Faktor Lingkungan yang Memengaruhi Pertumbuhan Mikroorganisme

Pertumbuhan mikroba dipengaruhi oleh suhu, pH, oksigen, konsentrasi zat terlarut, aktivitas air, tekanan hidrostatik, radiasi, dan interaksi mikroba lain.

Adaptasi dilakukan melalui penyesuaian biokimia/genetik agar enzim tetap berfungsi. Ekstremofil (terutama *Archaea*) mampu hidup di kondisi ekstrem yang biasanya mematikan bagi organisme lain.

Suhu

Mikroba memiliki tiga suhu kardinal: minimum, optimum, maksimum. Klasifikasi berdasarkan suhu optimum:

Psikrofil: optimum 15°C, hidup di kutub/gletser.

Psikrotrof: tumbuh di suhu rendah, optimum 15–30°C, penyebab kerusakan makanan dingin.

Mesofil: optimum 20–45°C, termasuk hampir semua patogen manusia.

Termofil: optimum 55–65°C, hidup di kompos/sumber panas.

Hipertermofil: optimum 85–113°C, hidup di laut dalam vulkanik.

Bentuk adaptasi berupa enzim tahan panas/dingin, membran dengan lipid khusus, protein antifreeze, dan *compatible solutes*.

Tingkat Keasaman (pH)

Mikroba memiliki rentang pH pertumbuhan $\pm 2-3$ satuan dengan titik optimum. Klasifikasi:

Asidofil: optimum $< 5,5$ (contoh: *Acidithiobacillus ferrooxidans*).

Neutrofil: optimum 5,4–8,0, termasuk sebagian besar patogen manusia.

Alkalifil: optimum $> 8,5$ hingga 11,5 (contoh: *Vibrio cholerae*).

Bentuk adaptasi: menjaga pH internal tetap netral, menghasilkan enzim aktif pada kondisi ekstrem (misalnya protease/lipase untuk industri deterjen).

Konsentrasi Oksigen

Aerob obligat: butuh O_2 untuk respirasi (contoh: *Micrococcus*).

Anaerob obligat: mati bila ada O_2 (contoh: *Clostridium botulinum*).

Anaerob fakultatif: tumbuh tanpa O_2 , tetapi lebih cepat dengan O_2 (contoh: *E. coli*).

Mikroaerofil: butuh O_2 rendah (2–10%), contoh *Helicobacter pylori*.

Anaerob aerotoleran: tidak gunakan O_2 , tetapi tahan keberadaannya (contoh: *Streptococcus pyogenes*).

Adaptasi: enzim pelindung (SOD, katalase, peroksidase) untuk menetralkan radikal oksigen beracun.

Konsentrasi Zat Terlarut & Aktivitas Air

Aktivitas air (aw) = ketersediaan air bebas untuk metabolisme.

Rendahnya aw → tekanan osmotik tinggi → dehidrasi sel.

Mikroba adaptif:

Halofil: butuh NaCl $>0,2$ M; ekstrem halofil 2–6,2 M (contoh: *Halobacterium*).

Osmofil: tumbuh di lingkungan kaya gula.

Strategi: penggunaan *compatible solutes* (KCl, betaine, prolin, glutamat, sukrosa, poliol) untuk menjaga tekanan osmotik internal.

Tekanan Hidrostatik

Tekanan meningkat seiring kedalaman air ($2\times$ setiap 10 m). Di palung laut dalam (>7.000 m), tekanan >1.000 atm.

Mikroba adaptif:

Barofil/piezofil: membutuhkan tekanan tinggi agar enzim/membran berfungsi.

Barotoleran: mampu hidup di tekanan tinggi meski tidak optimal.

Adaptasi: perubahan lipid membran (lebih banyak asam lemak tak jenuh, rantai lebih pendek) agar tetap cair dan fleksibel.

6. Interaksi antar Mikroorganisme yang Memengaruhi Pertumbuhan (*Quorum Sensing* dan *Biofilm*)

Quorum sensing merupakan mekanisme komunikasi mikroba menggunakan molekul sinyal (*inducer*). Gen tertentu diaktifkan hanya bila konsentrasi sinyal cukup tinggi (jumlah sel mencapai *quorum*).

Fungsi utama: Mengatur bioluminesensi (cahaya), mengontrol produksi toksin, enzim pencernaan, dan molekul perekat. Efisiensi: mencegah pemborosan energi dengan hanya menyalakan gen bila populasi cukup besar.

Biofilm = komunitas mikroba melekat pada permukaan, dilindungi matriks lendir (EPS: polisakarida, protein, glikolipid, DNA). Contoh: plak gigi, lapisan licin di batu sungai, pipa air,

kateter medis, tirai kamar mandi. Biofilm bertindak seperti superorganisme: tiap lapisan memiliki kondisi berbeda (oksigen, nutrisi, perlindungan).

Sel dalam biofilm lebih resisten terhadap antibiotik. Adanya sel *persister* yang bertahan dan menghidupkan kembali biofilm setelah terapi. Alternatif terapi: bakteriofag (virus pemakan bakteri).

Biofilm memfasilitasi transfer genetik antar sel, meningkatkan adaptasi dan resistensi.

Persaingan dan Antagonisme

Mikroba tidak hanya bekerja sama, tetapi juga bersaing. *Sibling warfare*: koloni “saudara” dari spesies yang sama saling menghambat pertumbuhan. Antibiosis: produksi antibiotik alami oleh bakteri/jamur untuk mengalahkan pesaing.

J. EVALUASI / SOAL LATIHAN

1. Proses utama reproduksi bakteri adalah...
 - A. Fragmentasi
 - B. Pembelahan biner
 - C. Budding
 - D. Multiple fission
 - E. Sporulasi
2. Waktu yang dibutuhkan satu sel bakteri untuk membelah menjadi dua disebut...
 - A. Waktu hidup
 - B. Waktu generasi
 - C. Waktu stasioner
 - D. Waktu lag
 - E. Waktu doubling
3. Fase pertumbuhan di mana sel beradaptasi dengan medium baru disebut...
 - A. Fase log
 - B. Fase lag
 - C. Fase stasioner
 - D. Fase kematian

E. Fase sporulasi

4. Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada suhu tubuh manusia (37°C) adalah...
 - A. Psikrofil
 - B. Mesofil
 - C. Termofil
 - D. Hipertermofil
 - E. Psikrotrof
5. Mikroorganisme yang membutuhkan oksigen untuk hidup disebut...
 - A. Anaerob obligat
 - B. Aerob obligat
 - C. Anaerob fakultatif
 - D. Mikroaerofil
 - E. Aerotoleran
6. Biofilm tersusun atas matriks lendir yang disebut...
 - A. EPS (Extracellular Polymeric Substances)
 - B. ATP
 - C. DNA bebas
 - D. Lipid membran
 - E. Protein ribosomal
7. Metode penghitungan mikroba dengan menghitung koloni pada agar disebut...
 - A. Total count
 - B. Plate count
 - C. Flow cytometry
 - D. Coulter counter
 - E. Turbidimetri
8. Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada pH netral disebut...
 - A. Asidofil
 - B. Neutrofil
 - C. Alkalifil
 - D. Halofil

- E. Osmofil
9. Mikroba yang mampu hidup di lingkungan dengan kadar garam tinggi disebut...
- A. Osmofil
 - B. Halofil
 - C. Psikrofil
 - D. Termofil
 - E. Mesofil
10. Rumus pertumbuhan eksponensial bakteri adalah...
- A. $N_t = N_0 \times n$
 - B. $N_t = N_0 \times 2^n$
 - C. $N_t = N_0 \div n$
 - D. $N_t = N_0 \times \log n$
 - E. $N_t = N_0 \times e^n$
11. Pada fase log, bakteri menghasilkan metabolit primer. Contoh metabolit primer adalah...
- A. Antibiotik
 - B. Asam amino
 - C. Pigmen sekunder
 - D. Toksin
 - E. Enzim perekat
12. Fase pertumbuhan di mana jumlah sel baru sama dengan jumlah sel mati adalah...
- A. Lag
 - B. Log
 - C. Stasioner
 - D. Kematian
 - E. Sporulasi
13. Metode MPN (*Most Probable Number*) digunakan terutama untuk...
- A. Menghitung biomassa jamur
 - B. Mengukur kekeruhan kultur
 - C. Mengestimasi mikroba dalam sampel encer
 - D. Menghitung jumlah spora

E. Mengukur metabolit sekunder

14. Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada $\text{pH} < 5,5$ disebut...

- A. Neutrofil
- B. Asidofil
- C. Alkalifil
- D. Halofil
- E. Psikrofil

15. Mikroba yang dapat tumbuh tanpa oksigen tetapi lebih cepat dengan oksigen adalah...

- A. Aerob obligat
- B. Anaerob obligat
- C. Anaerob fakultatif
- D. Mikroaerofil
- E. Aerotoleran

16. Compatible solutes berfungsi untuk...

- A. Menurunkan pH internal
- B. Menjaga tekanan osmotik sel
- C. Menghasilkan energi ATP
- D. Menghambat enzim beracun
- E. Mengurangi radiasi UV

17. Mikroba dari Palung Mariana yang tumbuh optimal pada tekanan 400–500 atm disebut...

- A. Halofil
- B. Osmofil
- C. Barotoleran
- D. Piezofil
- E. Termofil

18. Biofilm sulit diatasi dengan antibiotik karena...

- A. Sel mati melindungi sel hidup
- B. EPS menghambat penetrasi obat dan metabolisme sel berubah
- C. Antibiotik tidak larut dalam air
- D. Biofilm tidak mengandung DNA
- E. Biofilm hanya terdiri dari sel mati

19. Mikroorganisme yang menghasilkan enzim protease dan lipase aktif pada kondisi basa adalah...
- A. Asidofil
 - B. Neutrofil
 - C. Alkalifil
 - D. Halofil
 - E. Termofil
20. Flow cytometry digunakan untuk...
- A. Mengukur biomassa jamur
 - B. Menghitung sel dengan laser
 - C. Mengukur kekeruhan kultur
 - D. Menghitung koloni pada agar
 - E. Mengukur metabolit sekunder
21. Pada fase log akhir, bakteri mulai menghasilkan metabolit sekunder. Contoh metabolit sekunder adalah...
- A. ATP
 - B. Asam amino
 - C. Antibiotik
 - D. Nukleotida
 - E. Glukosa
22. Mikroba yang tumbuh optimal pada suhu 55–65°C adalah...
- A. Psikrofil
 - B. Mesofil
 - C. Termofil
 - D. Hipertermofil
 - E. Psikrotrof
23. Mikroba yang tumbuh optimal pada pH 9–11 adalah...
- A. Asidofil
 - B. Neutrofil
 - C. Alkalifil
 - D. Halofil
 - E. Osmofil

24. Coulter counter menghitung sel dengan cara...
- A. Mengukur kekeruhan
 - B. Menghitung koloni
 - C. Mendeteksi perubahan resistansi listrik
 - D. Mengukur biomassa kering
 - E. Mengukur pH medium
25. Biofilm dapat ditemukan pada...
- A. Plak gigi
 - B. Batu sungai
 - C. Kateter medis
 - D. Pipa air
 - E. Semua jawaban benar
26. Adaptasi enzim mikroba hipertermofil agar tetap stabil pada suhu tinggi adalah...
- A. Memiliki banyak ikatan hidrogen dan interior hidrofobik teratur
 - B. Mengandung lipid tak jenuh dalam membran
 - C. Menghasilkan compatible solutes
 - D. Menggunakan protein antifreeze
 - E. Mengurangi jumlah prolin dalam polipeptida
27. Mikroba alkalifil menjaga pH internal tetap netral dengan cara...
- A. Memompa proton keluar
 - B. Menukar ion Na^+ dengan H^+
 - C. Menghasilkan asam laktat
 - D. Mengurangi permeabilitas membran
 - E. Mengikat ion Ca^{2+}
28. Perbedaan utama antara chemostat dan turbidostat adalah...
- A. Chemostat menggunakan sensor kekeruhan, turbidostat nutrisi terbatas
 - B. Chemostat nutrisi terbatas dengan dilution rate konstan, turbidostat nutrisi berlebih dengan dilution rate bervariasi
 - C. Chemostat untuk produksi biomassa tinggi, turbidostat untuk ekologi mikroba

- D. Chemostat tidak membuang limbah, turbidostat membuang limbah
 - E. Chemostat menggunakan laser, turbidostat menggunakan resistansi listrik
29. Sel “persister” dalam biofilm berperan penting karena...
- A. Mereka menghasilkan antibiotik alami
 - B. Mereka tetap hidup setelah terapi antibiotik dan menghidupkan kembali biofilm
 - C. Mereka mengurangi penetrasi oksigen
 - D. Mereka meningkatkan kekeruhan kultur
 - E. Mereka menghasilkan compatible solutes
30. Mikroba piezofil beradaptasi terhadap tekanan hidrostatik tinggi dengan cara...
- A. Memperbanyak ikatan hidrogen pada DNA
 - B. Mengurangi jumlah lipid jenuh dalam membran
 - C. Meningkatkan jumlah asam lemak tak jenuh atau memperpendek rantai asam lemak pada membran
 - D. Menghasilkan protein antifreeze untuk menurunkan titik beku sitoplasma
 - E. Mengurangi konsentrasi compatible solutes dalam sitoplasma

BAB X

KERAGAMAN

MIKROORGANISME

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Menerapkan kriteria taksonomi numerik dan filogenetik untuk menentukan hubungan kekerabatan isolat bakteri lokal Indonesia berdasarkan data analisis sekuensing gen 16S rRNA.*
- 2. Memilih jenis bakteri ekstremofil yang tepat untuk mengimplementasikan proses bioremediasi tanah yang tercemar logam berat di kawasan bekas pertambangan komersial.*
- 3. Menggunakan data karakteristik struktural dan genomik virus untuk mengklasifikasikan jenis patogen yang menginfeksi komoditas pertanian hortikultura lokal.*
- 4. Mendemonstrasikan teknik identifikasi morfologi dan fisiologi untuk membedakan kelompok jamur mikroskopis dan protozoa patogen dalam sampel air sungai yang tercemar.*
- 5. Mengimplementasikan konsep keragaman metabolik mikroorganisme lokal dalam menyusun formula konsorsium starter mikroba untuk pembuatan produk fermentasi pangan tradisional Indonesia.*

B. PENDAHULUAN

Indonesia dikaruniai kekayaan megabiodiversitas yang luar biasa, namun sebagian besar potensi mikroorganisme lokalnya masih berada dalam status "dark matter"—belum teridentifikasi dan belum tereksplorasi secara optimal. Urgensi mempelajari keragaman mikroorganisme bukan sekadar inventarisasi akademis untuk menghafal nama spesies, melainkan sebuah kebutuhan mendesak untuk menyelesaikan krisis pangan, energi, dan kesehatan nasional. Sebagai contoh, eksplorasi bakteri termofil ekstrem di sumber air

panas kawah sulfur Gunung Pancar, Jawa Barat, berhasil mengisolasi bakteri penghasil enzim amilase termostabil yang kini digunakan dalam industri pati nasional. Implikasinya, pemahaman yang mendalam mengenai keragaman fungsional dan taksonomi mikroba menjadi fondasi utama bagi mahasiswa mikrobiologi untuk menerjemahkan keanekaragaman hayati menjadi inovasi bioteknologi yang bernilai ekonomi tinggi serta ramah lingkungan.

Bagi seorang calon mikrobiolog, kegagalan dalam memahami keragaman mikroorganisme dapat berakibat fatal pada aplikasi industri dan penanganan penyakit di lapangan. Ketika terjadi wabah penyakit layu fusarium pada tanaman pisang di Lampung, pendekatan monokultur agen pengendali hayati sering kali menemui kegagalan karena kurangnya pemahaman terhadap variabilitas genetik jamur *Fusarium oxysporum* dan interaksinya dengan protozoa tanah setempat. Dengan menguasai keragaman morfologi, fisiologi, dan filogeni, mahasiswa dapat merancang konsorsium mikroba antagonis yang lebih stabil dan adaptif terhadap kondisi tanah lokal. Pemahaman komprehensif ini mengubah paradigma belajar dari sekadar menghafal takson menjadi kemampuan taktis untuk memanipulasi dan memanfaatkan mikroba secara presisi guna memecahkan masalah riil di masyarakat.

Untuk membangun kompetensi aplikatif tersebut, bab ini akan mengupas tuntas lima pilar utama keragaman mikroorganisme. Pembahasan diawali dengan Dasar Klasifikasi Mikroorganisme yang memadukan metode fenotipik tradisional dengan kemajuan filogeni molekuler. Selanjutnya, kita akan mempelajari Keragaman Bakteri dengan fokus pada variasi metabolik dan adaptasi lingkungan ekstrem, disusul dengan eksplorasi struktur serta sistem replikasi dalam Keragaman Virus. Bab ini juga menelaah Keragaman Jamur dan Protozoa sebagai representasi mikroba eukariotik yang kompleks dan dinamis. Akhirnya, seluruh konsep tersebut akan diintegrasikan dalam Peranan Keragaman Mikroorganisme dalam Kehidupan guna membekali mahasiswa dengan kemampuan merancang solusi bioteknologis berbasis pemanfaatan mikroba lokal secara berkelanjutan.

C. DASAR KLASIFIKASI MIKROORGANISME

Klasifikasi mikroorganisme merupakan pilar utama dalam memahami kompleksitas kehidupan mikroskopis yang tidak kasat mata. Sebagaimana telah disinggung pada Bab 1 terdahulu, klasifikasi sistematis sangat penting untuk membedakan patogen dari mikroba non-patogen. Dalam mikrobiologi modern, klasifikasi tidak lagi hanya bersandar pada kesamaan morfologi luar atau pewarnaan Gram, melainkan telah bergeser ke arah integrasi metode fenotipik kuantitatif dan analisis filogenetik berbasis sekuensing materi genetik. Karakterisasi fenotipik yang sistematis memungkinkan para peneliti mengevaluasi sifat agronomi atau fisiologis dari isolat tertentu secara terstruktur (Sa'adah, 2022), yang laporannya harus disajikan dengan ejaan bahasa Indonesia yang baku dan tepat (Lestari, 2021). Namun, untuk menetapkan hubungan kekerabatan yang presisi pada tingkat spesies dan subspecies, mahasiswa dituntut mampu menerapkan kriteria taksonomi numerik dan analisis molekuler secara simultan melalui pendekatan pembelajaran berbasis pemecahan masalah (Adi, 2021).

Aplikasi praktis dari penggabungan metode ini sangat krusial dalam mengidentifikasi isolat lokal. Sebagai contoh, ketika mengidentifikasi isolat bakteri penghasil enzim industri dari kawasan tanah vulkanik Dieng, Jawa Tengah, pengamatan morfologi koloni saja sering kali bias karena banyak spesies berbeda menunjukkan bentuk koloni serupa. Untuk mengatasi bias ini, mahasiswa harus mengisolasi DNA genomik bakteri, mengamplifikasi gen 16S rRNA melalui Polymerase Chain Reaction (PCR), dan melakukan sekuensing DNA. Data sekuen nukleotida yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan algoritma penyelarasan lokal seperti BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) untuk mengukur persentase identitas genetik terhadap database global. Pemanfaatan teknik molekuler ini terbukti efektif dalam memetakan keragaman genetik berbagai komoditas hayati di Indonesia (Rachmawati, 2025).

Untuk mempermudah pemahaman mengenai perbedaan antara metode klasifikasi fenotipik konvensional dengan analisis filogenetik modern, tabel berikut menyajikan parameter-parameter kunci yang digunakan dalam penentuan identitas isolat mikroba lokal.

Tabel 10. Perbandingan Parameter Klasifikasi Isolat Bakteri Lokal

No	Parameter Klasifikasi	Pendekatan Fenotipik (Taksonomi Numerik)	Pendekatan Filogenetik (Molekuler)	Keandalan untuk Isolat Baru
1	Karakter Fisik	Bentuk sel, pewarnaan Gram, motilitas	Struktur sekunder RNA, komposisi basa	Sedang (mudah dipengaruhi lingkungan)
2	Sifat Biokimia	Fermentasi karbohidrat, aktivitas enzim	Sekuens gen penanda (16S rRNA, <i>rpoB</i>)	Tinggi (stabil secara evolusioner)
3	Sifat Fisiologis	Toleransi suhu, pH, salinitas	Profil hibridisasi DNA-DNA genosfer	Sedang (dapat terjadi transfer gen horizontal)
4	Profil Lipid/Protein	Profil asam lemak seluler (FAME)	Sekuensing genom fungsional	Tinggi (presisi untuk identifikasi subspecies)

Tabel 10. di atas menunjukkan bahwa meskipun pendekatan fenotipik memberikan gambaran fungsional yang cepat di lapangan, pendekatan filogenetik molekuler memberikan akurasi mutlak yang tidak terpengaruh oleh variasi kondisi kultur laboratorium.

i CATATAN

Gen 16S rRNA dipilih sebagai penanda filogenetik utama pada bakteri karena memiliki daerah lestari (*conserved region*) yang berfungsi sebagai penempelan primer PCR universal, serta daerah hipervariabel (*hypervariable region*) yang menyimpan informasi perbedaan spesifik antarspesies.

Mahasiswa dapat menggambar pohon filogenetik (*phylogenetic tree*) berdasarkan matriks jarak genetik untuk mengelompokkan isolat lokal ke dalam klade taksonomi yang tepat. Dengan menguasai metode integratif ini, mahasiswa tidak sekadar menghafal klasifikasi, tetapi mampu secara mandiri menentukan

apakah suatu bakteri yang diisolasi dari tanah Indonesia merupakan spesies baru (*novel species*) atau strain unggul yang telah beradaptasi secara spesifik.

D. KERAGAMAN BAKTERI

Bakteri adalah kelompok organisme prokariotik yang mendominasi biosfer dengan keragaman metabolisme dan kemampuan adaptasi ekologis yang luar biasa. Keragaman ini mencakup variasi dari segi kebutuhan oksigen (aerob hingga anaerob obligat), sumber energi (kemolitotrof hingga fotoorganotrof), hingga kemampuan hidup di lingkungan ekstrem yang mematikan bagi organisme lain. Di Indonesia, salah satu tantangan lingkungan terbesar adalah kerusakan lahan akibat aktivitas industri ekstraktif yang tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu, kemampuan memilih jenis bakteri ekstremofil yang tepat menjadi keterampilan taktis yang wajib dikuasai untuk mengimplementasikan proses bioremediasi secara efektif (Evania, 2025).

Asosiasi praktis dari penggunaan bakteri tanah juga erat kaitannya dengan rehabilitasi lahan. Sebagai ilustrasi kasus, wilayah bekas pertambangan timah di Pulau Bangka menghadapi masalah serius berupa pencemaran tanah oleh logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd). Tanah di kawasan tersebut umumnya bersifat masam dan miskin unsur hara. Untuk merehabilitasi lahan tercemar ini, mahasiswa tidak dapat menggunakan bakteri tanah biasa seperti *Escherichia coli* yang sensitif terhadap toksisitas logam berat. Mahasiswa harus memilih dan mengaplikasikan bakteri metallotolerant yang mampu bertahan hidup dan mengikat logam berat melalui mekanisme biosorpsi atau bioakumulasi. Bakteri dari genus *Pseudomonas* atau *Bacillus* yang diisolasi dari lingkungan ekstrem lokal terbukti memiliki ketahanan tinggi dan mampu mengurangi mobilitas logam berat di dalam tanah.

Adaptasi bakteri terhadap polutan tidak hanya terbatas pada logam berat, tetapi juga melingkupi senyawa polimer sintesis yang sulit terurai di alam bebas. Eksplorasi keanekaragaman bakteri di kawasan pesisir Indonesia menunjukkan potensi besar dalam mengatasi sampah plastik mikro. Sebagai contoh konkret, penelitian mengenai komunitas mikroba di kawasan timur Indonesia berhasil

mengisolasi bakteri pendegradasi polietilena di hutan mangrove Ambon (Estiningtyas, 2022). Penemuan ini menegaskan bahwa keragaman bakteri lokal menyimpan potensi bioteknologis yang sangat besar untuk mengatasi degradasi lingkungan pesisir akibat sampah plastik.

DEFINISI

Bioremediasi adalah proses pembersihan pencemaran lingkungan dengan menggunakan agen biologi, khususnya mikroorganisme seperti bakteri dan jamur, untuk mendegradasi, mengubah, atau menyerap senyawa pencemar menjadi bentuk yang tidak beracun.

Dalam merancang sistem bioremediasi di lapangan, mahasiswa harus memperhitungkan faktor abiotik tanah yang memengaruhi aktivitas bakteri tersebut, seperti ketersediaan nutrisi, pH, dan kelembapan. Penggunaan biochar atau pembenah tanah organik sering kali dikombinasikan untuk mendukung kelangsungan hidup konsorsium bakteri yang diaplikasikan, karena biochar mampu memperbaiki sifat fisik tanah sekaligus menyediakan mikrorongga sebagai habitat pelindung bagi bakteri (Hidayat, 2021). Dengan mengintegrasikan pemahaman keragaman fisiologis bakteri dan rekayasa kondisi lingkungan, restorasi ekosistem yang rusak dapat dicapai secara berkelanjutan.

E. KERAGAMAN VIRUS

Meskipun secara struktural sangat sederhana karena tidak memiliki perangkat seluler mandiri, virus menunjukkan keragaman luar biasa dalam hal arsitektur kapsid, selubung lipid, serta organisasi genomik. Sebagaimana telah diuraikan pada Bab 6 mengenai dasar virologi, virus diklasifikasikan ke dalam sistem Baltimore berdasarkan cara mereka mensintesis mRNA dari genomnya yang bervariasi antara DNA atau RNA, beruntai tunggal (single-stranded) atau ganda (double-stranded). Pemahaman mendalam mengenai keragaman genomik dan struktural ini sangat krusial dalam sektor pertanian hortikultura di Indonesia, di mana serangan patogen virus sering kali memicu kegagalan panen skala besar.

⚠ PERHATIAN

Virus tanaman tidak dapat menembus dinding sel tumbuhan secara aktif; mereka sangat bergantung pada kerusakan mekanis atau aktivitas vektor serangga seperti kutu kebul (*Bemisia tabaci*) dan kutu daun (*Aphis gossypii*) untuk menginfeksi sel inang.

Mahasiswa harus mampu menggunakan karakteristik struktural dan genomik virus untuk mengklasifikasikan jenis patogen yang menyerang tanaman budi daya. Salah satu studi kasus yang relevan di Indonesia adalah epidemi penyakit keriting kuning pada tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) di dataran rendah Jawa Tengah dan Yogyakarta. Penyakit ini disebabkan oleh Pepper yellow leaf curl virus (PYLCV), yang merupakan anggota genus *Begomovirus* dari famili *Geminiviridae*. Karakteristik utama virus ini adalah memiliki partikel kembar (geminata) yang tidak berselubung dengan genom berupa DNA utas tunggal melingkar (ssDNA). Penurunan produksi cabai akibat infeksi virus ini sangat memengaruhi stabilitas ekonomi petani hortikultura nasional (Rachmawati, 2025).

Selain tanaman cabai, komoditas hortikultura lain seperti tomat lokal juga menghadapi ancaman serupa dari berbagai infeksi virus tanaman yang membatasi potensi hasil dan kualitas buah (Melyapuri Widarsiono, 2022). Identifikasi jenis virus yang menginfeksi tanaman hortikultura lokal sering kali memerlukan pendekatan diagnostik cepat seperti RT-PCR (Reverse Transcription-Polymerase Chain Reaction) untuk virus bergenom RNA, atau PCR konvensional untuk virus bergenom DNA.

Mahasiswa juga harus memahami keragaman genetik tanaman inang itu sendiri, seperti pada terung asam (*Solanum lasiocarpum*) di Sumatra, yang menunjukkan variasi tingkat kerentanan terhadap patogen virus lokal (Rif'atunidaudina, 2026). Melalui pemahaman taksonomi virus dan interaksinya dengan inang, mahasiswa dapat memformulasikan strategi pengendalian yang tepat, misalnya dengan merancang pestisida nabati pembasmi vektor serangga atau memilih varietas tanaman hortikultura yang memiliki gen resistensi spesifik terhadap genom virus yang mendominasi wilayah tersebut.

F. KERAGAMAN JAMUR DAN PROTOZOA

Mikroorganisme eukariotik diwakili oleh keragaman jamur mikroskopis (mikologi) dan protozoa (protista mirip hewan). Berbeda dengan bakteri, kelompok eukariotik ini memiliki kompartemen organel bermembran dan siklus hidup yang lebih kompleks, melibatkan fase reproduksi seksual dan aseksual. Jamur mikroskopis (kapang dan khamir) memiliki dinding sel chitin dan bersifat absorbtif heterotrof, sedangkan protozoa umumnya uniseluler, tidak ber dinding sel, dan bergerak aktif menggunakan silia, flagela, atau pseudopodia. Pemahaman karakteristik morfologi dan fisiologi kedua kelompok ini sangat penting dalam analisis sanitasi lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Dalam konteks aplikasi praktis, mahasiswa diharapkan mampu mendemonstrasikan teknik identifikasi morfologi dan fisiologi untuk membedakan kelompok jamur mikroskopis dan protozoa patogen dalam sampel air sungai yang tercemar, seperti Sungai Ciliwung di wilayah perkotaan Jakarta. Sampel air sungai yang tercemar limbah domestik sering kali mengandung kista protozoa patogen seperti *Entamoeba histolytica* atau *Giardia lamblia*, di samping spora jamur kontaminan dari genus *Aspergillus* atau *Penicillium*. Mahasiswa harus menggunakan pewarnaan sederhana seperti iodine untuk mengidentifikasi morfologi kista protozoa di bawah mikroskop cahaya, serta melakukan kultur pada media selektif untuk mengamati pertumbuhan hifa dan struktur sporangium jamur.

CONTOH

Saat melakukan analisis sampel air dari daerah aliran sungai yang padat penduduk, mahasiswa mengambil 10 mL sampel air, melakukan sentrifugasi untuk memekatkan partikel, kemudian mengamati sedimennya dengan pewarnaan asam-cepat (*acid-fast*) untuk mengidentifikasi oosista *Cryptosporidium parvum*. Secara simultan, sisa sampel ditumbuhkan pada media *Potato Dextrose Agar* (PDA) untuk mendeteksi keberadaan spora jamur oportunistik. Hasil pengamatan ini digunakan sebagai dasar penentuan kelayakan air untuk konsumsi sanitasi.

Keragaman taksonomi jamur di wilayah tropis seperti Indonesia sangat melimpah dan terdokumentasi dalam berbagai

katalog keanekaragaman hayati global (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Namun, eksplorasi jamur mikroskopis dan protozoa air sering kali terabaikan dibandingkan dengan inventarisasi fauna makro (Kurniati, 2021). Padahal, beberapa jenis protozoa non-patogen seperti *Paramecium* dan *Vorticella* berfungsi sebagai bioindikator alami air bersih, sementara dominasi protozoa berflagela dan amoeba menunjukkan tingkat pencemaran organik yang tinggi. Melalui integrasi identifikasi morfologi (struktur spora, alat gerak) dan fisiologi (kebutuhan nutrisi, toleransi suhu), mahasiswa dapat menyusun laporan analisis kualitas air yang akurat untuk mendukung program sanitasi lingkungan yang higienis.

G. PERANAN KERAGAMAN MIKROORGANISME DALAM KEHIDUPAN

Keragaman metabolisme mikroorganisme lokal (MOL) menyediakan bahan baku yang tidak terbatas bagi inovasi bioteknologi ramah lingkungan dan kedaulatan pangan. Setiap kelompok mikroba memiliki keunikan enzimatis yang dapat dimanfaatkan untuk memecah senyawa kompleks menjadi produk bernilai tambah. Di Indonesia, pemanfaatan konsorsium mikroba lokal telah lama dipraktikkan secara tradisional dalam pembuatan tempe, tapai, dadih, dan pupuk organik cair. Mahasiswa tingkat sarjana dituntut mampu mengimplementasikan konsep keragaman metabolik ini untuk menyusun formula konsorsium starter mikroba yang stabil, efisien, dan adaptif terhadap substrat lokal.

Sebagai contoh penerapan dalam pengolahan pangan, pembuatan tepung jali (*Coix lacryma-jobi* L.) termodifikasi dapat dioptimalkan kualitasnya melalui proses fermentasi terkendali (Sudaryati Soeka, 2021). Mahasiswa dapat menyusun konsorsium starter yang terdiri atas bakteri amilolitik-selulolitik untuk mendegradasi pati dan serat kasar, serta bakteri asam laktat (BAL) untuk menurunkan pH dan memberikan aroma khas. Bakteri asam laktat yang digunakan, seperti *Lactobacillus plantarum*, berperan penting dalam menghasilkan asam laktat melalui jalur fermentasi homolaktat atau heterolaktat. Optimasi kondisi batch fermentasi sangat menentukan rendemen dan konsentrasi asam laktat yang dihasilkan oleh konsorsium tersebut (Nandini, 2021).

Penerapan konsorsium mikroorganisme lokal tidak hanya terbatas pada sektor pangan, melainkan juga sangat aplikatif dalam pengelolaan limbah pertanian dan peternakan di pedesaan Indonesia. Penggunaan starter mikroba lokal dari sisa buah-buahan atau sayuran terbukti efektif mempercepat konversi limbah organik menjadi media tanam berkualitas tinggi (Wanti, 2023). Konsorsium mikroba ini juga dapat diaplikasikan dalam pembuatan pupuk organik cair dari urine ternak guna meningkatkan kandungan nitrogen fungsionalnya (Paturrahman, 2025). Selain meningkatkan kesuburan fisik tanah, formulasi konsorsium mikroba lokal ini juga berfungsi sebagai agens pengendali hayati yang efektif untuk menekan pertumbuhan jamur patogen tanaman (Sriwijaya Soedjadi, 2025).

CONTOH

Untuk memproduksi biourin kambing Peranakan Etawa (PE) berkualitas tinggi, mahasiswa mencampurkan urine segar dengan konsorsium starter mikroorganisme lokal (MOL) berbasis limbah pisang dan tetes tebu. Aktivitas bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat di dalam konsorsium tersebut meningkatkan kandungan unsur hara makro cair secara signifikan dalam waktu 14 hari fermentasi anaerob, menghasilkan pupuk organik cair yang siap diaplikasikan pada lahan pertanian hortikultura, sejalan dengan pemanfaatan bakteri pelarut fosfat untuk mengoptimalkan ketersediaan unsur hara tanaman (Lovitna, 2021).

Keberhasilan aplikasi konsorsium mikroba ini sangat bergantung pada sinergi antar-spesies di dalam starter. Mahasiswa harus memastikan bahwa mikroba yang dicampur tidak saling menghambat (antagonis), melainkan saling mendukung (sinergis). Melalui pendekatan formulasi berbasis keragaman metabolisme, mahasiswa dapat merancang solusi bioteknologi aplikatif yang mampu meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus melestarikan kekayaan hayati mikroba asli Indonesia secara berkelanjutan.

H. RANGKUMAN

Pemetaan keragaman mikroorganisme kontemporer telah bertransformasi dari sekadar pengamatan morfologi luar dan uji

biokimia konvensional menuju integrasi taksonomi numerik fenotipik dan analisis filogenetik molekuler yang memanfaatkan sekuensing gen penanda seperti 16S rRNA. Penggunaan gen 16S rRNA sebagai penanda utama sangat krusial karena memiliki daerah lestari untuk penempelan primer PCR universal sekaligus daerah hipervariabel yang menyimpan informasi spesifik tingkat spesies. Pendekatan hibrida ini meminimalkan bias identifikasi pada isolat lokal dengan membandingkan persentase identitas sekuen nukleotida menggunakan algoritma penyelarasan global seperti BLAST guna merekonstruksi pohon filogenetik yang presisi untuk menentukan spesies baru secara akurat. Di sisi lain, keragaman metabolisme bakteri yang luar biasa menempatkan kelompok prokariotik ini sebagai agen ekologis penting, terutama dalam menghadapi kerusakan lingkungan akibat aktivitas industri ekstraktif. Melalui pemilihan bakteri metallotolerant atau ekstremofil dari genus *Pseudomonas* dan *Bacillus* yang dikombinasikan dengan rekayasa faktor abiotik tanah menggunakan amandemen seperti biochar, proses bioremediasi tanah masam yang tercemar logam berat maupun biodegradasi polimer sintetik di kawasan pesisir dapat berjalan secara optimal. Sementara pada domain non-seluler, keragaman virus yang dicirikan oleh variasi arsitektur kapsid serta organisasi genomik dalam sistem klasifikasi Baltimore menghadirkan tantangan patologis yang signifikan, khususnya pada sektor pertanian hortikultura di mana virus tumbuhan membutuhkan vektor atau kerusakan fisik mekanis untuk menginfeksi inangnya. Integrasi pemahaman komprehensif mengenai keragaman taksonomik, adaptasi fisiologis bakteri, dan mekanisme replikasi virus ini tidak hanya memperkaya khazanah teoretis mikrobiologi, tetapi juga menjadi instrumen praktis yang mutlak diperlukan untuk merancang solusi bioteknologi yang adaptif terhadap permasalahan ekologis dan pertanian di tingkat lokal maupun global.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis mengapa gen 16S rRNA dipilih sebagai penanda filogenetik utama dalam mengklasifikasikan bakteri hasil isolat lokal dibandingkan dengan gen penyandi protein fungsional biasa. Hubungkan jawaban Anda dengan keberadaan daerah

lestari (*conserved*) dan daerah hipervariabel (*hypervariable region*) pada struktur gen tersebut.

2. Bandingkan efektivitas dan keandalan identifikasi bakteri tanah vulkanik menggunakan pendekatan taksonomi numerik fenotipik dengan pendekatan molekuler berbasis sekuensing DNA. Evaluasi mengapa pengamatan morfologi koloni saja sering kali menghasilkan bias dalam penentuan spesies baru pada habitat ekstrem tersebut.
3. Rumuskan suatu strategi bioremediasi tanah bekas tambang yang masam dan tercemar logam berat kadmium menggunakan kombinasi konsorsium bakteri metallotolerant dan biochar. Telaah bagaimana manipulasi faktor abiotik tanah oleh biochar dapat memengaruhi efisiensi kerja bakteri dalam melakukan biosorpsi.
4. Telaah mekanisme adaptasi metabolik yang harus dimiliki oleh komunitas bakteri pesisir sehingga mereka mampu mendegradasi polimer sintesis seperti polietilena di ekosistem mangrove. Mengapa keragaman fungsional bakteri lokal ini dianggap memiliki nilai bioteknologis yang lebih tinggi dibandingkan dengan strain laboratorium standar?
5. Evaluasi pengelompokan virus berdasarkan sistem klasifikasi Baltimore dalam memprediksi pola infeksi dan replikasi virus tanaman. Bagaimana pemahaman terhadap struktur genom virus ini dapat digunakan untuk merancang strategi preventif penyebaran penyakit tanaman hortikultura yang tidak dapat diinfeksi secara aktif tanpa bantuan kerusakan fisik?

b. Pilihan Berganda

1. Gen 16S rRNA dipilih sebagai penanda filogenetik utama dalam klasifikasi bakteri karena memiliki daerah hipervariabel yang berfungsi untuk...
 - a. Menempelkan primer PCR universal saat proses amplifikasi DNA berlangsung
 - b. Mengodekan enzim katalitik yang diperlukan untuk fermentasi karbohidrat
 - c. Menyimpan informasi perbedaan urutan basa yang spesifik antarspesies

- d. Mempertahankan kestabilan struktur sekunder membran sel bakteri ekstremofil
 - e. Memicu terjadinya transfer gen horizontal di antara bakteri yang berkerabat dekat
2. Setelah melakukan sekuensing DNA terhadap isolat lokal, mahasiswa memanfaatkan algoritma BLAST (*Basic Local Alignment Search Tool*) dengan tujuan untuk...
 - a. Mendeteksi keberadaan plasmid pembawa gen resistensi logam berat pada bakteri
 - b. Mengukur persentase identitas genetik sekuen nukleotida terhadap database global
 - c. Mengamplifikasi daerah hipervariabel dari gen 16s rna secara in vitro
 - d. Mengisolasi dna genomik bakteri dari sampel tanah secara otomatis
 - e. Memvisualisasikan struktur kapsid virus yang menginfeksi isolat bakteri tersebut
3. Berdasarkan Tabel 10, parameter klasifikasi manakah yang termasuk dalam pendekatan fenotipik namun memiliki keandalan sedang karena mudah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan kultur?
 - a. Komposisi basa DNA dan hibridisasi DNA-DNA
 - b. Profil asam lemak seluler (FAME) dan sekuens gen rpoB
 - c. Struktur sekunder RNA dan profil lipid membran
 - d. Toleransi suhu, pH, salinitas, dan karakter fisik luar
 - e. Sekuensing genom fungsional dan aktivitas enzim intraseluler
4. Keberadaan daerah lestari (*conserved region*) pada gen 16S rRNA bakteri sangat penting dalam analisis molekuler karena berperan sebagai...
 - a. Penanda tingkat mutasi yang tinggi pada isolat baru
 - b. Daerah penyandi sintesis protein fungsional metabolisme
 - c. Target penempelan primer pcr universal untuk proses amplifikasi
 - d. Indikator kemampuan bakteri dalam melakukan biosorpsi logam
 - e. Pembeda utama antara subspecies bakteri yang berkerabat dekat

5. Dalam merehabilitasi lahan bekas tambang timah di Pulau Bangka yang masam dan tercemar logam berat, jenis bakteri yang paling tepat untuk diaplikasikan adalah...
 - a. Bakteri halofil yang toleran terhadap kadar garam tinggi
 - b. Bakteri metallotolerant yang mampu melakukan biosorpsi logam berat
 - c. Bakteri patogen oportunistik yang cepat membelah diri pada ph rendah
 - d. Bakteri mesofil yang peka terhadap fluktuasi konsentrasi kadmium
 - e. Bakteri kemolitotrof yang hanya membutuhkan karbon dioksida sebagai sumber energi
6. Pada rancangan bioremediasi tanah tercemar, penggunaan biochar bersama dengan konsorsium bakteri bertujuan untuk...
 - a. Membunuh bakteri kompetitor asli yang berada di dalam tanah tercemar
 - b. Mengoksidasi logam berat secara langsung tanpa bantuan enzim bakteri
 - c. Menurunkan ph tanah secara drastis agar bakteri dapat tumbuh optimal
 - d. Menyediakan mikrorongga sebagai habitat pelindung bagi bakteri yang diaplikasikan
 - e. Menghentikan transfer gen horizontal antar-spesies bakteri patogen
7. Genus bakteri lokal yang telah terbukti memiliki ketahanan tinggi terhadap toksisitas logam berat dan sering digunakan dalam proyek pemulihan lahan tercemar adalah...
 - a. Escherichia dan Salmonella
 - b. Lactobacillus dan Streptococcus
 - c. Pseudomonas dan Bacillus
 - d. Acetobacter dan Saccharomyces
 - e. Clostridium dan Vibrio
8. Eksplorasi keanekaragaman bakteri di kawasan hutan mangrove Ambon berhasil mengisolasi bakteri yang memiliki kemampuan bioteknologis unik berupa...
 - a. Mendegradasi polimer sintesis jenis polietilena
 - b. Mensintesis antibiotik berspektrum luas terhadap virus tanaman

- c. Mengikat nitrogen bebas pada kondisi salinitas sangat ekstrem
 - d. Memproduksi biochar secara alami dari tumpukan serasah daun
 - e. Mengubah logam timbal menjadi senyawa organik volatil yang aman
9. Klasifikasi Baltimore mengelompokkan virus berdasarkan karakter struktural dan fungsional yang spesifik, yaitu...
- a. Bentuk geometris kapsid dan keberadaan amplop lipid luar
 - b. Jenis tumbuhan atau hewan inang yang dapat diinfeksi secara aktif
 - c. Cara virus mensintesis mrna dari variasi genom DNA atau rna mereka
 - d. Ukuran diameter partikel virus dan jenis protein penyusun kapsomer
 - e. Tingkat virulensi virus saat ditularkan melalui vektor serangga
10. Berbeda dengan virus yang menyerang sel hewan, virus tanaman menghadapi hambatan fisik struktural berupa dinding sel tumbuhan. Oleh karena itu, virus tanaman umumnya menginfeksi melalui...
- a. Endositosis termediasi reseptor pada permukaan membran daun
 - b. Penetrasi langsung menggunakan enzim lisozim ekstraseluler
 - c. Fusi membran antara amplop virus dengan dinding selulosa daun
 - d. Bantuan vektor serangga atau adanya luka mekanis pada jaringan tumbuhan
 - e. Transfer aktif melalui pori-pori stomata tanpa merusak jaringan epidermal

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah tim peneliti lingkungan menemukan bahwa tanah di sekitar kawasan industri peleburan besi di Jawa Barat mengandung konsentrasi timbal (Pb) yang melampaui ambang batas aman. Tanah tersebut sangat kering, padat, dan kekurangan bahan organik. Peneliti berhasil mengisolasi dua strain bakteri

lokal, tetapi karakterisasinya masih terbatas pada morfologi koloni yang menunjukkan kemiripan dengan genus *Pseudomonas*. Anda diminta untuk bertindak sebagai ahli mikrobiologi dalam proyek pemulihan lahan ini.

Instruksi:

- a. Rancang tahapan analisis molekuler yang sistematis untuk memastikan identitas taksonomi kedua isolat bakteri tersebut hingga tingkat spesies!
 - b. Formulasikan sebuah rencana intervensi bioremediasi lapangan yang mengintegrasikan penggunaan bakteri isolat tersebut dengan penambahan materi pembenah tanah guna mengatasi kendala abiotik tanah setempat!
2. Di sebuah kawasan perkebunan tomat di Sulawesi Utara, para petani melaporkan kegagalan panen akibat serangan penyakit misterius yang menyebabkan daun tanaman mengkerut, menguning, dan pertumbuhan buah terhenti. Diduga kuat penyebabnya adalah virus tanaman bergenom RNA untai tunggal (*ssRNA*). Lokasi perkebunan tersebut juga mengalami serangan hama kutu kebul (*Bemisia tabaci*) yang sangat masif. Pemilik kebun berencana menyemprotkan fungisida kimia dosis tinggi untuk mengatasi masalah ini, tetapi Anda menyarankan pendekatan yang berbeda berbasis pemahaman virologi.

Instruksi:

- a. Evaluasi efektivitas rencana penyemprotan fungisida oleh pemilik kebun dikaitkan dengan agen penyebab penyakit!
- b. Analisis peran hama kutu kebul dalam siklus infeksi virus tersebut berdasarkan sifat fisik dinding sel tumbuhan!
- c. Rumuskan rekomendasi strategi pengendalian terpadu non-kimia yang logis untuk menyelamatkan perkebunan tomat tersebut!

BAB XI

JENIS PEMERIKSAAN

MIKROBIOLOGI

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah menyelesaikan pembahasan pada bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- 1. Mengimplementasikan prosedur pengambilan, penanganan, dan transportasi berbagai jenis spesimen klinis maupun lingkungan secara aseptis sesuai dengan standar operasional prosedur yang berlaku.*
- 2. Menggunakan teknik pewarnaan bakteri, termasuk pewarnaan Gram dan pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA), untuk menganalisis karakteristik morfologi sel mikroorganisme di bawah mikroskop.*
- 3. Memilih jenis media pertumbuhan selektif dan diferensial yang tepat untuk mengisolasi, menumbuhkan, dan mengidentifikasi genus atau spesies mikroorganisme target dari sampel campuran.*
- 4. Menerapkan metode deteksi berbasis serologi (seperti ELISA) dan molekuler (seperti PCR) dalam mengidentifikasi materi genetik atau antigen spesifik mikroorganisme dengan tingkat sensitivitas yang tinggi.*
- 5. Menentukan validitas hasil uji laboratorium mikrobiologi dan menyusun laporan diagnosis yang sistematis berdasarkan integrasi data mikroskopis, kultural, serta molekuler.*

B. PENDAHULUAN

Di dalam ranah mikrobiologi terapan, ketepatan diagnosis merupakan pilar utama yang menentukan keberhasilan penanganan kasus, baik di sektor kesehatan, industri, maupun lingkungan. Kesalahan dalam mengidentifikasi mikroorganisme patogen tidak hanya berdampak pada kegagalan terapi pasien, tetapi juga dapat

memicu resistensi antimikroba global dan penyebaran wabah yang tidak terkendali. Sebagai contoh, dalam penanganan kasus Tuberkulosis (TB) yang disebabkan oleh *Mycobacterium tuberculosis* di berbagai Pusat Kesehatan Masyarakat (Puskesmas) di Indonesia, seperti di wilayah padat penduduk Jawa Barat, kualitas sampel sputum yang diambil oleh tenaga kesehatan sangat menentukan hasil akhir diagnosa. Jika spesimen yang dikirim ke laboratorium didominasi oleh saliva (air liur) alih-alih sputum sejati akibat prosedur pengambilan yang keliru, maka pemeriksaan mikroskopis pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA) akan memberikan hasil negatif palsu. Implikasinya, pasien yang sebenarnya menderita TB aktif tidak akan terdiagnosis, tidak mendapatkan regimen obat anti-tuberkulosis (OAT) yang tepat, dan terus menularkan bakteri tersebut di lingkungan sekitarnya. Kasus nyata ini menegaskan bahwa pemahaman mendalam mengenai jenis-jenis pemeriksaan mikrobiologi bukan sekadar penguasaan teknik di atas meja praktikum, melainkan sebuah tanggung jawab profesional yang krusial bagi seorang calon mikrobiolog.

Bagi mahasiswa program studi Mikrobiologi, penguasaan materi ini menjadi jembatan kritis yang menghubungkan teori akademis dengan aplikasi nyata di dunia kerja, baik di laboratorium klinis, industri pangan, maupun lembaga penelitian. Setiap metode pemeriksaan memiliki karakteristik, sensitivitas, spesifisitas, dan batas deteksi yang berbeda, sehingga seorang mikrobiolog harus mampu memilih dan menerapkan metode yang paling efisien berdasarkan tujuan analisis. Untuk membekali mahasiswa dengan kompetensi tersebut, bab ini akan mengupas tuntas seluruh tahapan pemeriksaan mikrobiologi secara sistematis. Pembahasan akan dimulai dari fase pra-analitik melalui **Pengambilan dan Pengelolaan Spesimen**, dilanjutkan dengan fase analitik awal berupa **Pemeriksaan Mikroskopis**. Selanjutnya, kita akan mempelajari metode konvensional yang menjadi standar baku emas, yaitu **Pemeriksaan Kultur dan Identifikasi Mikroorganisme**, serta metode modern berbasis imunologi dan asam nukleat melalui **Pemeriksaan Serologi dan Molekuler**. Bab ini akan diakhiri dengan fase pasca-analitik, yaitu **Interpretasi dan Pelaporan Hasil Pemeriksaan Mikrobiologi**, guna memastikan seluruh data

laboratorium dapat diterjemahkan menjadi informasi yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan.

C. PENGAMBILAN DAN PENGELOLAAN SPESIMEN

Fase pra-analitik merupakan tahapan paling krusial dalam pemeriksaan mikrobiologi karena kualitas spesimen yang dikirim ke laboratorium menentukan validitas hasil diagnosis akhir. Pada tahap ini, mahasiswa diharapkan mampu mengimplementasikan prosedur pengambilan, penanganan, dan transportasi berbagai jenis spesimen secara aseptis sesuai dengan standar operasional prosedur yang berlaku. Kesalahan pada fase ini, seperti kontaminasi oleh flora normal tubuh atau kematian mikroorganisme patogen akibat keterlambatan transportasi, tidak dapat diperbaiki pada fase analitik berikutnya. Pengambilan spesimen wajib menerapkan teknik aseptis dengan menggunakan peralatan steril untuk mencegah kontaminasi dari lingkungan maupun tubuh petugas medis.

Dalam praktik laboratorium di Indonesia, standarisasi pengelolaan spesimen sangat ditekankan untuk menekan angka kontaminasi silang. Sebagai contoh, pada pengujian spesimen saliva untuk deteksi agen infeksius, risiko kontaminasi silang antar-sampel sangat tinggi apabila protokol pengambilan tidak dijalankan secara ketat (Virna dkk., 2025). Begitu pula dengan pengelolaan spesimen feses atau lumpur biologis di fasilitas sanitasi masyarakat. Setiyawan dkk. (2021) menguraikan bahwa penanganan limbah biologis dan spesimen lingkungan memerlukan wadah penampung khusus guna mencegah penyebaran mikroorganisme patogen ke area sekitar. Sementara itu, pada penanganan limbah organik non-medis, pendekatan bioteknologi serupa dapat diterapkan untuk mengonversi limbah padat menjadi media tanam bernilai guna menggunakan bantuan mikroorganisme lokal (Wanti, 2023). Oleh karena itu, pemilihan wadah spesimen yang kedap air, steril, dan bebas dari bahan kimia penghambat pertumbuhan mikroorganisme merupakan sebuah keharusan.

Selain faktor sterilitas wadah, pengelolaan limbah medis yang dihasilkan dari sisa spesimen harus dikelola berdasarkan regulasi nasional. Di Indonesia, rumah sakit dan laboratorium klinis diwajibkan untuk mematuhi Undang-Undang Nomor 44 Tahun 2009

tentang Rumah Sakit dan regulasi pengelolaan lingkungan hidup untuk memastikan bahwa sisa spesimen infeksius didekontaminasi sebelum dibuang (Permana & Syam, 2022). Hal ini penting untuk mencegah terjadinya infeksi nosokomial serta pencemaran lingkungan oleh bakteri patogen resisten.

Tabel 11. Prosedur Pengambilan dan Kondisi Transportasi Spesimen Klinis

Jenis Spesimen	Wadah / Transport	Teknik Pengambilan Aseptis	Suhu Penyimpanan	Batas Waktu Transport	Catatan Klinis
Sputum	Pot steril bermulut lebar	Batuk dalam pada pagi hari; bersihkan mulut dengan berkumur air bersih sebelumnya	2–8 °C	< 2 Jam	Hindari kontaminasi saliva (Vima dkk., 2025)
Darah	Botol media kultur darah	Venapungsi dengan desinfeksi alkohol 70% dan iodin 2% pada kulit	35–37 °C	Segera (< 1 Jam)	Jangan disimpan di dalam lemari es
Urin Porsi Tengah	Pot steril tertutup rapat	Bersihkan area periuretra, tampung aliran urin pancaran tengah	2–8 °C	< 2 Jam	Gunakan pengawet asam borat jika transport > 2 jam
Swab Luka	Tabung transport Amies/Stuart	Swab pada bagian dalam luka setelah membersihkan nanah superfisial	20–25 °C	< 24 Jam	Jaga agar media transport tetap basah

Tabel 11. menunjukkan bahwa setiap jenis spesimen klinis memerlukan penanganan khusus, wadah yang spesifik, serta kondisi suhu penyimpanan yang berbeda untuk menjaga viabilitas patogen target selama masa transportasi. Kegagalan dalam mematuhi batas waktu pengiriman dan suhu penyimpanan yang direkomendasikan dapat mengakibatkan kematian mikroorganisme patogen yang sensitif terhadap suhu atau pertumbuhan berlebih dari flora normal yang mengontaminasi spesimen.

D. PEMERIKSAAN MIKROSKOPIS

Pemeriksaan mikroskopis merupakan langkah analitik awal yang memberikan informasi cepat mengenai morfologi, struktur, dan sifat pewarnaan mikroorganisme. Metode ini sangat penting dalam penanganan kasus darurat karena mampu memberikan petunjuk awal mengenai golongan patogen penyebab infeksi sebelum hasil kultur tersedia. Mahasiswa diharapkan dapat menggunakan teknik pewarnaan bakteri secara terampil, terutama pewarnaan Gram dan pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA), untuk menganalisis karakteristik morfologi sel di bawah mikroskop cahaya.

*Dalam bidang klinis dan kesehatan masyarakat di Indonesia, pemeriksaan mikroskopis memegang peran sentral dalam skrining penyakit menular. Sebagai contoh, penyakit infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) dan tuberkulosis masih menjadi masalah kesehatan utama dengan prevalensi yang tinggi di berbagai wilayah Indonesia (Erica Yola Pramana Putri dkk., 2022). Pemeriksaan mikroskopis sputum dengan pewarnaan BTA (Ziehl-Neelsen) menjadi standar diagnosis cepat di puskesmas-puskesmas karena biayanya yang murah dan prosedurnya yang sederhana. Bakteri tahan asam seperti *Mycobacterium tuberculosis* akan mempertahankan zat warna primer karbol fuksin meskipun didekolorisasi dengan asam-alkohol, sehingga tampak berwarna merah di bawah mikroskop, sementara bakteri non-BTA akan berwarna biru akibat zat warna lawan (methylene blue).*

Selain pewarnaan BTA, pewarnaan Gram merupakan teknik diferensial yang paling sering digunakan untuk mengklasifikasikan bakteri menjadi Gram-positif (berwarna ungu) dan Gram-negatif (berwarna merah muda atau merah) berdasarkan ketebalan lapisan peptidoglikan pada dinding selnya. Keterampilan mikroskopis ini tidak hanya terbatas pada spesimen klinis manusia, melainkan juga diterapkan pada pemeriksaan mutu simplisia herbal di industri farmasi Indonesia untuk mendeteksi kontaminasi mikroorganisme (Nirmala dkk., 2022). Pemeriksaan mikroskopis yang presisi membutuhkan kalibrasi alat yang konsisten serta pemahaman mendalam mengenai indeks bias dan penggunaan minyak imersi pada perbesaran kuat (1000x). Sebagaimana halnya analisis mikroskopis mineralogi atau struktur padat yang memerlukan ketelitian logging optik (Latashilulrohima, 2026), pemeriksaan

mikrobiologi menuntut ketajaman pengamatan visual untuk membedakan artefak atau debris dari sel mikroorganisme yang sebenarnya.

i CATATAN

Penggunaan minyak imersi (immersion oil) sangat penting pada pembesaran objektif 100x. Minyak imersi memiliki indeks bias yang sama dengan kaca (sekitar 1,515), sehingga mencegah pembiasan cahaya ke udara dan memfokuskan berkas cahaya langsung ke lensa objektif untuk menghasilkan gambar yang tajam.

E. PEMERIKSAAN KULTUR DAN IDENTIFIKASI MIKROORGANISME

Pemeriksaan kultur merupakan metode standar emas (gold standard) dalam mikrobiologi diagnosis karena memungkinkan isolasi patogen penyebab infeksi dalam bentuk koloni murni untuk kemudian diidentifikasi dan diuji sensitivitasnya terhadap antimikroba. Mahasiswa dituntut untuk mampu memilih jenis media pertumbuhan selektif dan diferensial yang tepat guna mengisolasi, menumbuhkan, dan mengidentifikasi genus atau spesies mikroorganisme target dari sampel campuran. Prinsip isolasi didasarkan pada teknik goresan kuadran (streak plate) untuk memperoleh koloni tunggal yang terpisah secara fisik.

*Di Indonesia, teknik kultur dan identifikasi diaplikasikan secara luas dalam berbagai sektor, mulai dari riset pertanian hingga industri pangan lokal. Sebagai contoh, dalam eksplorasi keanekaragaman mikroba tanah di Indonesia, peneliti mengisolasi bakteri rizosfer dari tanaman obat seperti jahe (*Zingiber officinale*) menggunakan media agar nutrisi spesifik guna mengidentifikasi bakteri yang berpotensi sebagai pemacu pertumbuhan tanaman (Mardiyah, 2025). Selain identifikasi mikroba asosiatif, karakterisasi fitokimia juga dilakukan untuk mengisolasi senyawa flavonoid dari spesies pandan hutan baru (Sri Rizki, 2021). Pada sektor pangan tradisional, teknik kultur digunakan untuk memurnikan strain fungi fungsional. Penelitian mengenai isolasi dan identifikasi spesies *Rhizopus oligosporus* dan *Rhizopus oryzae* pada tempe asal Bekasi menunjukkan betapa pentingnya optimasi media kultur agar kentang*

dekstrosa (PDA) untuk memisahkan kapang patogen dari kapang fermentasi yang diinginkan (Nurholipah & Ayun, 2021).

Setelah isolasi berhasil dilakukan, koloni murni diidentifikasi melalui serangkaian uji biokimia, seperti uji katalase, koagulase, fermentasi karbohidrat pada media Triple Sugar Iron Agar (TSIA), serta uji IMViC (Indole, Methyl Red, Voges-Proskauer, Citrate). Seluruh data fenotipik ini kemudian dicocokkan dengan basis data taksonomi standar. Pentingnya perekaman data fenotipik yang komprehensif ini serupa dengan metode identifikasi keragaman fauna berdasarkan morfologi dan catatan suara uniknya (Kurniati, 2021). Dalam konteks klasifikasi biologi modern, pengorganisasian data identifikasi mikroorganisme dan jamur sering kali merujuk pada model inventarisasi keanekaragaman hayati global yang komprehensif, mirip dengan sistem katalogisasi flora skala besar yang diterapkan dalam kompilasi data taksonomi internasional (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Integrasi data kultur konvensional dengan basis data referensi yang valid memastikan akurasi klasifikasi mikroorganisme hingga tingkat spesies.

DEFINISI

Media Selektif adalah media pertumbuhan yang mengandung senyawa kimia tertentu (seperti zat warna, garam empedu, atau antibiotik) yang menghambat pertumbuhan mikroorganisme non-target namun mengizinkan pertumbuhan mikroorganisme target.

Media Diferensial adalah media yang mengandung indikator (seperti indikator pH atau sel darah merah) yang memungkinkan perbedaan visual antara berbagai jenis mikroorganisme berdasarkan sifat biokimiawi koloni mereka.

F. PEMERIKSAAN SEROLOGI DAN MOLEKULER

Meskipun kultur bakteri merupakan standar baku emas, metode tersebut membutuhkan waktu inkubasi yang lama (minimal 24 hingga 48 jam, bahkan berminggu-minggu untuk beberapa patogen lambat seperti *Mycobacterium*). Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkan metode diagnosis cepat berbasis serologi dan molekuler. Mahasiswa diharapkan mampu menerapkan metode deteksi berbasis serologi (seperti ELISA) dan molekuler (seperti

PCR) dalam mengidentifikasi materi genetik atau antigen spesifik mikroorganisme dengan tingkat sensitivitas dan spesifisitas yang tinggi.

Pemeriksaan serologi memanfaatkan reaksi spesifik antara antigen mikroorganisme dengan antibodi yang dihasilkan oleh sistem imun hospes. Salah satu teknik yang paling sering digunakan adalah Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) dan Lateral Flow Immunoassay (rapid test). Metode ini sangat berguna untuk skrining massal epidemiologi atau diagnosis infeksi virus akut yang sulit dikultur. Di sisi lain, pemeriksaan molekuler berbasis Polymerase Chain Reaction (PCR) mendeteksi keberadaan fragmen asam nukleat (DNA atau RNA) spesifik dari patogen secara langsung tanpa memerlukan pertumbuhan sel hidup.

Di Indonesia, implementasi metode deteksi cepat ini sangat krusial dalam pemantauan kualitas lingkungan hidup dan pencegahan wabah penyakit bawaan air (waterborne diseases). Sebagai contoh, dalam program peningkatan keterampilan pemeriksaan mikrobiologi air minum di wilayah Jawa Timur, deteksi kontaminasi bakteri koliform memerlukan konfirmasi cepat menggunakan teknik berbasis biomolekuler untuk menjamin keamanan konsumsi masyarakat secara real-time (Rini, 2025). Pemanfaatan PCR memungkinkan deteksi bakteri patogen seperti *Escherichia coli* penghasil toksin langsung dari sampel air dalam hitungan jam. Keunggulan utama metode PCR terletak pada sensitivitasnya yang tinggi, di mana beberapa salinan DNA target dalam sampel sudah cukup untuk diamplifikasi secara eksponensial sehingga menghasilkan pita DNA yang jelas pada visualisasi elektroforesis.

f FORMULA

Efisiensi replikasi DNA target dalam reaksi PCR mengikuti model pertumbuhan eksponensial yang dinyatakan dengan rumus:

$$Y = X \times (1 + E)^n$$

Dimana Y adalah jumlah DNA akhir, X adalah jumlah template DNA awal, E adalah efisiensi amplifikasi (idealnya bernilai 1 untuk efisiensi 100%), dan n adalah jumlah siklus PCR (biasanya berkisar antara 30 hingga 40 siklus).

G. INTERPRETASI DAN PELAPORAN HASIL PEMERIKSAAN MIKROBIOLOGI

Tahap pasca-analitik merupakan fase akhir di mana seluruh data yang diperoleh dari pemeriksaan mikroskopis, kultur, uji biokimia, serologi, maupun molekuler diintegrasikan untuk ditarik kesimpulannya. Mahasiswa harus mampu menentukan validitas hasil uji laboratorium mikrobiologi dan menyusun laporan diagnosis yang sistematis, logis, serta dapat dipertanggungjawabkan kepada klinisi atau pengambil kebijakan kesehatan. Interpretasi hasil tidak boleh dilakukan secara parsial, melainkan harus dikorelasikan secara klinis dengan kondisi pasien atau kondisi riil lingkungan tempat sampel diambil.

Aspek ketelitian dan standar acuan dalam menginterpretasi temuan sangat krusial di berbagai ranah biologi. Sebagai contoh konkret, dalam penanganan kasus infeksi bakteri di rumah sakit Indonesia, pelaporan hasil laboratorium yang akurat sangat memengaruhi pilihan terapi antimicrobial stewardship. Studi mengenai evaluasi terapi pneumonia komunitas (Community-Acquired Pneumonia) pada pasien rawat inap menunjukkan bahwa keberhasilan pengobatan monoterapi maupun terapi kombinasi sangat bergantung pada kecepatan interpretasi hasil kultur sputum dan uji sensitivitas antibiotik (Syahniar dkk., 2021). Jika laboratorium salah menginterpretasikan bakteri kontaminan (seperti flora normal saluran napas atas) sebagai patogen utama, maka pasien akan mendapatkan terapi antibiotik spektrum luas yang tidak perlu, yang pada gilirannya akan mempercepat laju resistensi bakteri di lingkungan rumah sakit tersebut.

Oleh karena itu, pelaporan hasil mikrobiologi harus mencakup informasi mengenai kualitas spesimen (misalnya, jumlah sel epitel dan leukosit PMN pada sputum untuk menilai kelayakan sampel), hasil pewarnaan Gram awal, identitas spesies patogen yang teridentifikasi, serta profil kepekaan antibiotik (antibiogram) yang dinyatakan dalam kategori Sensitif (S), Intermediet (I), atau Resisten (R) berdasarkan standar Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). Penulisan nama ilmiah mikroorganisme dalam laporan resmi wajib mengikuti kaidah nomenklatur binomial internasional yang baku, merujuk pada konsensus taksonomi global yang terstandarisasi, sejalan dengan prinsip publikasi referensi ilmiah

internasional dalam bidang biologi (BFG (The Brazil Flora Group), 2021). Dengan pelaporan yang terstruktur dan valid, diagnosis penyakit infeksi dapat ditegakkan dengan tepat demi keselamatan pasien dan kesehatan masyarakat.

H. RANGKUMAN

Kualitas pemeriksaan mikrobiologi sangat bergantung pada integrasi yang harmonis antara fase pra-analitik dan analitik. Fase pra-analitik, yang mencakup pengambilan, penanganan, dan transportasi spesimen secara aseptis, merupakan fondasi utama karena kesalahan pada tahap ini seperti kontaminasi flora normal atau matinya patogen sensitif akibat keterlambatan pengiriman tidak dapat dikompensasi pada tahap berikutnya. Kepatuhan terhadap protokol spesifik—mulai dari pemilihan wadah steril, pengaturan suhu penyimpanan yang tepat, hingga kepatuhan batas waktu pengiriman untuk berbagai jenis spesimen seperti darah, urin, sputum, dan luka—menjadi penentu validitas hasil akhir. Selanjutnya, pada fase analitik, pemeriksaan mikroskopis berfungsi sebagai langkah skrining awal yang cepat dan efisien. Penggunaan teknik pewarnaan diferensial, khususnya pewarnaan Gram yang membedakan bakteri berdasarkan struktur peptidoglikannya serta pewarnaan Bakteri Tahan Asam untuk mendeteksi mikobakterium, memberikan petunjuk morfologis penting sebelum hasil biakan diperoleh. Ketajaman visual ini memerlukan keterampilan teknis yang tinggi, termasuk pemanfaatan minyak imersi untuk menyamakan indeks bias pada perbesaran kuat. Akhirnya, pemeriksaan kultur bertindak sebagai standar emas diagnosis yang memungkinkan isolasi koloni murni melalui teknik goresan kuadran pada media selektif dan diferensial, diikuti oleh identifikasi spesifik dan uji sensitivitas antimikroba. Pemahaman komprehensif terhadap seluruh alur ini tidak hanya krusial untuk menegakkan diagnosis klinis yang akurat dan mencegah penularan penyakit di fasilitas kesehatan, melainkan juga aplikatif dalam mengontrol kualitas produk farmasi herbal, mengoptimalkan proses bioteknologi lingkungan melalui pengelolaan limbah biologis yang aman, serta mengembangkan potensi mikroba fungsional dalam industri pangan tradisional.

I. LATIHAN MAHASISWA

a. Essay

1. Analisis bagaimana kesalahan pada fase pra-analitik, seperti penundaan transportasi spesimen urin porsi tengah lebih dari dua jam tanpa pengawet asam borat, dapat mendistorsi hasil analisis kuantitatif bakteriuria pada fase analitik.
2. Bandingkan prinsip dasar penahanan zat warna pada pewarnaan Gram dan pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA), serta evaluasi mengapa kegagalan proses dekolorisasi dapat menyebabkan kesalahan interpretasi klinis yang fatal pada diagnosis penyakit infeksi.
3. Telaah peran penggunaan media selektif dan diferensial dalam metode goresan kuadran ketika mengisolasi patogen target dari sampel campuran yang memiliki kepadatan flora normal sangat tinggi seperti spesimen swab luka.
4. Rumuskan argumentasi ilmiah mengenai pentingnya penggunaan minyak imersi pada perbesaran lensa objektif seratus kali, dan analisis dampak fisik yang terjadi pada berkas cahaya serta kualitas bayangan mikroskopis jika minyak tersebut tidak digunakan.
5. Evaluasi konsekuensi ekologis dan hukum jika sebuah laboratorium klinis mengabaikan prosedur dekontaminasi limbah sisa spesimen infeksius sebelum dibuang, serta hubungkan analisis Anda dengan risiko penyebaran bakteri patogen resisten di lingkungan sekitar.

b. Pilihan Berganda

1. Apa konsekuensi utama jika spesimen urin porsi tengah disimpan pada suhu ruang lebih dari dua jam tanpa bahan pengawet sebelum dianalisis?
 - a. Terjadi pengendapan kristal asam urat yang merusak morfologi bakteri patogen.
 - b. Pertumbuhan berlebih dari bakteri kontaminan yang mengaburkan jumlah koloni patogen sebenarnya.
 - c. Bakteri patogen mengalami lisis akibat perubahan pH urin yang menjadi sangat asam.
 - d. Terjadi penguapan air urin yang meningkatkan konsentrasi metabolit beracun bagi bakteri.

- e. Bakteri anaerobik fakultatif akan mendominasi dan membunuh bakteri aerobik target.
2. Mengapa kontaminasi saliva pada pengambilan spesimen sputum untuk diagnosis infeksi saluran pernapasan harus dihindari secara ketat?
- a. Saliva mengandung enzim amilase yang dapat mendegradasi dinding sel bakteri target.
 - b. Saliva memiliki viskositas tinggi yang menyulitkan proses pewarnaan Gram.
 - c. Saliva didominasi oleh flora normal mulut yang dapat mengaburkan identifikasi patogen penyebab infeksi paru.
 - d. Saliva bersifat terlalu asam sehingga dapat membunuh bakteri sensitif seperti *Streptococcus pneumoniae*.
 - e. Saliva mengandung antibodi IgA yang dapat menggumpalkan bakteri patogen sehingga sulit dikultur.
3. Di antara prosedur penanganan spesimen berikut, manakah yang menunjukkan suhu penyimpanan dan batas waktu transportasi yang tepat untuk spesimen darah?
- a. Disimpan pada suhu 2–8 °C dan harus dikirim dalam waktu kurang dari 4 jam.
 - b. Disimpan pada suhu 20–25 °C dan harus dikirim dalam waktu kurang dari 12 jam.
 - c. Disimpan pada suhu 35–37 °C dan harus segera dikirim dalam waktu kurang dari 1 jam.
 - d. Disimpan pada suhu pembekuan -20 °C dan harus dikirim dalam waktu kurang dari 24 jam.
 - e. Disimpan pada suhu 10–15 °C menggunakan media transport Amies selama kurang dari 2 jam.
4. Pada pewarnaan Gram, mengapa bakteri Gram-negatif tampak berwarna merah muda atau merah di akhir prosedur?
- a. Lapisan peptidoglikan yang tipis dan lipid bilayer luar larut oleh alkohol, sehingga zat warna primer luntur dan mengikat safranin.
 - b. Dinding sel bakteri Gram-negatif mengandung asam teikoat yang menolak pengikatan kompleks kristal violet-iodin.
 - c. Karbol fuksin yang digunakan sebagai zat warna primer tidak dapat didekolorisasi oleh larutan asam-alkohol.

- d. Zat warna tandingan kristal violet langsung menggantikan posisi safranin karena afinitasnya yang lebih kuat.
 - e. Ketebalan lapisan peptidoglikan menghalangi masuknya kompleks iodin sehingga hanya safranin yang dapat berpenetrasi.
5. Karakteristik struktural apakah yang menyebabkan bakteri *Mycobacterium tuberculosis* tetap berwarna merah pada pewarnaan Bakteri Tahan Asam (BTA)?
- a. Memiliki lapisan luar berupa kapsul polisakarida yang sangat tebal dan kedap air.
 - b. Memiliki dinding sel kaya akan lipid berupa asam mikolat yang menolak dekolorisasi oleh asam-alkohol.
 - c. Memiliki membran luar yang mengandung protein porin spesifik pengikat zat warna karbol fuksin.
 - d. Memiliki lapisan peptidoglikan berlapis-lapis yang mengikat kuat zat warna kristal violet.
 - e. Tidak memiliki dinding sel tetapi sitoplasmanya mengandung senyawa hidrofobik yang mengikat safranin.
6. Apa fungsi fisika utama dari penggunaan minyak imersi pada pengamatan mikroskopis dengan perbesaran lensa objektif 100x?
- a. Memiliki indeks bias yang sama dengan kaca sehingga mencegah pembiasan cahaya dan meningkatkan resolusi gambar.
 - b. Menurunkan indeks bias medium agar cahaya menyebar merata ke seluruh bidang pandang objektif.
 - c. Berfungsi sebagai pelumas untuk mencegah gesekan langsung antara lensa objektif dengan preparat kaca.
 - d. Membantu mengeringkan preparat basah secara cepat agar bakteri tidak bergerak aktif saat diamati.
 - e. Mengubah panjang gelombang cahaya yang masuk agar kontras warna bakteri meningkat secara signifikan.
7. Mengapa media selektif sangat dibutuhkan dalam tahap awal kultur spesimen klinis yang berasal dari area tubuh yang kaya flora normal?
- a. Media selektif mengandung nutrisi khusus yang mempercepat waktu pembelahan sel semua jenis mikroorganisme.

- b. Media selektif dapat mengubah warna koloni bakteri berdasarkan kemampuan memetabolisme substrat tertentu.
 - c. Media selektif mengandung bahan penghambat yang menekan pertumbuhan mikroba non-target dan mengizinkan patogen target tumbuh.
 - d. Media selektif memicu pembentukan spora pada bakteri Gram-positif agar lebih mudah diisolasi secara fisik.
 - e. Media selektif mengeliminasi kebutuhan inkubasi pada suhu optimal karena mengandung zat pemacu pertumbuhan.
8. Apa tujuan mekanis utama dari teknik goresan kuadran (streak plate) pada media agar cawan?
- a. Menyebarkan suspensi bakteri secara merata di seluruh permukaan agar untuk menghitung jumlah total koloni.
 - b. Memastikan bakteri mendapatkan asupan oksigen yang homogen di setiap kuadran inkubasi.
 - c. Mengencerkan kepadatan sel bakteri secara bertahap sehingga diperoleh koloni tunggal yang terpisah secara fisik.
 - d. Mencampur sampel bakteri dengan nutrisi media agar pada suhu optimal sebelum memadat.
 - e. Memisahkan bakteri motil dari bakteri non-motil berdasarkan kecepatan migrasi sel pada permukaan agar.
9. Menurut regulasi pengelolaan lingkungan hidup dan Undang-Undang Rumah Sakit di Indonesia, apa tindakan wajib sebelum membuang sisa spesimen infeksius?
- a. Mengencerkan sisa spesimen dengan air mengalir dalam volume besar sebelum dialirkan ke selokan umum.
 - b. Melakukan dekontaminasi, misalnya dengan autoklaf atau disinfeksi kimiawi, untuk mematikan patogen resisten.
 - c. Menyimpan sisa spesimen dalam wadah tertutup rapat di lemari pendingin hingga masa kedaluwarsa habis.
 - d. Membakar seluruh sisa spesimen langsung di area terbuka rumah sakit tanpa melalui cerobong khusus.
 - e. Menyerahkan langsung sisa spesimen kepada pihak ketiga non-medis tanpa pengemasan khusus.
10. Bagaimana teknik pengambilan spesimen swab luka yang benar untuk menghindari kontaminasi oleh bakteri kontaminan superfisial?

- a. Melakukan swab langsung pada permukaan luka yang dipenuhi nanah tebal tanpa pembersihan awal.
- b. Membilas luka dengan alkohol 70% terlebih dahulu, kemudian mengeringkannya dan melakukan swab.
- c. Mengambil nanah superfisial menggunakan pipet steril tanpa menyentuh bagian dasar luka yang aktif.
- d. Melakukan swab pada bagian dalam atau tepi aktif luka setelah membersihkan nanah superfisial terlebih dahulu.
- e. Merendam area luka dalam larutan antiseptik selama sepuluh menit sebelum melakukan swab jaringan luar.

c. Soal Project / Studi Kasus

1. Sebuah laboratorium mikrobiologi puskesmas di daerah terpencil menerima spesimen dahak (sputum) untuk pemeriksaan BTA dari pasien suspek tuberkulosis. Karena keterbatasan fasilitas pendingin, spesimen tersebut disimpan pada suhu ruang (28–30 °C) selama hampir enam jam sebelum diwarnai dan diperiksa. Saat diperiksa secara mikroskopis, analis menemukan banyak sel bakteri berbentuk kokus Gram-positif dan sel epitel, tetapi tidak menemukan bakteri berbentuk batang merah (BTA). Dokter mencurigai adanya hasil negatif palsu akibat kesalahan penanganan spesimen.

Instruksi: Analisis kelemahan dalam rantai penanganan spesimen di atas, dan rumuskan solusi taktis serta operasional untuk menjaga kualitas spesimen sputum dalam kondisi keterbatasan fasilitas logistik.

2. Di sebuah rumah sakit tipe B, dilaporkan lonjakan kasus infeksi nosokomial pasca-bedah yang disebabkan oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa*. Tim pengendali infeksi mencurigai adanya kontaminasi silang selama proses pengambilan spesimen swab luka di bangsal perawatan atau kegagalan dekontaminasi sisa limbah spesimen sebelum dibuang ke instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Kepala laboratorium diminta menyusun draf audit untuk mengevaluasi kepatuhan staf terhadap regulasi pengelolaan spesimen dan limbah medis.

Instruksi: Susunlah sebuah rancangan langkah audit operasional yang mencakup titik kritis (critical control points) pada fase pra-

analitik hingga pasca-analitik (pembuangan limbah) untuk mengidentifikasi sumber kontaminasi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, G. M., & Sujana, I. W. (2021). Pengembanagan Perangkat Pembelajaran Berbasis Problem Solving Tri Hita Karena Materi Keragaman Budaya Kelas IV SD. *Jurnal Edutech Undiksha*, 9(1). <https://doi.org/10.23887/jeu.v9i1.32764>
- Aisah, N., Aini, S. N., Dermiyati, D., Arif, M. A. S., Setiawati, A. R., Prasetyo, D., & Lumbanraja, J. (2024). Respirasi dan biomassa karbon mikroorganisme (c-mik) tanah akibat sistem olah tanah dan pemupukan pada tanaman kacang hijau (*vigna radiata* L.) musim tanam ke-8. *Jurnal Agrotek Tropika*, 12(2), 447. <https://doi.org/10.23960/jat.v12i2.8930>
- Ali, S. A., & Adiaksa, B. W. (2023). Faktor Yang Berhubungan dengan Pemberian Asi Eksklusif Pada Bayi. *Jurnal Ilmiah Kesehatan Sandi Husada*, 12(1), 255-261. <https://doi.org/10.35816/jiskh.v12i1.1040>
- Amaludin, F., Zulfa, M. I., & Siswanto, H. (2025). Pengaruh hyperparameter tuning pada kinerja mobilenetv2 dengan transfer learning untuk deteksi penyakit kulit. *Jurnal SINTA: Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, 2(2). <https://doi.org/10.61124/sinta.v2i2.43>
- Amir Tangke, F., & Mila Valentina, R. (2026). Faktor-Faktor yang Berhubungan dengan Kegagalan Pemberian ASI Eksklusif. *JURNAL KESEHATAN TERAPAN*, 198. <https://doi.org/10.54816/jk.v13i2.1440>
- Anas, S., Ratna, & Yuliani, F. C. (2025). Pengaruh Edukasi Personal Hygiene terhadap Pencegahan Infeksi Saluran Kemih pada Lansia dengan Kateter di Ruang Babussalam Rumah Sakit Islam Sultan Hadlirin Jepara. *JURNAL KEPERAWATAN MERSI*, 14(2), 53-59. <https://doi.org/10.31983/jkm.v14i2.13761>
- Anggi, J. F. (2026). Penerapan Pengendalian Mutu pada Produk Rantai Dingin dalam Validasi Pengiriman Distribusi Obat. *Majalah Farmasetika*, 11(2). <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v11i2.69913>
- Anonim (2024). Perkembangan pendidikan di Malaysia selepas 1969. *Munysi Jurnal Pengajian Sejarah*, 2(2), 60-76. <https://doi.org/10.37134/munysi.vol2.2.5.2024>

- Anonim (2022). Karakteristik dan senyawa fenolik mikrokapsul ekstrak daun kelor (*moringa oleifera*) dengan kombinasi maltodekstrin dan whey protein iso. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 273-282. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2022.32.3.273>
- Anonim (2025). Analisis Perlindungan Hukum Terhadap Konsumen atas Pelayanan Kesehatan Tradisional dalam Pengobatan Herbal. *Iuris Studia: Jurnal Kajian Hukum*, 6(1). <https://doi.org/10.55357/is.v6i1.812>
- Anonim (2025). Pengenalan Flora Normal Pada Berbagai Organ Tubuh Manusia. *Health Idea*. <https://doi.org/10.63860/hi3103>
- Anonim (2022). Penatalaksanaan preeklamsia ringan berfokus pada pemberian rendam air hangat pada kaki. *Jurnal Ilmu Kebidanan*, 12(1). <https://doi.org/10.54444/jik.v12i1.87>
- Anonim (2023). Pengaruh Edukasi Gizi Terhadap Pengetahuan Gizi Pada Remaja Putri Di Kabupaten Maros. *Jurnal Ilmu Kebidanan*, 13(1). <https://doi.org/10.54444/jik.v13i1.118>
- Anonim (2025). Konsep Nasikh Mansukh Hadith Dalam Perubahan Hukum. *Jurnal Dunia Pengurusan*. <https://doi.org/10.55057/jdpg.2025.7.2.7>
- Anonim (2026). Perancangan Aplikasi Klasifikasi Citra Jamur Edible dan Beracun Menggunakan CNN MobileNetV2 Berbasis Android. *Jurnal Ilmiah Komputasi*, 25(2). <https://doi.org/10.32409/jikstik.25.2.3896>
- Anonim (2026). Relação entre ângulo de fase e massa celular corporal em pacientes hospitalizados. *BRASPEN Journal*, 41(1). <https://doi.org/10.37111/braspenj.2026.41.1.22>
- Arfah, M. A. (2023). Konsep Dasar Kepemimpinan dalam Islam. *Jurnal Literasiologi*, 10(2). <https://doi.org/10.47783/literasiologi.v10i2.589>
- Arif, M. (2021). Formulasi Sediaan gel etosom ekstrak Lamun (*Enhalus acoroides*) Sebagai pencerah dan pelembab pada kulit. *Jurnal Kartika Kimia*, 4(1). <https://doi.org/10.26874/jkk.v4i1.75>
- Astanti, Y. O. V., & Mardiana, N. (2025). Faktor-faktor yang berhubungan dengan kejadian skabies. *JURNAL PENELITIAN KEPERAWATAN*, 11(1), 13-22. <https://doi.org/10.32660/jpk.v11i1.798>

- Ayuningtias, R. M., Rifqatussa'adah, & Wijayanti, E. (2025). Faktor-Faktor yang Berhubungan dengan Perilaku Mahasiswa dalam Pengelolaan Sampah di Lingkungan Universitas Yarsi. *Syntax Idea*, 6(12). <https://doi.org/10.46799/syntax-idea.v6i12.11519>
- Bela, R., Ansoridani, H., & Gina, R. (2025). Penyuluhan Pembuatan Pupuk Organik dengan Bantuan Mikroorganisme Lokal (Mol) di Desa Jojog Kecamatan Pekalongan. *ANDAN JEJAMA: Indonesian Journal of Community Engagement (IJCE)*, 2(1). <https://doi.org/10.23960/ijceaj.v2i1.45>
- BERIKTEN, D., & KIVANÇ, M. (2021). Termofilik ve termotolerant filamentli fungus türlerinin endüstriyel öneme sahip enzim aktivitelerinin incelenmesi. *Biological Diversity and Conservation*. <https://doi.org/10.46309/biodicon.2021.978227>
- BFG (The Brazil Flora Group) (2021). *Coleção Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.47871/jbrj2021004>
- Budiman, M. R., Ewangga, B., & Nizrotunnisa, N. P. (2025). Efek anti-aging kulit pada ekstrak pegagan (*Centella asiatica* (L.): Aktivitas antioksidan dan molecular docking. *Medika Kartika Jurnal Kedokteran dan Kesehatan*, 12-24. <https://doi.org/10.35990/mk.v8n1.p12-24>
- Black, J. G. (2012). *Microbiology: Principles and Explorations*. Wiley.
- Cowan, M. K. (2012). *Microbiology: A Systems Approach* (3rd ed). McGraw-Hill.
- Dağbağlı, S. (2024). Ultrases İşleminin Enzim Aktivasyonu Üzerine Etkileri. *Akademik Gıda*, 22(2), 158-166. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1543682>
- Delu Pingge, H. (2022). Merdeka Belajar dengan Pendidikan Resolusi Konflik di Sekolah Dasar. *Jurnal Sekolah Dasar*, 7(1). <https://doi.org/10.36805/jurnalsekolahdasar.v7i1.1900>
- Deviana, T., & Sulistyani, N. (2021). Implementasi kuis interaktif berbasis hots berorientasi kearifan lokal daerah melalui aplikasi quizizz di sekolah dasar. *Primary: Jurnal Pendidikan Guru Sekolah Dasar*, 10(1). <https://doi.org/10.33578/jpfkip.v10i1.8174>

- Erica Yola Pramana Putri, Mulyanti, D., & Umayah, E. (2022). Kajian Potensi Penyebaran Mikroorganisme Patogen Penyebab ISPA dan Diare Berdasarkan Kondisi Geografis dan Demografis Wilayah Indonesia. *Bandung Conference Series: Pharmacy*, 2(2). <https://doi.org/10.29313/bcsp.v2i2.4676>
- Estiningtyas, R. (2022). Keragaman Bakteri Pendegradasi Polietilena di Hutan Mangrove Ambon. *BERITA BIOLOGI*, 21(3), 221-230. <https://doi.org/10.14203/beritabiologi.v21i3.4331>
- Evania, A., & Perdana, A. T. (2025). Aplikasi Mikroorganisme untuk Bioremediasi Tanah Tercemar: Suatu Tinjauan Pustaka. *Mikroba : Jurnal Ilmu Tanaman, Sains Dan Teknologi Pertanian*, 2(3), 114-126. <https://doi.org/10.62951/mikroba.v2i3.540>
- Febriana, S. S., Ahfani, D. A., Aulia, A. E., Lestari, S. A., Armada, E. G., & Maulana, I. E. (2025). Pengertian, Sejarah Dan Masalah Bimbingan dan Konseling Perkembangan. *Guidance*, 22(1), 163-177. <https://doi.org/10.34005/guidance.v22i1.4587>
- Fitrya, N., Wirman, S. P., & Halwani, P. (2023). Uji Karakteristik Elektrolit Ampas Kulit Nanas dengan Penambahan MgCl₂, NaCl, dan KCl. *Photon: Jurnal Sain dan Kesehatan*, 13(2). <https://doi.org/10.37859/jp.v13i2.4394>
- GINANJAR, S. S., & SYAM, H. (2025). Tanggung Jawab Hukum Dokter atas Kelalaiannya dalam Melakukan Pelayanan Kesehatan Pascapersalinan di Rumah Sakit yang Merugikan Pasien menurut Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2023 tentang Kesehatan. *Bandung Conference Series: Law Studies*, 5(2). <https://doi.org/10.29313/bcsls.v5i2.18543>
- Gusti, U. A., & Supriatno, B. (2023). Analisis dan rekonstruksi literasi kuantitatif desain kegiatan laboratorium struktur dan fungsi jaringan hewan berbasis ancor. *AL-TARBIYAH: Jurnal Pendidikan (The Educational Journal)*, 33(1), 16. <https://doi.org/10.24235/ath.v33i1.13583>
- Hamidah, H. N., Ramadhani, N. A., Salma, Y. N., Fitria, A. L., Zulqaida, S., & Megasari, N. L. A. (2026). Optimalisasi gizi dan pencegahan infeksi: Strategi ganda pencegahan stunting pada wanita usia reproduktif di banyuwatis, bali. *Jurnal Abdi Insani*, 13(3). <https://doi.org/10.29303/abdiinsani.v13i3.3461>

- HARNANI, B. D. (2025). Pemberdayaan Kader Kesehatan Dalam Upaya Peningkatkan Keikutsertaan Masyarakat Pada Program Pelayanan BPJS - Kesehatan Di Kabupaten Tuban. *Health Community Engagement*, 7(1). <https://doi.org/10.36568/hce.v7i1.60>
- Heriyanti, H., Lindriani, L., & Apriani, I. (2022). Faktor Yang Berhubungan dengan Perilaku Sulit Makan Pada Anak Usia Prasekolah. *Mega Buana Journal of Nursing*, 1(1), 22-33. <https://doi.org/10.59183/mbjn.v1i1.4>
- Hidayat, B., Lubis, N. A., & Sabrina, T. (2021). Pengaruh penggunaan biochar biomassa kelapa sawit terhadap aktivitas mikroorganisme pada tanah ultisol. *Jurnal Agro Estate*, 5(1), 14-24. <https://doi.org/10.47199/jae.v5i1.187>
- Hikmawati, N., Imam Sufiyanto, M., & Jamilah, J. (2023). Konsep dan implementasi kecerdasan buatan (artificial intelligence) dalam manajemen kurikulum sd/mi. *Abuya: Jurnal Pendidikan dasar*, 1(1), 1-16. <https://doi.org/10.52185/abuyavol1iss1y2023278>
- Hizawati, H., Mutiasari, D., Hanasia, H., Jelita, H., & Faradila, F. (2025). Pengaruh kecerdasan emosional terhadap tingkat pemahaman konsep mikrobiologi dasar pada mahasiswa fakultas kedokteran universitas palangka raya. *Medika Kartika Jurnal Kedokteran dan Kesehatan*, 130-140. <https://doi.org/10.35990/mk.v8n2.p130-140>
- Indri, J. (2021). Penerapan model pembelajaran sets (science envorintment technology and society) untuk meningkatkan penguasaan konsep ipa siswa. *Primary: Jurnal Pendidikan Guru Sekolah Dasar*, 10(2). <https://doi.org/10.33578/jpfkip.v10i2.8263>
- Iskandar, B. (2026). Pemanfaatan Aloe Vera sebagai Solusi Baru dalam Perawatan Hidrasi dan Regenerasi pada Kulit : Literature Review. *Majalah Farmasetika*, 11(2). <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v11i2.69148>
- Kartiwa, R., Kusumo, D. A., Indrakusuma, M. E., & Amanah, A. (2024). Pola mikroorganisme penyebab peritonitis generalisata dan profil sensitifitasnya terhadap antibiotik di rsd gunung jati 2018-2023. *Medika Kartika Jurnal*

- Kedokteran dan Kesehatan*, 352-363.
<https://doi.org/10.35990/mk.v7n4.p352-363>
- Kilikily, Y. H. J. (2025). Genosida dalam perspektif hukum internasional: Pengertian, dan yurisdiksi. *Jurnal Ilmu Hukum Sui Generis*, 5(3). <https://doi.org/10.23887/jih.v5i3.5822>
- Kiswanto, A. (2021). Penyaluran Alat Pencegahan dan Sosialisasi Protokoler Kesehatan untuk Pelayanan Kunjungan Wisatawan dalam Menghadapi New Normal Pasca Pandemi Covid-19. *Jurnal Abdimas Pariwisata*, 1(2), 38-51.
<https://doi.org/10.36276/jap.v1i2.17>
- Kurniaji, I. (2024). Penyuluhan Pembuatan Pupuk Organik Dengan Bantuan Mikroorganisme Lokal (MOL) Di Desa Jojog Kecamatan Pekalongan. *ANDAN JEJAMA: Indonesian Journal of Community Engagement (IJCE)*, 3(2).
<https://doi.org/10.23960/ijceaj.v3i2.35>
- Kurniati, H., & Tri Laksono, W. (2021). Keragaman Jenis Kodok Pegunungan Mekongga, Sulawesi Tenggara, Indonesia, dan Catatan Suara Sebagai Pembeda Jenis. *Jurnal Biologi Indonesia*, 17(2), 27-38.
<https://doi.org/10.47349/jbi/17012021/27>
- Latashilulrohima, L. (2026). Identifikasi tipe alterasi dan mineralisasi berdasarkan hasil logging inti bor, analisis xrd dan mikroskopis, daerah dmlz distrik ertsberg mimika, papua. *Journal PEP Bandung*, 2(2), 31-46.
<https://doi.org/10.65706/gm.v2i2.41>
- Lestari, T. S. (2021). Pengembangan buku belajar ejaan bahasa indonesia untuk siswa sekolah dasar. *Primary: Jurnal Pendidikan Guru Sekolah Dasar*, 10(2).
<https://doi.org/10.33578/jpkip.v10i2.8238>
- Lovitna, G., Nuraini, Y., & Istiqomah, N. (2021). Pengaruh aplikasi bakteri pelarut fosfat dan pupuk anorganik fosfat terhadap populasi bakteri pelarut fosfat, p-tersedia, dan hasil tanaman jagung pada alfisol. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 8(2), 437-449. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2021.008.2.15>
- Lutviana, L., Purwono, P., & Ashari, I. A. (2025). Pendekatan Transfer Learning dan SMOTE untuk Klasifikasi Kanker Kulit pada Imbalanced Dataset. *METHOMIKA Jurnal*

- Manajemen Informatika dan Komputerisasi Akuntansi*, 9(2), 323-331. <https://doi.org/10.46880/jmika.vol9no2.pp323-331>
- Lin, J., Manhart, M., & Amir, A. (2020). Evolution of Microbial Growth Traits Under Serial Dilution. *Genetics*, 215(3), 767–777. <https://doi.org/10.1534/genetics.120.303149>
- Liu, Y., Chang, S., Murphy, G., Ajayi-Akinsulire, E., Ardren, I., Guy, I., Johnston, K., Lee, S., & Russell, L. (2025, Mei 8). *Measurement of Bacterial Growth*. Biology LibreTexts. [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Introduction_to_Microbiology_\(Liu_et_al.\)/10%3A_Microbial_Growth/10.03%3A_Measurement_of_Bacterial_Growth](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Introduction_to_Microbiology_(Liu_et_al.)/10%3A_Microbial_Growth/10.03%3A_Measurement_of_Bacterial_Growth)
- M Nair, A., & M K, K. (2024). Isolation and identification of bacterial normal flora on skin of healthcare workers and determination of its antimicrobial susceptibility pattern. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH*, 46-48. <https://doi.org/10.36106/ijsr/5401778>
- Maharani, A. N. A., Hariyanto, H., & Mardijah, M. (2025). Pengendalian Optimal Terhadap Intensitas Cahaya dan Nutrisi pada Pertumbuhan Mikroalga dengan Menggunakan Metode Prinsip Minimum Pontryagin. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 12(6). <https://doi.org/10.12962/j23373520.v12i6.131716>
- Mardiyah, S. U. (2025). Isolasi dan Identifikasi Bakteri Rizosfer Pada Tanaman Jahe Zingiber Officinale. *Jurnal Agroteknologi dan Inovasi Pertanian*, 1(1), 1-6. <https://doi.org/10.64845/jaip.v1i1.43>
- Marsanda, A., Kusumajaya, H., & Faizal, K. M. (2025). Faktor-faktor yang berhubungan dengan kejadian tuberkulosis paru bta positif. *JURNAL PENELITIAN KEPERAWATAN*, 11(1), 114-125. <https://doi.org/10.32660/jpk.v11i1.810>
- Melyapuri Widarsiono, B., Anggraeni, L., & Damanhuri, D. (2022). Keragaman Genetik dan Heritabilitas Karakter Agronomi dan Kimiawi pada 20 Genotipe Tomat Lokal (*Solanum lycopersicum* L.). *PLANTROPICA: Journal of Agricultural Science*, 7(2), 71-81. <https://doi.org/10.21776/ub.jpt.2022.007.2.9>
- Muhammad, A. F. N., Marsigit, M., & Soeharto, S. (2021). Konsep luas daerah bangun datar sederhana melalui artefak Candi Borobudur untuk matematika sekolah dasar.

- Ethnomathematics Journal*, 2(2).
<https://doi.org/10.21831/ej.v2i2.39885>
- Mutaqin, B. K., Tasripin, D. S., Adriani, L., & Tanuwiria, U. H. (2021). Pengujian Jumlah Mikroba dan Derajat Keasaman Susu Sapi Perah yang diberi Ransum Lengkap Tersuplementasi Protein, Lemak, Mineral (PLM) dan Direct Fed Microbial. *Jurnal Sumber Daya Hewan*, 2(1), 1-4.
<https://doi.org/10.24198/jsdh.v2i1.31361>
- Mutmainah, M., Riandani, A. P., & Hasibuan, A. K. H. (2025). Analisis sifat kimia dan karakteristik sensori yoghurt nabati berbasis sari hanjeli (coix lacryma-jobi). *Pasundan Food Technology Journal*, 12(2), 75-79.
<https://doi.org/10.23969/pftj.v12i2.31306>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Aiyer, J., Buckley, D. H., Brock, T. D., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2021). *Brock Biology of Microorganisms*. Pearson.
- Nester, E. W. (Ed.). (2009). *Microbiology: A Human Perspective* (6th ed). McGraw-Hill.
- Nadia, R., Hermana, W., & Suci, D. (2023). Effect of Balancing Lemuru Fish Oil and Palm Oil on Carcass and Chemical Composition of Broiler Chicken Meat. *Jurnal Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan*, 21(1), 49-55.
<https://doi.org/10.29244/jintp.21.1.49-55>
- Nandini, A., Nuherdiana, S. D., Nagarajan, D., & Jo Shu- Chang, J. S. (2021). Optimasi Mikroorganisme (LAB) terhadap Pembentukan Asam Laktat dengan Metode Batch Fermentasi. *Akta Kimia Indonesia*, 6(2), 127.
<https://doi.org/10.12962/j25493736.v6i2.7846>
- Nirmala, E., Yuniarni, U., & Hazar, S. (2022). Pemeriksaan Karakteristik Simplisia dan Penapisan Fitokimia Simplisia dan Ekstrak Etanol Daun Suji (*Draceana angustifolia* (Medik.) Roxb.). *Bandung Conference Series: Pharmacy*, 2(2).
<https://doi.org/10.29313/bcsp.v2i2.4329>
- Nirmalasari, D., Sampoerno, P. D., & Makmuri, M. (2021). Studi etnomatematika: Eksplorasi konsep-konsep teorema pythagoras pada budaya banten. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 6(2).
<https://doi.org/10.25157/teorema.v6i2.5472>

- Nurholipah, N., & Ayun, Q. (2021). ISOLASI DAN IDENTIFIKASI *Rhizopus oligosporus* DAN *Rhizopus oryzae* PADA TEMPE ASAL BEKASI. *Jurnal Teknologi Pangan*, 15(1). <https://doi.org/10.33005/jtp.v15i1.2742>
- Nurpratiwiningsih, L., & Kurniawan, P. Y. (2021). Pengembangan media pembelajaran interaktif pada mata kuliah konsep dasar ips di perguruan tinggi. *Primary: Jurnal Pendidikan Guru Sekolah Dasar*, 10(1). <https://doi.org/10.33578/jpkip.v10i1.8082>
- Oktaviani, S. (2021). Upaya Peningkatan Kompetensi Guru dalam Menyusun Silabus dan RPP Melalui Supervisi Akademik yang Berkelanjutan. *SCHOLASTICA JOURNAL : JURNAL PENDIDIKAN SEKOLAH DASAR DAN PENDIDIKAN DASAR (Kajian Teori dan Hasil Penelitian)*, 3(2). <https://doi.org/10.31851/sj.v3i2.5327>
- Pattipeiluhu, S. (2022). Infeksi *Aeromonas hydrophila* dan Dampaknya pada Gejala Klinis dan Parameter Darah Ikan Nila *Oreochromis niloticus*. *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research*, 6(3). <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2022.006.03.2>
- Paturrahman, P., Mahmud, A. T. B. A., & Santi, S. (2025). Kualitas kimia biourin kambing peranakan etawa (pe) dengan penambahan (mikroorganisme lokal) pada level yang berbeda. *Jurnal Agroterpadu*, 4(3). <https://doi.org/10.35329/ja.v4i3.6229>
- Permana, S. F. N., & Syam, M. H. (2022). Pengelolaan Limbah Medis Rumah Sakit Dihubungkan dengan Undang-Undang No. 44 Tahun 2009 tentang Rumah Sakit dan Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Bandung Conference Series: Law Studies*, 2(2). <https://doi.org/10.29313/bcsls.v2i2.2708>
- Prasasti, Z. S., & Juanita, S. (2026). Perbandingan SVM dan Logistic Regression untuk Klasifikasi Teks Konsultasi Daring Kehamilan dan Menstruasi. *Infotek : Jurnal Informatika dan Teknologi*, 9(2), 651-662. <https://doi.org/10.29408/jit.v9i2.35011>
- Pratiwi, N., Adzan, G. E., & Wijayanti, Z. (2025). Tata Kelola Adaptif dalam Pencegahan dan Pengendalian Kebakaran

- Hutan dan Lahan di Kabupaten Muaro Jambi. *Jurnal Publisitas*, 12(1), 92-104.
<https://doi.org/10.37858/publisitas.v12i1.589>
- Purwadianto, D. (2022). Kinerja mesin pengering dan pengaruh kipas terhadap lamanya waktu pengeringan Jamur Kuping. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 14(2).
<https://doi.org/10.28989/angkasa.v14i2.1252>
- Putra, I. P. H. S. (2026). Pertanggungjawaban Perawat Terhadap Pasien Dalam Pelayanan Kesehatan Di Rumah Sakit. *Collegium Studiosum Journal*, 8(2).
<https://doi.org/10.56301/csj.v8i2.2015>
- Patil, H. V., Mane, P. M., & Pawar, S. K. (2024). Microbial Biotechnology: Applications in Industry and Medicine. *African Journal of Biological Sciences*, 6(1).
<https://www.afjbs.com/uploads/paper/aa08da590898d7e36d12f191135edeed.pdf>
- Rachmawati, N., & Soegianto, A. (2025). Uji Keragaman Genetik pada Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.). *PLANTROPICA Journal of Agricultural Science*, 10(1), 87-93. <https://doi.org/10.21776/ub.jpt.2025.010.1.9>
- Rahim, U. M., Ariyanti, F., Nurrizka, R. H., & Wardani, R. K. (2026). Studi Responsivitas Sistem Kesehatan dalam Pelayanan Tuberkulosis di Puskesmas Tangerang Selatan, Indonesia. *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*, 14(2s), 43-53.
<https://doi.org/10.33221/jikm.v14i2s.4477>
- Rahman, A., Dewi, E., & Sutarmo, S. (2025). Konsep Dasar Pendidikan Islam dan Relevansinya terhadap Pendidikan Modern. *Instructional Development Journal*, 8(2).
<https://doi.org/10.24014/idj.v8i2.38087>
- Rahmayanti, A., Yerizam, M., & Dewi, E. (2022). Pemanfaatan Ampas Tebu dan Kulit Jagung sebagai Bahan Baku Pulp dengan Proses Organosolv. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 2(8). <https://doi.org/10.52436/1.jpti.196>
- Reno, Samadhi, T. W., Wulandari, W., & Amraini, S. Z. (2023). Analisis Ekonomi Awal Proses Produksi Biobutanol dari Tandan Kosong Sawit dengan Proses Hidrolisis dan Fermentasi Secara Terpisah. *Jurnal Teknik: Media*

- Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 21(2), 124-134.
<https://doi.org/10.55893/jt.vol21no2.447>
- Rif'atunidaudina, R. (2026). Eksplorasi dan Identifikasi Keragaman Genetik Terung Asam (*Solanum lasiocarpum* Dunal) Asal Riau Berdasarkan Karakter Morfolog. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 17(1), 1-12. <https://doi.org/10.29244/jhi>.
- Rinanti, T., Herlina, N., & Rifianto, A. (2021). Efek Populasi terhadap Pertumbuhan dan Hasil serta Fase Perkembangan Tiga Varietas Jagung Manis (*Zea mays* var. *Saccharata*) di Dataran Menengah. *PLANTROPICA: Journal of Agricultural Science*, 6(1), 1-10.
<https://doi.org/10.21776/ub.jpt.2020.006.1.1>
- Rini, C. S. (2025). Peningkatan Keterampilan Siswa Pada Pemeriksaan Mikrobiologi Air Minum Di SMK Muhammadiyah 1 Pandaan. *Jurnal Abdimas Kartika Wijayakusuma*, 6(2). <https://doi.org/10.26874/jakw.v6i2.876>
- Risal, M., Mahmud, A. T. B. A., & Rab, S. A. (2025). Kualitas fisik biourin kambing peranakan etawa (pe) dengan penambahan mikroorganisme lokal (mol) pada level berbeda. *Jurnal Agroterpadu*, 4(3). <https://doi.org/10.35329/ja.v4i3.6280>
- Rofikoh, A. (2026). Edukasi Pencegahan Penyakit Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) di Desa Tanjung Kurung Kecamatan Abab Kabupaten Penungkal Abab Lematang Ilir (PALI). *Jurnal Pengabdian Kader Bangsa*, 95.
<https://doi.org/10.54816/jpkb.v2i2.907>
- Rosnaeni, R. (2021). Karakteristik dan Asesmen Pembelajaran Abad 21. *Jurnal Basicedu*, 5(5), 4341-4350.
<https://doi.org/10.31004/basicedu.v5i5.1548>
- Sahsiny, J. J., Baba Haizal, M. W., Mohd Razali, N. A. N., Ragunathan, T., & Sheikh Abdullah, S. R. (2021). Adsorption Efficiency Comparison of Activated Carbon Derived from Various Herbs. *Jurnal Kejuruteraan*, 33(3), 593-621.
[https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33\(3\)-19](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(3)-19)
- Saraswati, M., & Setiawan, S. (2021). Desain Perhiasan Keramik Kombinasi Logam Dengan Inspirasi Flora dan Fauna Khas Jawa Barat. *Jurnal Desain Indonesia*, 57-65.
<https://doi.org/10.52265/jdi.v3i1.90>

- Sa'adah, F. L., Kusmiyati, F., & Anwar, S. (2022). Karakterisasi keragaman dan analisis kekerabatan berdasarkan sifat agronomi jagung berwarna (*Zea mays* L.). *Jurnal Ilmiah Pertanian*, 19(2). <https://doi.org/10.31849/jip.v19i2.9768>
- Setiawan, F., & Sukamto, S. (2021). Implementasi Kampus Mengajar Perintis (KMP) sebagai Cikal Bakal Penggerak Pembelajaran Literasi dan Numerasi di Sekolah Dasar. *Primary: Jurnal Pendidikan Guru Sekolah Dasar*, 10(2). <https://doi.org/10.33578/jpkip.v10i2.8251>
- Setiyawan, A. S., Widodo, H. T., Putri, D. W., & Zaelani, M. (2021). Kriteria Lokasi Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja dan Optimasi Cakupan Layanan Menggunakan Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus Kota Bandung). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 27(1), 19-33. <https://doi.org/10.5614/j.tl.2020.27.1.2>
- Sri Rizki, F., & Ferdinand, A. (2021). Isolasi dan identifikasi senyawa flavonoid ekstrak etanol pandan hutan jenis baru freycinetia sessiliflora rizki. *Jurnal Insan Farmasi Indonesia*, 4(1), 1-6. <https://doi.org/10.36387/jifi.v4i1.642>
- Sriwijaya Soedjadi, P., Ubaidah, Sari, G. W., & Kurniawan, A. (2025). Strategi Pemanfaatan Mikroorganisme Lokal Dalam Pengendalian Hama Ramah Lingkungan Berbasis Eko-Pestisida Dari Limbah Sawit. *ANDAN JEJAMA: Indonesian Journal of Community Engagement (IJCE)*, 4(1). <https://doi.org/10.23960/ijceaj.v4i1.29>
- Sudaryati Soeka, Y., & Sulistiani (2021). Peningkatan Kualitas Tepung Jali (*Coix lacryma-jobi* L.) melalui Fermentasi Menggunakan Bakteri Amilolitik-Selulolitik dan Bakteri Asam Laktat Terseleksi. *Jurnal Biologi Indonesia*, 17(1), 67-79. <https://doi.org/10.47349/jbi/17012021/67>
- Sugianto, A., & Sholihah, A. (2021). Pengawetan dan Pemberian Nilai Tambah Produk Jamur Tiram Putih Menjadi Sate dan Bakso Jamur. *Abdimas: Jurnal Pengabdian Masyarakat Universitas Merdeka Malang*, 6(2). <https://doi.org/10.26905/abdimas.v6i2.5174>
- SUKAJAYA, I. G. N. A. S. (2025). Pop-Up Book Satua Bali I Pengangon Bebek Untuk Meningkatkan Literasi Budaya

- Siswa Sekolah Dasar. *Jurnal Ilmiah Sekolah Dasar*, 9(1).
<https://doi.org/10.23887/jisd.v9i1.91620>
- Suriyani, N., Aquari, B., Ernawati, W., & Handayani, S. (2025). Faktor yang berhubungan dengan kejadian hipertensi dalam kehamilan di updt puskesmas burnai mulya kabupaten oku timur tahun 2024. *Jurnal Teknologi Kesehatan (Journal of Health Technology)*, 21(2).
<https://doi.org/10.29238/jtk.v21i2.2770>
- Suryani, S. M., & Hardiyantari, O. (2023). Pengembangan Multimedia Pembelajaran Interaktif Berbasis Android pada Mata Pelajaran Dasar-Dasar Program Keahlian Kelas X TKJ. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 3(5).
<https://doi.org/10.52436/1.jpti.280>
- Suryaningsih, S. (2026). Pengembangan Paket Pembelajaran Dasar-dasar Peternakan. *Jurnal Pendidikan Humaniora*, 4(2).
<https://doi.org/10.17977/2442-3890.1366>
- Syahniar, R., Nabila, A. N., Kharisma, D. S., & Akbar, M. A. (2021). Comparison between monotherapy and combination therapy among inpatients with community-acquired pneumonia. *Jurnal Ilmiah Farmasi*, 17(1), 56-63.
<https://doi.org/10.20885/jif.vol17.iss1.art6>
- Tanti, A., Retnani, Y., & Soesanto, I. (2023). Effect Dietary Garlic Processed on Performance and Intestinal of Broilers. *Jurnal Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan*, 21(1), 63-68.
<https://doi.org/10.29244/jintp.21.1.63-68>
- Teftae, O. Y. K., Noywuli, N., Noa, M., & Simo, D. (2025). Pengaruh Pemberian Pupuk Kotoran Sapi Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kentang (*Solanum Tuberosum* L.) Varietas Granola. *Agriculture*, 20(1), 1-18.
<https://doi.org/10.36085/agrotek.v20i1.8285>
- Türköz, B., Özçelik, A., & Karacabey, E. (2024). Gıda Endüstrisinde İmmobilize Enzim Uygulamaları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1487845>
- Udia, B. A. A. A., Rusmin, D., Fatmawaty, A. A., Hermita, N., & Syukur, C. (2021). Mutu fisik dan fisiologis bibit setek berakar vanili pada berbagai jenis media dan lama periode

- simpan. *Kultivasi*, 20(2).
<https://doi.org/10.24198/kultivasi.v20i2.32698>
- Ulandari, T., & Usman, U. (2026). Tujuan Tujuan Pendidikan Dasar Islam dalam Perspektif Insan Kamil: Kajian terhadap Konsep Subjek Pendidikan Islam. *Dirasat: Jurnal Manajemen dan Pendidikan Islam*, 12(1).
<https://doi.org/10.26594/dirasat.v12i1.6461>
- Virna, L., Rahman, N. A., Khoirunnisa, R., Rinaldi, Y. G., & Sopiah, P. (2025). Pemeriksaan kontaminasi silang pada pemeriksaan spesimen saliva pada penyakit hiv: Literatur review. *Intan Husada : Jurnal Ilmiah Keperawatan*, 13(02), 213-226.
<https://doi.org/10.52236/ih.v13i2.741>
- Wahyudi, R., & Nugroho, H. (2022). Mengaburnya Ruang Publik dan Ruang Privat dalam Praktik Konsumsi Media Baru. *Jurnal Komunikasi*, 16(2), 101-112.
<https://doi.org/10.20885/komunikasi.vol16.iss2.art1>
- Wahyuni, N. (2021). Analisis implementasi standar pelayanan minimal bidang kesehatan di puskesmas curug, kota serang. *JOURNAL OF BAJA HEALTH SCIENCE*, 1(02), 179-190.
<https://doi.org/10.47080/joubahs.v1i02.1501>
- Wanti, N. R., Shovitri, M., & Kuswyasari, N. D. (2023). Konversi Limbah Baglog Menjadi Media Tanam dengan Menggunakan Mikroorganisme Lokal (MOL). *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 11(5). <https://doi.org/10.12962/j23373520.v11i5.104699>
- Wijaya, A., & Fajriani, S. (2022). Pertumbuhan Dan Hasil Selada (*Lactuca sativa* L.) Pada Metode Hidroponik Sistem Sumbu Dengan Kerapatan Naungan Dan Konsentrasi Nutrisi Yang Berbeda. *Produksi Tanaman*, 010(10), 541-549.
<https://doi.org/10.21776/ub.protan.2022.010.10.02>
- Wiyono, G., & Kirana, K. C. (2021). Digital Transformation of SMEs Financial Behavior in the New Normal Era. *Jurnal Keuangan dan Perbankan*, 25(1).
<https://doi.org/10.26905/jkdp.v25i1.4954>
- Wulan, D. A., Mardlijah, M., & Haryanto, H. (2025). Optimasi Pertumbuhan Mikroalga dengan Kendali Intensitas Cahaya, Karbondioksida, dan Nutrisi Limbah Cair Tahu. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 12(5).
<https://doi.org/10.12962/j23373520.v12i4.142080>

- Wiley, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2014). *Prescott's Microbiology* (9th ed.). McGraw-Hill Companies.
- Yenolinsky, Y., Kharisma, Y., & Nur, I. M. (2024). Perbandingan Micronucleus dan Karyorrhexis pada Mukosa Lidah Perokok. *Jurnal Riset Kedokteran*, 85-92. <https://doi.org/10.29313/jrk.v4i2.5024>
- Yulaikah, I., Rahayu, S., & Parlan, P. (2022). Efektivitas Pembelajaran STEM dengan Model PjBL Terhadap Kreativitas dan Pemahaman Konsep IPA Siswa Sekolah Dasar. *Jurnal Pendidikan: Teori, Penelitian, dan Pengembangan*, 7(6), 223-229. <https://doi.org/10.17977/2502-471x.2477>
- Yuliana, Y. (2022). Pentingnya Kewaspadaan Berinternet untuk Kesehatan Mental Anak dan Remaja. *Jurnal Ilmu Medis Indonesia*, 2(1), 25-31. <https://doi.org/10.35912/jimi.v2i1.1218>

LAMPIRAN: KUNCI JAWABAN

Kunci Jawaban BAB 1

a. Essay

1. Kesalahan terapi antibiotik pada infeksi virus terjadi karena antibiotik hanya menargetkan struktur seluler bakteri (seperti dinding sel), sedangkan virus bersifat aseluler. Hal ini membahayakan pasien dan mempercepat laju resistensi bakteri di lingkungan klinik.
2. Metode BTA di Puskesmas unggul dalam kecepatan diagnosis cepat dan efisiensi biaya di daerah terpencil. Sebaliknya, metode kultur murni berdasarkan Postulat Koch jauh lebih akurat namun memerlukan waktu berminggu-minggu serta fasilitas laboratorium canggih yang kurang aplikatif untuk penanganan darurat.
3. Cacing gelang mengonsumsi nutrisi hasil pencernaan inang di usus halus. Invasi fisiknya merusak mukosa usus, mengganggu penyerapan zat besi dan makronutrien, sehingga menyebabkan inang mengalami anemia kronis, malnutrisi, dan hambatan tumbuh kembang (stunting) pada anak.
4. Strategi komprehensif meliputi pengobatan penderita, pemutusan rantai penularan dengan membasmi inang perantara (vektor) di lingkungan, serta perbaikan sanitasi. Terapi massal saja tidak cukup karena pasien dapat terinfeksi kembali jika inang perantara dan reservoir parasit di lingkungan tetap eksis.
5. Postulat Koch membuktikan biogenesis dengan mensyaratkan isolasi agen spesifik dari tubuh sakit ke kultur murni untuk mereproduksi penyakit. Prinsip kultur murni ini mendasari teknik isolasi bakteri modern di laboratorium rumah sakit guna mengidentifikasi patogen penyebab infeksi secara presisi.

c. Pilihan Ganda

1. C.
2. E.
3. B.
4. C.
5. D.

6. B.
7. C.
8. D.
9. B.
10. B.

c. Studi Kasus / Proyek

1. Lakukan pemeriksaan sediaan basah tinja segar menggunakan mikroskop untuk mengidentifikasi adanya telur cacing, kista, atau trofozoit protozoa secara langsung. Secara paralel, lakukan pewarnaan Gram pada usapan tinja untuk mengevaluasi dominasi morfologi bakteri patogen. Rekomendasi teknis meliputi pemeriksaan tinja dalam waktu maksimal dua jam pasca-defekasi atau penggunaan media transport dan pengawet khusus guna menjaga viabilitas bakteri serta keutuhan struktural parasit.
2. Terapi Albendazole hanya mengeliminasi cacing dewasa di usus saat pengobatan berlangsung, namun infeksi ulang akan segera terjadi melalui telur cacing di tanah akibat sanitasi buruk. Rekomendasi program terdepan meliputi integrasi POPM berkala, pembangunan fasilitas MCK sehat di pemukiman, penyediaan air bersih, serta kampanye edukasi pemakaian alas kaki dan cuci tangan sebelum makan guna menghentikan transmisi secara total.

Kunci Jawaban BAB 2

a. Essay

1. Sekresi asam organik (sitrat/laktat) menurunkan pH mikro tanah Alfisol, melepaskan ikatan kation dengan fosfat sehingga menjadi larut. Zona bening pada media Pikovskaya membuktikan kemampuan disolusi fosfat tak larut secara visual dan kualitatif-kuantitatif melalui pengukuran indeks kelarutan.
2. Gram-positif memiliki peptidoglikan tebal tanpa membran luar, sehingga penisilin mudah menjangkau dan menghambat enzim transpeptidase pembuat ikatan silang murein. Gram-negatif memiliki membran luar (LPS/porin) yang bertindak sebagai penghalang hidrofobik, mencegah penetrasi obat berukuran besar.

3. *Pseudomonas aeruginosa* memiliki membran luar yang kaya akan lipopolisakarida dan protein porin selektif, menghalangi difusi antibiotik berspektrum sempit. Penanganan klinis memerlukan antibiotik berspektrum luas yang dirancang khusus melewati membran luar, seperti sefalosporin generasi ketiga atau karbapenem.
4. Kecepatan pembelahan biner memicu pertumbuhan populasi yang sangat cepat untuk mendominasi lingkungan. Diversitas metabolisme (seperti kemolitotrof) memungkinkan bakteri menggunakan senyawa pencemar anorganik sebagai donor elektron, mendetoksifikasi logam berat, atau menguraikan sisa pupuk kimia menjadi senyawa ramah lingkungan.
5. Morfologi kokus meminimalkan luas permukaan terhadap volume untuk menahan kekeringan, basil memaksimalkan penyerapan nutrisi, sedangkan spiral mempermudah pergerakan di cairan kental. Susunan sel (seperti streptokokus) memperkuat adhesi kelompok pada permukaan inang untuk mempermudah kolonisasi dan menahan aliran hidrodinamika.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Isolasi bakteri tanah Alfisol dilakukan menggunakan media selektif Pikovskaya untuk menyaring bakteri pelarut fosfat (BPF). Isolat terbaik dipilih berdasarkan rasio diameter zona bening terbesar terhadap diameter koloni. Bakteri unggul diaplikasikan ke tanah untuk menyekresikan asam organik (sitrat,

- laktat) yang mengelat kation pengikat fosfat, membebaskan ortofosfat larut yang siap diserap akar jagung.
2. Kegagalan penisilin disebabkan oleh barrier membran luar Gram-negatif (*P. aeruginosa*) yang mencegah obat mencapai peptidoglikan tipis di periplasma. Rekomendasi terapinya adalah menggunakan sefalosporin generasi ketiga atau karbapenem. Antibiotik ini memiliki struktur kimia yang dimodifikasi sehingga mampu melewati protein porin membran luar untuk menghambat sintesis peptidoglikan secara efektif.

Kunci Jawaban BAB 3

a. Essay

1. Keberhasilan PPI menurunkan kejadian IADP, sehingga meminimalkan penggunaan antibiotik spektrum luas. Hal ini menekan tekanan selektif ekologis pada mikroba, yang secara langsung menghambat mutasi dan penyebaran bakteri resisten seperti *E. coli* penghasil ESBL.
2. Intervensi metode transmisi bersifat non-farmakologis (seperti cuci tangan), murah, dan mudah diterapkan massal. Sebaliknya, mengintervensi penjamu rentan memerlukan tindakan klinis rumit, nutrisi khusus, atau imunisasi yang memakan biaya besar serta waktu lama.
3. Karakteristik biologi dan taksonomi menentukan resistensi fisikokimia mikroba (misalnya bakteri berspora vs vegetatif). Pemahaman ini memastikan pemilihan agen disinfektan dan suhu sterilisasi yang tepat, guna menghindari kegagalan eliminasi patogen pada alat medis.
4. Malnutrisi menurunkan sistem imun, mempertinggi sensitivitas penjamu terhadap infeksi. Pemberdayaan kader kesehatan melokalisasi edukasi preventif sejak dini di komunitas, sehingga menekan jumlah rujukan kasus infeksi akut ke fasilitas pelayanan rujukan sekunder.
5. Kegagalan tersebut melanggar Undang-Undang Kesehatan tentang hak keselamatan pasien. Dampaknya meliputi peningkatan risiko paparan patogen pada perawat (ancaman keselamatan kerja) serta tuntutan hukum perdata/pidana atas kelalaian pelayanan medis bagi rumah sakit.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. *Analisis:* Komponen paling berkontribusi adalah "metode transmisi" (kontak tidak langsung akibat rendahnya higienitas tangan petugas dan lingkungan kotor) serta "pintu masuk" (kateter). *Rekomendasi:* Mengadakan kampanye kepatuhan cuci tangan, memastikan ketersediaan antiseptik di setiap tempat tidur pasien, membuat jadwal disinfeksi lingkungan ICU yang ketat, dan menerapkan teknik aseptik ketat saat pemasangan serta perawatan kateter.
2. *Analisis:* Malnutrisi meningkatkan kerentanan "penjamu" (balita), yang diperparah oleh "metode transmisi" droplet lewat udara akibat etika batuk buruk dan ventilasi minim. *Rekomendasi:* Melatih kader untuk mengedukasi etika batuk, mendorong modifikasi ventilasi rumah sederhana, serta mengintegrasikan edukasi pencegahan infeksi dengan program pemberian makanan tambahan untuk memperbaiki imunitas penjamu.

Kunci Jawaban BAB 4

a. Essay

1. Flora residen beradaptasi secara evolusioner dan terikat kuat pada reseptor keratinosit, sehingga sulit hilang dengan cuci tangan biasa dan memerlukan antiseptik kimia (disinfeksi bedah). Flora transien berada di permukaan epidermis, tidak berikatan kuat, sehingga mudah dihilangkan secara mekanis dengan sabun biasa (cuci tangan sosial).

2. Eksklusi kompetitif mencegah patogen berkolonisasi melalui perebutan nutrisi, penguasaan reseptor adhesi epitel, dan sekresi antimikroba (asam lemak, bakteriosin). Gangguan keanekaragaman mikrobiota menghilangkan hambatan biologis ini, memberi peluang bagi patogen untuk berkolonisasi dan memicu infeksi oportunistik.
3. Area sebasea kaya lipid dan anaerob parsial, mendukung dominasi bakteri lipofilik (*Cutibacterium acnes*). Area lembap tinggi kadar air, didominasi *Staphylococcus epidermidis* dan *Corynebacterium* spp. Produk pelarut lipid menghilangkan barier pelindung alami, mengganggu keseimbangan mikroekologi, dan menginduksi dysbiosis.
4. Paparan kronis asap rokok meningkatkan akumulasi debris organik dan menurunkan kadar oksigen di rongga mulut. Kondisi anoksik ini memicu pergeseran flora normal rongga mulut dari bakteri aerob menjadi bakteri anaerob oportunistik, yang merusak jaringan periodontal dan memicu peradangan.
5. Ekstrak *Enhalus acoroides* dan *Aloe vera* bekerja dengan meningkatkan hidrasi stratum korneum dan mendukung regenerasi sel keratinosit tanpa merusak lipid pelindung kulit. Hal ini mempertahankan stabilitas reseptor fisik tempat menempelnya flora residen, berbeda dengan antiseptik keras yang mengganggu seluruh mikroekologi kulit.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Infeksi terjadi karena perawat hanya melakukan cuci tangan sosial dengan sabun biasa yang hanya mengeliminasi flora transien pada epidermis. Flora residen seperti *Staphylococcus epidermidis* yang berada di lapisan kulit lebih dalam tetap bertahan dan terikat kuat pada reseptor keratinosit. Rekomendasi langkah korektif: lakukan disinfeksi bedah menggunakan bahan antiseptik kuat (seperti klorheksidin atau iodofor) untuk menekan populasi flora residen sebelum melakukan tindakan invasif.
2. Pembersih keras melarutkan lipid pelindung kulit dan meningkatkan pH, sehingga merusak barier fisik dan membunuh flora residen pelindung (terjadi dysbiosis). Akibatnya, patogen oportunistik mudah berkolonisasi. Penggunaan gel *Aloe vera* atau ekstrak *Enhalus acoroides* memulihkan homeostasis dengan meningkatkan hidrasi keratinosit, memperbaiki lipid pelindung, serta menyediakan mikrolingkungan yang kondusif bagi pembentukan kembali flora residen yang sehat.

Kunci Jawaban BAB 5

a. Essay

1. Pergeseran profil Th1 ke Th2 menurunkan imunitas seluler maternal yang bertugas mengeliminasi patogen intraseluler. Akibatnya, parasit oportunistik seperti *Toxoplasma gondii* lebih mudah bereplikasi secara hematogen dan menginvasi plasenta tanpa hambatan imunologis yang adekuat.
2. *P. falciparum* merusak plasenta secara vaskular melalui sekuestrasi eritrosit terinfeksi di ruang interviler via ikatan PfEMP1-VAR2CSA dan CSA, memicu inflamasi lokal. Sebaliknya, *T. gondii* merusak secara seluler melalui invasi langsung, replikasi takizoit intraseluler di trofoblas, dan penetrasi barier.
3. Sekuestrasi eritrosit terinfeksi memicu akumulasi monosit dan pelepasan sitokin pro-inflamasi di plasenta. Kerusakan endotel vaskular dan gangguan aliran darah utero-plasenta ini mengganggu homeostasis vaskular sistemik, yang secara patofisiologis menyerupai jalur inflamasi pada preeklamsia.
4. Cacing tambang menempel pada mukosa usus, mengonsumsi darah secara konstan menggunakan enzim antikoagulan. Ketika

- kehilangan darah kronis ini bertemu dengan hemodilusi fisiologis kehamilan, cadangan besi terkuras habis, memicu anemia ekstrem.
5. Skrining antenatal harus bersifat aktif menggunakan tes diagnostik cepat (RDT) sensitif atau PCR di daerah endemik, dipadukan dengan pemetaan daerah risiko tinggi berbasis data ekologis vektor, serta pemantauan kadar hemoglobin secara berkala sejak trimester pertama.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Sekuestrasi di plasenta menyembunyikan parasit dari sirkulasi sistemik sehingga tidak memicu demam sistemik yang khas. Langkah diagnostik: lakukan pemeriksaan apusan darah tebal/tipis, RDT malaria, atau PCR. Asuhan: berikan terapi antimalaria standar kehamilan sesuai trimester, suplemen zat besi, dan pemantauan ketat kesejahteraan janin melalui USG untuk mendeteksi hambatan pertumbuhan.
2. Risiko ganda: anemia berat yang memicu hipoksia janin, kelahiran prematur, berat badan lahir rendah (BBLR), dan perdarahan postpartum pada ibu. Rekomendasi intervensi: edukasi penggunaan alat pelindung diri (sepatu bot karet) saat bekerja di lahan basah, perbaikan sanitasi jamban keluarga, pembiasaan mencuci tangan dengan sabun, serta terapi antitelur cacing yang aman setelah trimester pertama.

Kunci Jawaban BAB 6

a. Essay

1. Virus memanfaatkan organel sel inang untuk bereplikasi. Oleh karena itu, obat antiviral harus dirancang sangat selektif agar hanya menghambat proses spesifik virus tanpa merusak atau meracuni mesin metabolisme sel normal tubuh inang manusia.
2. Kitin menyusun dinding luar untuk kekuatan mekanis, sementara ergosterol menjaga stabilitas membran dalam. Obat antifungi dapat menargetkan biosintesis ergosterol secara spesifik karena membran sel manusia menggunakan kolesterol, bukan ergosterol, sehingga meminimalkan efek toksik.
3. SAR harus segera diberikan untuk menetralkan virus di luka sebelum menempel pada saraf. Jika terlambat, virus akan melakukan migrasi retrograd ke otak, melakukan replikasi masif yang menyebabkan kerusakan saraf pusat fatal dan kematian.
4. Laju mutasi tinggi pada ssRNA positif DENV menghasilkan empat serotipe berbeda. Hal ini mempersulit pembuatan vaksin yang protektif terhadap semua serotipe sekaligus, namun deteksi antigen NS1 tetap andal karena disekresikan konstan saat replikasi awal.
5. Klasifikasi Baltimore lebih efektif karena mengelompokkan virus berdasarkan jalur sintesis mRNA dan tipe genom. Hal ini memberikan prediksi langsung mengenai enzim replikasi spesifik yang dapat dijadikan target sasaran obat antivirus baru.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Puskesmas harus memilih kit antigen NS1. Protein NS1 disekresikan secara aktif sejak hari pertama replikasi virus (fase akut). Sementara itu, antibodi IgM/IgG baru terbentuk beberapa hari setelahnya, sehingga deteksi antibodi pada hari kedua demam akan menghasilkan negatif palsu.
2. Pemberian SAR langsung di sekitar luka sangat mendesak. Antibodi dalam SAR akan mengikat glikoprotein amplop virus rabies, mencegah adsorpsi virus pada reseptor asetilkolin nikotinik di saraf perifer. Hal ini menghentikan migrasi retrograd virus ke sistem saraf pusat sebelum terjadi replikasi mematikan.

Kunci Jawaban BAB 7

a. Essay

1. Fluktuasi oksigen mengubah akseptor elektron terminal dari aerobik ke anaerobik. Penambahan biochar menyediakan matriks konduktif untuk transfer elektron ekstraseluler, mempercepat respirasi anaerobik bakteri pendegradasi hidrokarbon pada kondisi minim oksigen.
2. Parameter K_m membantu mendesain konsentrasi substrat optimum agar enzim bekerja efisien, sedangkan V_{max} memandu penentuan laju alir reaktor kontinu untuk mengeluarkan produk penghambat secara cepat guna menghindari penurunan laju akibat inhibisi umpan balik.
3. Jalur EMP menghasilkan 2 ATP dan 2 NADH per molekul glukosa, sedangkan jalur ED hanya menghasilkan 1 ATP, 1 NADH, dan 1 NADPH. Mikroorganisme pengguna EMP lebih dipilih untuk industri karena efisiensi energi pertumbuhan biomassa jauh lebih tinggi.
4. Ultrasonik menggetarkan ikatan non-kovalen enzim untuk membuka sisi aktifnya sehingga meningkatkan V_{max} . Sinergi dengan imobilisasi pada matriks padat menjaga stabilitas konformasi aktif ini agar tahan terhadap degradasi dan suhu tinggi proses sakarifikasi.
5. Muatan energi seluler mencerminkan status kesehatan fisiologis populasi mikroba. Evaluasi berkala memastikan sel memiliki cadangan ATP yang memadai untuk beradaptasi dan melakukan

anabolisme sebelum dihadapkan pada fluktuasi nutrisi limbah pertanian yang kompleks.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Rekomendasi terbaik adalah mengaplikasikan biochar kelapa sawit lokal. Secara termodinamika, meskipun respirasi anaerobik menghasilkan energi lebih rendah daripada aerobik, penggunaan biochar sebagai matriks konduktif ekstraseluler mempercepat transfer elektron anaerobik secara signifikan tanpa biaya aerasi mekanis yang mahal. Ini adalah solusi berkelanjutan, layak secara ekonomi, dan memanfaatkan limbah lokal secara efisien.
2. Strateginya adalah mengonversi reaktor batch menjadi *continuous stirred-tank reactor* (CSTR) yang terintegrasi dengan sistem ekstraksi butanol secara terus-menerus. Dengan mengeluarkan butanol (produk sampingan), konsentrasi inhibitor di dalam reaktor tetap berada di bawah ambang batas kritis. Kinetika enzimatik akan kembali optimal mendekati laju maksimum (V_{max}) karena sisi aktif enzim tidak lagi jenuh terikat oleh produk yang menumpuk.

Kunci Jawaban BAB 8

a. Essay

1. Penambahan nitrogen dan fosfor menurunkan rasio C yang terlampaui tinggi akibat polutan hidrokarbon. Hal ini mengatasi keterbatasan nutrisi pembatas, meningkatkan pembelahan sel,

- viabilitas, dan aktivitas enzimatis bakteri indigenus dalam mendegradasi rantai karbon minyak bumi secara optimal.
2. Media kompleks sangat efektif untuk bakteri *fastidious* karena menyediakan faktor tumbuh siap pakai dari ekstrak organik, sedangkan media sintetik sulit memenuhi kebutuhan tersebut. Namun, media sintetik lebih unggul dalam konsistensi formula dan akurasi analisis fisiologis spesifik.
 3. Formulasi memanfaatkan bio-urin terencerkan sebagai sumber nitrogen dan kalium organik, dikombinasikan dengan molase sebagai sumber karbon. Parameter fisikokimia yang dikontrol meliputi pH netral (6,8–7,2), suhu hangat (30–35°C), dan aerasi konstan untuk mendukung bakteri pelarut fosfat.
 4. Garam empedu dan kristal violet menghambat Gram-positif (selektif). Laktosa dan merah netral membedakan fermenter laktosa (koloni merah akibat akumulasi asam hasil metabolisme yang menurunkan pH) dengan non-fermenter seperti *Salmonella* yang koloninya tetap transparan (diferensial).
 5. Mikroalga adalah fotoautotrof yang membutuhkan energi cahaya, karbon dioksida, dan kontrol parameter fisikokimia seperti konduktivitas listrik. Bakteri asam laktat adalah kemoheterotrof anaerobik/mikroaerofilik yang memerlukan nutrisi organik kompleks (karbon, pepton, ragi) untuk fermentasi metabolisme penghasil asam laktat.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Ketiadaan MacConkey Agar menghambat pemisahan cepat bakteri enterik dari flora normal. Strategi alternatifnya adalah mengkultur sampel pada Blood Agar untuk mengamati pola hemolisis, kemudian melakukan pewarnaan Gram pada koloni yang tumbuh. Evaluasi konsekuensinya adalah peningkatan risiko hasil positif palsu dan dibutuhkannya uji biokimia manual tambahan (seperti uji IMViC) yang memperlambat diagnosis.
2. Formulasi media memanfaatkan bio-urin kambing terencerkan (sumber nitrogen) yang diperkaya air cucian beras atau molase (sumber karbon). Rasio C:N harus seimbang agar bakteri tumbuh optimal. Langkah meminimalkan kontaminasi meliputi perebusan media lokal sebelum inokulasi, penggunaan wadah tertutup bersumbat aerasi steril kapas, dan sterilisasi alat menggunakan uap air panas sederhana.

Kunci Jawaban BAB 9

1. Jawaban: B – Pembelahan biner

Pembelahan biner adalah cara utama bakteri bereproduksi. DNA digandakan, dipisahkan, lalu terbentuk septum sehingga menghasilkan dua sel anak identik.

2. Jawaban: B – Waktu generasi

Waktu generasi adalah periode yang dibutuhkan satu sel untuk membelah menjadi dua. Konsep ini penting untuk memahami kecepatan pertumbuhan populasi.

3. Jawaban: B – Fase lag

Pada fase lag, sel belum bertambah jumlahnya tetapi sedang beradaptasi dengan medium baru, mensintesis enzim dan komponen sel.

4. Jawaban: B – Mesofil

Mesofil tumbuh optimal pada suhu 20–45°C. Suhu tubuh manusia (37°C) sesuai dengan kisaran ini, sehingga sebagian besar patogen manusia adalah mesofil.

5. Jawaban: B – Aerob obligat

Aerob obligat membutuhkan oksigen sebagai akseptor elektron terakhir dalam respirasi aerob. Tanpa oksigen, mereka tidak bisa hidup.

6. Jawaban: A – EPS

Biofilm tersusun atas Extracellular Polymeric Substances (EPS) berupa polisakarida, protein, glikolipid, dan DNA yang melindungi komunitas mikroba.

7. Jawaban: B – Plate count

Plate count menghitung sel hidup yang membentuk koloni pada agar. Hasilnya dinyatakan dalam CFU (Colony Forming Unit).

8. Jawaban: B – Neutrofil

Neutrofil tumbuh optimal pada pH mendekati netral (5,4–8,0). Sebagian besar bakteri patogen manusia termasuk kelompok ini.

9. Jawaban: B – Halofil

Halofil membutuhkan garam NaCl dalam konsentrasi tinggi untuk tumbuh. Adaptasi dilakukan dengan compatible solutes agar tekanan osmotik tetap seimbang.

10. Jawaban: B – $N_t = N_0 \times 2^n$

Rumus ini menunjukkan pertumbuhan eksponensial: jumlah sel akhir = jumlah awal $\times 2$ pangkat jumlah generasi.

11. Jawaban: B – Asam amino

Metabolit primer dihasilkan pada fase log awal, misalnya asam amino dan nukleotida, yang penting untuk pertumbuhan dan pembelahan sel.

12. Jawaban: C – Fase stasioner

Jumlah sel baru sama dengan jumlah sel mati. Populasi tampak stabil karena nutrisi menipis dan limbah menumpuk.

13. Jawaban: C – Sampel encer

Metode MPN digunakan untuk sampel dengan populasi mikroba rendah, misalnya air minum, karena metode ini berbasis probabilitas.

14. Jawaban: B – Asidofil

Asidofil tumbuh optimal pada $\text{pH} < 5,5$. Beberapa bahkan ekstrem, misalnya *Picrophilus oshimae* yang tumbuh pada $\text{pH} 0,7$.

15. Jawaban: C – Anaerob fakultatif

Anaerob fakultatif dapat tumbuh tanpa oksigen, tetapi lebih cepat bila oksigen tersedia karena respirasi aerob menghasilkan lebih banyak energi.

16. Jawaban: B – Menjaga tekanan osmotik

Compatible solutes (misalnya KCl, betaine, prolin) menjaga tekanan osmotik internal agar sel tetap stabil di lingkungan hipertonik.

17. Jawaban: D – Piezofil

Piezofil sejati hanya tumbuh optimal pada tekanan tinggi (400–500 atm). Adaptasi dilakukan dengan mengubah komposisi lipid membran.

18. Jawaban: B – EPS + metabolisme berubah

Biofilm resisten terhadap antibiotik karena EPS menghambat penetrasi obat dan metabolisme sel dalam biofilm berbeda dari sel planktonik.

19. Jawaban: C – Alkalifil

Alkalifil menghasilkan enzim protease dan lipase yang aktif pada kondisi basa. Enzim ini digunakan dalam industri deterjen.

20. Jawaban: B – Flow cytometry

Flow cytometry menghitung sel dengan sinar laser, digunakan dalam aplikasi medis untuk analisis sel darah dan mikroba.

21. Jawaban: C – Antibiotik

Metabolit sekunder dihasilkan pada fase log akhir/stasioner, contohnya antibiotik yang berfungsi melawan organisme lain.

22. Jawaban: C – Termofil

Termofil tumbuh optimal pada suhu 55–65°C, misalnya di kompos atau sumber air panas.

23. Jawaban: C – Alkalifil

Alkalifil tumbuh optimal pada pH tinggi (9–11). Contoh: *Vibrio cholerae*.

24. Jawaban: C – Resistansi listrik

Coulter counter mendeteksi perubahan resistansi listrik saat sel melewati lubang kecil, sehingga dapat menghitung jumlah sel.

25. Jawaban: E – Semua benar

Biofilm dapat ditemukan di plak gigi, batu sungai, kateter medis, pipa air, dan banyak permukaan lain.

26. Jawaban: A – Ikatan hidrogen & interior hidrofobik

Enzim hipertermofil stabil karena memiliki banyak ikatan hidrogen, interior hidrofobik teratur, dan kandungan prolin tinggi yang membuat polipeptida kaku.

27. Jawaban: B – Menukar Na^+ dengan H^+

Alkalifil menjaga pH internal tetap netral dengan menukar ion Na^+ dari dalam sel dengan proton (H^+) dari luar.

28. Jawaban: B – Chemostat vs Turbidostat

Chemostat: nutrisi pembatas, dilution rate konstan.

Turbidostat: nutrisi berlebih, dilution rate bervariasi sesuai kekeruhan.

29. Jawaban: B – Sel persisten

Sel persisten tetap hidup setelah terapi antibiotik dan dapat menghidupkan kembali biofilm, sehingga infeksi sulit diatasi.

30. Jawaban: C – Asam lemak tak jenuh

Piezofil beradaptasi dengan meningkatkan jumlah asam lemak tak jenuh atau memperpendek rantai asam lemak membran agar tetap cair di bawah tekanan tinggi.

Kunci Jawaban BAB 10

a. Essay

1. Gen 16S rRNA memiliki daerah lestari (*conserved*) yang serupa di semua bakteri untuk penempelan primer PCR universal, serta daerah hipervariabel (*hypervariable*) yang unik pada tiap spesies untuk membedakan kekerabatan filogenetik secara presisi.
2. Pendekatan molekuler lebih andal karena sekuens DNA stabil secara evolusioner, sedangkan taksonomi numerik fenotipik (morfologi) mudah bias akibat pengaruh lingkungan laboratorium yang dapat memicu perubahan fenotipik pada spesies yang berbeda namun berkoloni serupa.
3. Strategi melibatkan inokulasi bakteri metallotolerant (*Pseudomonas/Bacillus*) untuk biosorpsi logam Cd, dikombinasikan dengan biochar yang menaikkan pH, memperbaiki struktur tanah, serta menyediakan mikrorongga sebagai habitat pelindung guna menjaga kelangsungan hidup populasi bakteri tersebut.
4. Bakteri pesisir menghasilkan enzim spesifik untuk mendepolimerisasi rantai polietilena. Isolat lokal bernilai bioteknologi tinggi karena telah teradaptasi secara evolusioner dengan kondisi ekosistem lokal (salinitas, fluktuasi suhu) sehingga lebih tangguh dibanding strain laboratorium.
5. Klasifikasi Baltimore mengidentifikasi jalur replikasi virus (misal ssRNA). Pemahaman ini membantu merancang pencegahan lewat penghambatan replikasi spesifik atau dengan mencegah transmisi mekanis dan membasmi serangga vektor pembawa virus yang tidak bisa menembus dinding sel sendiri.

b. Pilihan Ganda

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

10. D

c. Studi Kasus / Proyek

1. Analisis molekuler: Isolasi DNA genomik, amplifikasi PCR gen 16S rRNA menggunakan primer universal, sekuensing, analisis BLAST untuk mencocokkan sekuen dengan database global, dan rekonstruksi pohon filogenetik.

Intervensi: Kombinasi inokulasi isolat metaltolerant dengan aplikasi biochar guna menetralkan keasaman tanah, menyediakan mikrorongga pelindung bakteri, meningkatkan kelembapan, serta mengoptimalkan kapasitas biosorpsi timbal di lapangan.

2. Evaluasi: Fungisida tidak efektif karena sasaran adalah virus dan serangga vektor, bukan jamur.

Peran kutu kebul: Bertindak sebagai vektor yang menembus dinding sel tumbuhan secara mekanis saat mengisap cairan, memfasilitasi masuknya virus ssRNA.

Rekomendasi: Pengendalian populasi kutu kebul menggunakan perangkap kuning, rotasi tanaman non-inang, serta pembersihan gulma yang menjadi reservoir virus.

Kunci Jawaban BAB 11

a. Essay

1. Penundaan transportasi urin tanpa pengawet menyebabkan bakteri kontaminan berkembang biak secara eksponensial pada suhu ruang. Hal ini mendistorsi hasil kuantitatif pada fase analitik, sehingga menimbulkan interpretasi positif palsu (bakteriuria signifikan yang semu).
2. Pewarnaan Gram membedakan bakteri berdasarkan retensi kristal violet oleh tebalnya peptidoglikan, sedangkan BTA berdasarkan retensi karbol fuksin oleh asam mikolat dinding sel. Kegagalan dekolorisasi menyebabkan hasil positif palsu karena zat warna primer tidak luntur.
3. Media selektif menekan flora normal, sementara media diferensial memberikan visualisasi karakteristik metabolik patogen target. Kombinasi ini bersama goresan kuadran memastikan isolasi koloni tunggal patogen yang bebas dari dominasi bakteri kontaminan luka.

4. Minyak imersi menghentikan pembiasan cahaya karena memiliki indeks bias setara kaca. Tanpa minyak imersi, cahaya membias saat melewati udara, mengakibatkan hilangnya fokus, bayangan buram, dan resolusi rendah pada perbesaran lensa objektif 100x.
5. Secara ekologis, bakteri patogen resisten dapat mencemari ekosistem air dan tanah. Secara hukum, laboratorium melanggar Undang-Undang Rumah Sakit dan regulasi lingkungan hidup, yang dapat berujung pada sanksi administratif, pencabutan izin operasional, hingga tuntutan pidana.

b. Pilihan Ganda

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

c. Studi Kasus / Proyek

1. Kelemahan utama adalah penundaan transportasi pada suhu tinggi tanpa pendingin, yang memicu pertumbuhan cepat flora normal mulut (kokus Gram-positif) dari kontaminasi saliva, serta merusak viabilitas sampel sputum. Solusi taktisnya adalah melatih pasien batuk dalam di pagi hari setelah berkumur, serta menggunakan kotak pendingin portabel sederhana dengan *ice pack* untuk menjaga suhu spesimen tetap berada pada rentang 2–8 °C selama transportasi ke laboratorium puskesmas.
2. Langkah audit operasional mencakup tiga titik kritis: Pertama, verifikasi kepatuhan teknik aseptis saat pengambilan swab luka (pembersihan nanah superfisial dan penggunaan alat steril). Kedua, pemantauan pencatatan suhu dan waktu tunggu transportasi spesimen luka. Ketiga, audit proses pasca-analitik berupa verifikasi kepatuhan prosedur autoklaf atau dekontaminasi kimiawi sisa spesimen sebelum dibuang ke IPAL,

guna memastikan tidak ada bakteri hidup yang lepas ke lingkungan.

GLOSARIUM

- Archaea:** Organisme uniseluler prokariotik yang memiliki karakteristik unik dan sering ditemukan di lingkungan ekstrem.
- Bakteriologi:** Cabang mikrobiologi yang secara khusus mempelajari tentang bakteri, termasuk struktur, fungsi, dan peranannya.
- Entomologi Medis:** Disiplin ilmu yang mengkaji artropoda
- Bakteri Prokariotik:** Organisme uniseluler yang tidak memiliki membran inti sel dan organel bermembran ganda, dengan materi genetik berupa DNA sirkular tunggal yang terkonsentrasi di nukleoid.
- Bakteri pelarut fosfat (BPF):** Kelompok bakteri yang
- Agen infeksius:** Mikroorganisme seperti bakteri, virus, jamur, atau parasit yang mampu menyebabkan penyakit pada penjamu.
- Fomit:** Objek atau bahan mati yang terkontaminasi mikroorganisme patogen dan dapat berperan sebagai media perantara penularan infeksi.
- Anaerob oportunistik:** Mikroorganisme yang dapat tumbuh tanpa oksigen dan menyebabkan penyakit ketika pertahanan inang melemah atau kondisi lingkungan berubah.
- Bakteriosin:** Senyawa antimikroba yang dihasilkan oleh bakteri untuk menghambat pertumbuhan bakteri lain.
- Eksklusi kompetitif:** Mekanisme biologis di mana satu spesies mikroorganisme mencegah kolonisasi spesies lain dengan bersaing untuk sumber daya atau ruang.
- Flora normal:** Populasi mikroorganisme yang hidup secara alami pada permukaan luar atau dalam tubuh manusia yang sehat tanpa menyebabkan efek patologis yang nyata.
- Flora residen:** Kelompok mikroorganisme tetap yang menghuni area tubuh tertentu secara konstan dan akan segera terbentuk kembali apabila terjadi gangguan.
- Flora transien:** Kelompok mikroorganisme non-patogen atau berpotensi patogen yang mendiami kulit atau mukosa sementara waktu, berasal dari lingkungan luar, dan tidak membentuk koloni permanen.
- Interferensi bakteri:** Fenomena di mana bakteri residen menghambat pertumbuhan atau kolonisasi bakteri patogen.

- Komensalisme:** Hubungan simbiosis di mana satu organisme mendapat keuntungan, sementara organisme lain tidak diuntungkan maupun dirugikan.
- Lipofilik:** Karakteristik mikroorganisme yang memiliki afinitas terhadap lipid, sehingga mampu tumbuh subur di lingkungan kaya lemak.
- Mikrobiota indigenous:** Istilah lain untuk flora normal, merujuk pada komunitas mikroorganisme yang secara alami menghuni tubuh inang.
- Mikroekologi:** Studi tentang interaksi antara mikroorganisme dan lingkungan spesifik tempat mereka hidup.
- Mutualisme:** Hubungan simbiosis di mana kedua organisme yang terlibat saling mendapatkan keuntungan.
- Alograf semi-alogenik:** Materi genetik yang sebagian mirip tetapi tidak identik dengan inang, seperti janin yang membawa genetik dari ayah, yang memerlukan adaptasi imunologis maternal.
- Helmin:** Kelompok cacing parasit yang dapat menginfeksi manusia, termasuk cacing tambang, cacing gelang, dan cacing camb
- Adsorpsi:** Tahap awal siklus replikasi virus di mana spikula virus menempel pada reseptor spesifik sel inang.
- Amplop:** Lapisan lipid bilayer tambahan yang menyelubungi kapsid beberapa jenis virus, diperoleh dari membran sel inang saat virus keluar melalui pertunasan.
- Adenosin Trifosfat (ATP):** Molekul pembawa energi universal dalam sel yang menyimpan dan mentransfer energi kimia untuk berbagai proses metabolik.
- Akseptor elektron terminal:** Senyawa terakhir yang menerima elektron dalam rantai transpor elektron, menentukan jenis respirasi yang terjadi.
- Biokatalisator:** Agen biologis, seperti enzim, yang mempercepat laju reaksi kimia tanpa ikut bereaksi secara permanen.
- Bioremediasi:** Proses pemanfaatan mikroorganisme atau produknya untuk mendegradasi, mengubah, atau menghilangkan kontaminan dari lingkungan.
- Biostimulasi:** Strategi rekayasa lingkungan yang melibatkan penambahan nutrisi atau kondisi yang menguntungkan untuk meningkatkan aktivitas metabolisme mikroorganisme asli dalam mendegradasi polutan.

Donor elektron: Senyawa yang menyumbangkan elektron dalam reaksi redoks, menjadi sumber energi bagi mikroorganisme.

Enzim: Protein fungsional yang bertindak sebagai biokatalisator spesifik, menurunkan energi aktivasi reaksi kimia di dalam sel.

Fermentasi: Jalur metabolisme anaerobik di mana mikroorganisme menghasilkan energi tanpa akseptor elektron eksternal, seringkali menghasilkan produk sampingan organik.

Imobilisasi enzim: Teknik mengikat enzim pada matriks padat atau membran untuk meningkatkan stabilitas, memungkinkan penggunaan berulang, dan mempermudah pemisahan produk.

Konstanta Michaelis (Km): Parameter kinetika enzimatik yang mengindikasikan afinitas enzim terhadap substratnya; nilai rendah menunjukkan afinitas tinggi.

Laju maksimum (Vmax): Parameter kinetika enzimatik yang menunjukkan kecepatan reaksi tertinggi yang dapat dicapai enzim ketika semua situs aktifnya jenuh dengan substrat.

Metabolisme mikroorganisme: Jaringan kompleks reaksi kimia terorganisasi yang memungkinkan sel mikroorganisme untuk mempertahankan hidup, tumbuh, dan bereproduksi.

Potensial redoks: Ukuran kecenderungan suatu lingkungan untuk menerima atau menyumbangkan elektron, yang memengaruhi jenis reaksi metabolisme yang dominan.

Respirasi aerobik: Proses metabolisme yang menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron terminal untuk menghasilkan energi dalam jumlah besar.

Transfer elektron ekstraseluler: Mekanisme di mana mikroorganisme mentransfer elektron ke akseptor elektron yang berada di luar sel, seringkali melalui matriks konduktif.

Autotrof: Mikroorganisme yang menggunakan karbon dioksida sebagai sumber karbon utama untuk sintesis senyawa organik.

Faktor Pertumbuhan: Senyawa organik esensial seperti asam amino, purin, pirimidin, dan vitamin yang tidak dapat disintesis sendiri oleh mikroorganisme tertentu.

Fototrof: Organ

Fase Eksponensial (Log): Tahap pertumbuhan mikroorganisme di mana populasi membelah secara aktif dan teratur dengan laju maksimum dan konstan, menghasilkan peningkatan jumlah sel secara logaritmik.

- Fase Kematian:** Tahap akhir dalam kurva pertumbuhan mikroorganisme di mana jumlah sel yang mati jauh melampaui jumlah sel yang bertahan.
- 16S rRNA:** Gen penanda filogenetik utama pada bakteri yang memiliki daerah konservatif untuk penempelan primer dan daerah hipervariabel untuk informasi perbedaan spesifik antarspesies.
- Analisis Filogenetik:** Metode klasifikasi mikroorganisme yang didasarkan pada hubungan kekerabatan evolusioner, umumnya menggunakan analisis sekuens.
- Aseptis:** Teknik atau prosedur yang dilakukan untuk mencegah kontaminasi oleh mikroorganisme, terutama dalam pengambilan atau penanganan spesimen.
- Bakteri Tahan Asam (BTA):** Kelompok bakteri yang memiliki dinding sel kaya lipid sehingga mampu mempertahankan zat warna primer meskipun dicuci dengan asam-alkohol, seperti *Mycobacterium tuberculosis*.
- Fase pra-analitik:** Tahapan awal dalam pemeriksaan laboratorium yang meliputi pengambilan, penanganan, dan transportasi spesimen, yang sangat menentukan kualitas hasil diagnosis.
- Flora normal:** Kumpulan mikroorganisme yang secara alami hidup di dalam atau pada tubuh manusia tanpa menyebabkan penyakit, namun dapat menjadi kontaminan pada spesimen.
- Infeksi nosokomial:** Infeksi yang didapatkan oleh pasien selama berada di rumah sakit.

INDEKS

Adenosin Trifosfat.....	101
akseptor elektron terminal.....	100, Error! Bookmark not defined.
amilase.....	80, 103, 179
bakteri anaerob oportunistik.....	55
bakteriosin.....	54
biochar.....	101, Error! Bookmark not defined., 184
biokatalisator.....	100
bioreaktor.....	99, Error! Bookmark not defined.
bioremediasi.....	3, 100, 118
biostimulasi.....	100
cuci tangan.....	38, 54, 75
Dasar virologi dan mikologi.....	83
disinfeksi bedah.....	54
donor elektron.....	101
eksklusi kompetitif.....	51
energi bebas Gibbs.....	101
enzim.....	18, 57, 72
fermentasi.....	10, 17, 52
flora.....	7, 21, 36
imobilisasi enzim.....	104
Jenis pemeriksaan mikrobiologi.....	195
kinetika enzimatis.....	102
konstanta Michaelis.....	102
laju maksimum.....	102
metabolisme mikroorganisme.....	57, 99, 187
oksidasi glukosa.....	102
potensial redoks.....	99
respirasi aerobik.....	101
sakarifikasi.....	103
transfer elektron ekstraseluler.....	101

BIODATA PENULIS



(Andi Wirdani Pettalolo, S.Si., M.Si)
(Dosen)

Andi Wirdani Pettalolo adalah seorang dosen yang menekuni bidang Ilmu Mikrobiologi Medis dengan fokus keahlian pada bakteriologi dan farmakologi mikroba. Ia menyelesaikan studi S1 di Universitas Tadulako dan S2 di Universitas Hasanuddin. Sebagai akademisi, ia aktif dalam berbagai kegiatan tri dharma perguruan tinggi, mulai dari pengajaran, penelitian, hingga pengabdian kepada masyarakat. Buku ajar ini disusun sebagai bentuk kontribusi nyata penulis dalam pengembangan ilmu pengetahuan, sekaligus upaya untuk meningkatkan pemahaman mahasiswa dan masyarakat di bidang mikrobiologi.

BIODATA PENULIS



OKTAVIUS YOSEPH TUTA MAGO

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi – Universitas Nusa Nipa

Oktavius Yoseph Tuta Mago, biasa disapa Yotta adalah seorang dosen pada program studi pendidikan biologi di Universitas Nusa Nipa, yang memiliki minat dan keahlian di bidang mikrobiologi. Ia menyelesaikan pendidikan sarjana di Universitas Nusa Cendana (2008-2013), pendidikan magister di Universitas Diponegoro (2013-2015), dan aktif dalam kegiatan akademik maupun pengembangan keilmuan. Selain mengajar, penulis juga terlibat dalam berbagai kegiatan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat. Karya ini disusun sebagai bentuk kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan serta upaya meningkatkan pemahaman mahasiswa pada bidang mikrobiologi.

SINOPSIS BUKU

Pernahkah Anda membayangkan bahwa kunci untuk mengatasi krisis pangan dan tantangan kesehatan di Indonesia justru terletak pada dunia mikroba yang tak kasat mata? Dari peran bakteri dalam menyuburkan tanah vulkanik pasca-erupsi Merapi, pemanfaatan khamir dalam fermentasi kopi Gayo, hingga pertarungan melawan bakteri resisten antibiotik di rumah sakit perkotaan, mikroorganisme adalah aktor utama yang membentuk realitas biologis dan sosial di nusantara. Buku ini tidak akan membawa Anda menyelami dunia mikroba sebagai entitas teoretis yang terisolasi di laboratorium, melainkan sebagai kekuatan dinamis yang relevan dengan kehidupan Anda.

Melalui pendekatan unik 'Konsep → Contoh → Implikasi', setiap bab akan mengurai teori-teori inti mikrobiologi—mulai dari struktur sel, metabolisme, hingga rekayasa genetika—dan langsung mengaitkannya dengan studi kasus nyata di Indonesia. Anda akan belajar bagaimana prinsip transfer gen horizontal menjelaskan penyebaran resistensi antibiotik di Jakarta, atau bagaimana siklus nitrogen oleh mikroba menjadi kunci sukses program pertanian organik di Jawa Barat. Setiap konsep yang rumit disederhanakan melalui contoh konkret, memungkinkan Anda tidak hanya 'tahu' tetapi juga 'paham' bagaimana ilmu ini bekerja di dunia nyata.

Disusun secara sistematis dengan puluhan studi kasus mutakhir, buku ajar ini dirancang khusus untuk mahasiswa sarjana Mikrobiologi, Biologi, Kedokteran, Pertanian, dan Teknologi Pangan. Ini adalah panduan esensial bagi siapa saja yang ingin menguasai mikrobiologi secara mendalam dan aplikatif, serta bercita-cita untuk memanfaatkan kekuatan mikroba dalam menjawab berbagai tantangan spesifik yang dihadapi Indonesia.