

MIKROBIOLOGI

**Dito Anurogo
Ayu Saka Laksmi W
Hasria Alang
Rafika
Sukma Restuning Pratiwi
Esti Rizkiana Pratiwi
Nur Faidah Munir
Helena Daten
Adriani
Eka Pratiwi Tenriawaru**



GET PRESS INDONESIA

MIKROBIOLOGI

Penulis :

Dito Anurogo
Ayu Saka Laksmita W
Hasria Alang
Rafika
Sukma Restuning Pratiwi
Esti Rizkiana Pratiwi
Nur Faidah Munir
Helena Daten
Adriani
Eka Pratiwi Tenriawaru

ISBN :

Editor : Dr. Neila Sulung, S.Pd., Ns., M.Kes.

Penyunting : Rantika Maida Sahara, S.Tr.Kes.

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Februari 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Mikrobiologi ini.

Buku ini membahas Konsep dasar mikrobiologi dan parasitology, Bakteriologi dasar, Konsep dasar pencegahan dan pengendalian infeksi, Parasit pada kasus kebidanan, Dasar virologi dan mikologi, Nutrisi dan kultur organisme, Pertumbuhan mikroorganisme, Keragaman mikroorganisme, Jenis Pemeriksaan Mikrobiologi, Sejarah Dan Cakupan Mikrobiologi.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Februari 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 KONSEP DASAR MIKROBIOLOGI	
DAN PARASITOLOGI.....	1
1.1 Pengantar	1
1.1.1 Definisi Mikrobiologi dan Parasitologi	1
1.1.2 Sejarah dan Evolusi Mikrobiologi dan Parasitologi	1
1.1.3 Pentingnya Mikrobiologi dan Parasitologi dalam Kedokteran dan Biologi	3
1.2 Mikroorganisme dan Parasit: Struktur dan Fungsi....	3
1.2.1 Bakteri: Morfologi dan Fisiologi.....	3
1.2.2 Virus: Komposisi dan Mekanisme Infeksi	5
1.2.3 Jamur: Diversitas dan Peran dalam Kesehatan Manusia	7
1.2.4 Protozoa dan Helminth: Ciri-Ciri dan Siklus Hidup.....	9
1.3 Interaksi Mikroorganisme dan Parasit dengan Inang.....	13
1.3.1 Mekanisme Patogenesis	13
1.3.2 Respon Imun terhadap Infeksi.....	14
1.3.3 Dinamika Simbiosis dan Komensalisme	21
1.4 Teknologi dan Metodologi dalam Mikrobiologi dan Parasitologi.....	22
1.4.1 Teknik Kultur dan Identifikasi Mikroorganisme	22
1.4.2 Teknologi Molekuler dalam Studi Patogen	22
1.4.3 Penggunaan Model Hewan dalam Penelitian Parasitologi	24
1.5 Mikrobiologi dan Parasitologi dalam Konteks Global	27
1.5.1 Penyakit Infeksi Emerging dan Re-emerging	27
1.5.2 Resistensi Antimikroba dan Implikasinya.....	29
1.5.3 Perubahan Iklim dan Pengaruhnya terhadap Penyebaran Penyakit.....	31

1.6 Masa Depan Mikrobiologi dan Parasitologi	33
1.6.1 Inovasi dalam Terapi dan Pencegahan Penyakit.....	33
1.6.2 Integrasi AI dan Big Data dalam Penelitian	41
1.6.3 Tantangan Etik dan Sosial dalam Penelitian Mikrobiologi	43
1.7 Konklusi dan Rekomendasi	45
1.7.1 Implikasi Mikrobiologi dan Parasitologi untuk Pemahaman Kehidupan	45
1.7.2 Peran Mikroorganisme dan Parasit dalam Keseimbangan Ekosistem.....	45
1.7.3 Refleksi tentang Hubungan Manusia dengan Dunia Mikro	46
1.7.4 Rekomendasi untuk Pendidik, Peneliti, Praktisi, Pebisnis, Pemerintah, Pembuat Kebijakan, Masyarakat.....	46
DAFTAR PUSTAKA	48
BAB 2 BAKTERIOLOGI DASAR	51
2.1 Pendahuluan	51
2.1.1 Ruang Lingkup Bakteriologi	51
2.1.2 Bakteri Menguntungkan dan Merugikan	53
2.2 Struktur dan Morfologi Bakteri	56
2.2.1 Bentuk Sel Bakteri	56
2.2.2 Struktur Bakteri.....	58
2.3 Reproduksi dan Pertumbuhan Bakteri	67
2.3.1 Reproduksi Sel Bakteri	67
2.3.2 Pertumbuhan Bakteri.....	71
2.3.3 Kurva Pertumbuhan Bakteri.....	72
2.3.4 Pengendalian Pertumbuhan Bakteri	73
2.4 Nutrisi dan Kultivasi Sel Bakteri.....	74
2.4.1 Nutrisi untuk Pertumbuhan Sel Bakteri.....	74
2.4.2 Media Pertumbuhan Bakteri	75
2.4.3 Bentuk Media.....	76
2.4.4 Metode Kultivasi Bakteri.....	78
2.4.5 Gambaran Koloni Kuman	79
2.5 Genetika Bakteri	79
2.5.1 Kromosom	79

2.5.2 Struktur Asam Amino.....	80
2.5.3 Variasi Genotif dan Fenotif.....	81
2.5.4 Mutasi.....	82
2.5.5 Pemindahan Materi Genetik	84
DAFTAR PUSTAKA.....	89
BAB 3 KONSEP DASAR PENCEGAHAN DAN PENGENDALIAN INFEKSI	95
3.1 Pendahuluan	95
3.2 Sterilisasi	96
3.2.1 Sterilisasi fisik mikroba	96
3.2.2 Sterilisasi Kimiawi Mikroba.....	98
3.3 Pemberian Antimikroba	99
3.3.1 Pengendalian pertumbuhan	100
3.3.2 Penggunaan antimikroba kimia secara eksternal.....	100
3.3.3 Agen antimikroba in vivo.....	100
3.3.4 Antibiotik dari Prokaryotik.....	102
3.3.5 Pengendalian Virus dan Eukariotik Patogen.....	103
3.3.6 Resistensi obat antimikroba dan pencarian obat baru.....	104
DAFTAR PUSTAKA.....	105
BAB 4 PARASIT PADA KASUS KEBIDANAN	107
4.1 Pendahuluan	107
4.2 Nematoda	108
4.2.1 Nematoda Usus.....	109
4.2.2 Nematoda Jaringan.....	114
4.3 Protozoa.....	117
DAFTAR PUSTAKA.....	125
BAB 5 DASAR VIROLOGI DAN MIKOLOGI.....	129
5.1 Dasar Virologi	129
5.1.1 Pendahuluan	129
5.1.2 Struktur Virus.....	130
5.1.3 Morfologi Virus	131
5.1.4 Reproduksi Virus	133
5.1.5 Penyakit Virus pada Hewan	136
5.1.6 Penyakit Virus pada Tumbuhan	137
5.2 Dasar Mikologi	140
5.2.1 Pendahuluan	140

5.2.2 Karakteristik Umum Jamur	141
5.2.3 Struktur dan Morfologi	142
5.2.4 Reproduksi Jamur	147
5.2.5 Nutrisi dan Taksonomi	147
5.2.6 Klasifikasi Jamur	148
DAFTAR PUSTAKA	156
BAB 6 NUTRISI DAN KULTUR ORGANISME.....	159
6.1 Pendahuluan	159
6.2 Nutrisi Mikroba.....	160
6.2.1 Unsur Makro nutrien.....	160
6.2.2 Unsur Mikro nutrien	164
6.2.3 Respon terhadap keterbatasan nutrisi	166
6.3 Kultur Organisme	168
6.3.1 Tipe media kultur mikroba	170
6.3.2 Media kultur fungsional	171
6.3.3 Metode kultur mikroba.....	176
DAFTAR PUSTAKA	180
BAB 7 PERTUMBUHAN MIKROORGANISME	181
7.1 Pendahuluan	181
7.2 Pengukuran Konsentrasi Mikroba	182
7.3 Pertumbuhan Eksponensial	183
7.4 Pertumbuhan Mikroba	185
7.5 Pembelahan Biner.....	185
7.6 Waktu Generasi	186
7.7 Jumlah Konsentrasi Bakteri	188
7.8 Kurva Pertumbuhan	188
7.9 Pemeliharaan Sel Dalam Fase Eksponensial.....	190
7.10 Pertumbuhan Biofilm.....	191
7.11 Definisi Dan Pengukuran Dari Kematian.....	192
7.12 Pengendalian Lingkungan Pertumbuhan Mikroba..	193
7.13 Strategi Pengendalian Bakteri Pada Pttingkat Lingkungan	194
7.14 Mekanisme Umum Tindakan Biosida	195
7.15 Tindakan Khusus Dari Biosida Terpilih	197
7.16 Hubungan Konsentrasi Biosida Dan Waktu Terhadap Pembunuhan Antimikroba	200

7.17 Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan	
Mikroba	201
DAFTAR PUSTAKA	204
BAB 8 KERAGAMAN MIKROORGANISME	205
8.1 Pendahuluan	205
8.2 Metode untuk menentukan diversitas mikroba	205
8.3 Keanekaragaman mikroba pada sampel lingkungan	213
8.3.1 Sampel dari tumbuhan	213
8.3.2 Sampel dari manusia	215
8.3.3 Sampel tanah	219
8.3.4 Sampel air	220
DAFTAR PUSTAKA	223
BAB 9 JENIS PEMERIKSAAN MIKROBIOLOGI	229
9.1 Pendahuluan	229
9.2 Sampel Untuk Pemeriksaan Mikrobiologi	230
9.3 Jenis Pemeriksaan Mikrobiologi	231
9.3.1 Pemeriksaan mikrobiologi untuk sampel klinis	231
9.3.2 Pemeriksaan mikrobiologi untuk bahan	
pangan	247
DAFTAR PUSTAKA	252
BAB 10 SEJARAH DAN CAKUPAN MIKROBIOLOGI	255
10.1 Sejarah Mikrobiologi	255
10.1.1 Pencarian Mikroorganisme	255
10.1.2 Konflik Antara Teori Abiogenesis dan	
Teori Biogenesis	256
10.1.3 Masa Keemasan Mikrobiologi	260
10.1.4 Perkembangan Mikrobiologi setelah Golden	
Age	263
10.2 Cakupan Mikrobiologi	266
DAFTAR PUSTAKA	268
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Hasil pengamatan bentuk sel <i>Pseudomonas sp</i> : isolat I (kiri) dan isolat II (kanan)	54
Gambar 2.2. Hasil pengamatan bentuk sel <i>Paracoccus denitrificans</i>	54
Gambar 2.3. <i>Mycobacterium tuberculosis</i>	55
Gambar 2.4. <i>Salmonella typhi</i>	55
Gambar 2.5. Berbagai bentuk bakteri	57
Gambar 2.6. Semua bakteri memiliki struktur dasar yang sama	58
Gambar 2.7. Ikatan Komponen Penyusun Peptidoglikan	59
Gambar 2.8. Diagram skematik dinding sel bakteri Gram positif	61
Gambar 2.9. Kapsul pada Bakteri	63
Gambar 2.10. Flagel pada Bakteri	65
Gambar 2.11. Berbagai Bentuk Flagel pada Bakteri	65
Gambar 2.12. Gambar mikrograf elektron transmisi	67
Gambar 2.13. Pembelahan Biner pada Bakteri.....	68
Gambar 2.14. Skema Sederhana Pelepasan DNA oleh Sel Donor dan Penyerapan DNA melalui Transformasi oleh Sel Penerima yang Menghasilkan Transfer Gen Horizontal.....	70
Gambar 2.15. Diagram skematik yang menunjukkan fisi biner bakteri.....	71
Gambar 2.16. Kurva pertumbuhan bakteri	73
Gambar 2.17. Cara menyebarkan bakteri dengan metode goresan	78
Gambar 2.18. Penonjolan Koloni	79
Gambar 2.19. Diagram skematik yang menunjukkan transmisi DNA melalui transformasi.....	85
Gambar 2.20. Diagram skematik yang menunjukkan transmisi materi genetik melalui transduksi yang dimediasi bakteriofag...	86

Gambar 2.21. Diagram skematik yang menunjukkan transmisi materi genetik melalui konjugasi.....	87
Gambar 3.1. Jalur infeksi.....	95
Gambar 3.2. Sterilisasi panas uap bertekanan (<i>Autoclave</i>) dan panas kering (pemijaran dan oven).....	97
Gambar 3.3. Sterilisasi dengan radiasi	98
Gambar 3.4. Filter membrane.....	98
Gambar 3.5. Sterilisasi kimiawi.....	99
Gambar 3.6. Mekanisme kerja antibiotic.....	101
Gambar 4.1. Morfologi <i>Ascaris lumbricoides</i> A. telur fertile (dibuahi, berkortika), B. telur unfertil (tidak dibuahi, berkortika), C. telur berisi embrio atau telur infeksi, D. cacing dewasa	110
Gambar 4.2. Cacing dewasa (A) dan Telur cacing (B) <i>Trichuris trichura</i>	111
Gambar 4.3. Telur dan Cacing dewasa <i>Enterobius vermicularis</i>	113
Gambar 4.3. <i>Wuchereria bancrofti</i>	115
Gambar 4.5. <i>Brugia malayi</i> dan <i>Brugia timori</i>	116
Gambar 4.6. Morfologi spesies <i>Plasmodium</i>	119
Gambar 4.7. Tachyzoites <i>Toxoplasma gondii</i>	121
Gambar 4.8. Trofozoit <i>Trichomonas vaginalis</i>	123
Gambar 5.1. Struktur Virus.....	131
Gambar 5.2. Bentuk Virus	132
Gambar 5.3. Siklus Lisis	134
Gambar 5.4. Siklus Lisogenik.....	135
Gambar 5.5. Bentuk Hifa.....	143
Gambar 5.6. Siklus hidup zygomycete <i>Rhizopus stolonifera</i>	151
Gambar 5.7. Siklus hidup ascomycete <i>Neurospora crassa</i>	153
Gambar 5.8. Siklus hidup basidiomycete	154
Gambar 6.1. Agar SS (<i>Salmonella-Shigella</i> agar).....	172
Gambar 6.2. Agar darah (<i>Blood Agar</i>).....	174

Gambar 6.3. Agar Coklat (<i>Chocolate agar</i>).....	176
Gambar 6.4. Tahapan metode <i>Streak plate</i>	177
Gambar 6.5. <i>Streak plate</i> pada media agar	177
Gambar 6.6. Tahapan metode <i>Spread plate</i>	178
Gambar 6.7. <i>Spread plate</i> pada media agar	178
Gambar 7.1. Grafik biomassa versus waktu penggandaan yang menunjukkan pertumbuhan eksponensial linier yang akan terjadi dalam sistem tertutup. Biomassa (B) berlipat ganda pada setiap waktu penggandaan (td).....	184
Gambar 7.2. Pembelahan Biner	185
Gambar 7.3. Populasi Bakteri E.Coli Dengan Waktu Generasi 20 Menit	186
Gambar 7.4. Kurva Pertumbuhan Bakteri.....	190
Gambar 8.1. Peran mikroorganisme yang berbeda-beda.....	206
Gambar 8.2 Perbedaan metode <i>culture-dependent</i> dan <i>culture-independent</i>	207
Gambar 8.3. Gambaran umum desain penelitian dari sampel manusia seperti feses	217
Gambar 9.1. Bentuk koloni bakteri.....	232
Gambar 9.2. Hasil pewarnaan BTA secara mikroskopik (A), visualisasi M. tuberculosis menggunakan SEM (B), dan struktur dinding sel M.tuberculosis..	237
Gambar 9.3. Hasil positif untuk uji SIM.....	238
Gambar 9.6. Interpretasi hasil uji TSIA	242
Gambar 9.7. Interpretasi hasil uji urease	243
Gambar 9.8. Visualisasi hasil elektroforesis gel. DNA ditunjukkan dengan tanda panah	247
Gambar 9.9. Prosedur dan hasil pengamatan pada uji MPN.	249
Gambar 9.10. Prosedur pengujian ALT pada sampel.....	251

Gambar 10.1. Antony van Leeuwenhoek: Replika Mikroskop Leeuwenhoek dan Cara Penggunaannya (Kiri); Gambar Mikroba dari Mulut oleh Leeuwenhoek	258
Gambar 10.2. Ilustrasi Langkah-Langkah Postulat Koch	261
Gambar 10.3. Interaksi Mikrobiom, Sel Imun Inang, dan Tumor dalam Mikrolingkungan	266
Gambar 10.4. Integrasi Ilmu Mikrobiologi dalam Berbagai Bidang yang Terkait	267

DAFTAR TABEL

Tabel 6.1. Unsur-Unsur Utama Makro nutrien	163
Tabel 6.2. Unsur-Unsur Mikro nutrien.....	165
Tabel 6.3. Tipe media kultur	171
Tabel 6.4. Tipe media kultur fungsional.....	174
Tabel 8.1. Perbedaan metode yang digunakan untuk analisis keanekaragaman mikroorganisme ...	211
Tabel 9.1. Perbedaan antara bakteri gram positif dengan bakteri gram negative.....	234
Tabel 9.2. Interpretasi BTA berdasarkan IUATLD	236

BAB 1

KONSEP DASAR MIKROBIOLOGI DAN PARASITOLOGI

Oleh Dito Anurogo

1.1 Pengantar

1.1.1 Definisi Mikrobiologi dan Parasitologi

Mikrobiologi adalah ilmu yang mempelajari mikroorganisme, entitas biologis kecil yang berperan penting dalam berbagai aspek kehidupan di bumi. Ini mencakup bakteri, virus, jamur, dan protozoa, yang masing-masing memiliki karakteristik unik dan peran dalam ekosistem. Parasitologi, sebuah subdisiplin mikrobiologi, berfokus pada organisme parasit, termasuk protozoa dan helminth yang hidup dan memanfaatkan inang lain untuk bertahan hidup. Kedua bidang ini bersatu dalam memahami kompleksitas interaksi mikroskopis yang memengaruhi kesehatan, ekologi, dan bahkan evolusi.

1.1.2 Sejarah dan Evolusi Mikrobiologi dan Parasitologi

Mikrobiologi dan parasitologi memiliki sejarah panjang yang dimulai dari penemuan mikroskop oleh Antonie van Leeuwenhoek pada abad ke-17. Sejak itu, perkembangan teknologi seperti kultur sel, mikroskop elektron, dan teknik molekuler telah merevolusi pemahaman kita tentang mikroorganisme dan parasit. Evolusi disiplin ini tidak hanya berdampak pada pemahaman teoritis tetapi juga pada aplikasi praktis dalam kedokteran, pertanian, dan industri. Penemuan antibiotik, vaksin, dan terapi antiparasit adalah beberapa contoh bagaimana mikrobiologi dan parasitologi telah mengubah dunia.

Evolusi mikrobiologi dan parasitologi sejak penemuan awal Leeuwenhoek telah berlangsung secara dramatis, terutama melalui kontribusi ilmuwan terkemuka seperti Louis Pasteur dan Robert Koch. Pasteur, dengan teori kuman penyakitnya, membuka

jalan untuk pemahaman bahwa mikroorganisme adalah penyebab banyak penyakit. Sementara itu, Koch mengembangkan postulatnya yang terkenal yang menguraikan kriteria untuk menetapkan hubungan kausal antara patogen tertentu dan penyakit tertentu.

Dalam abad ke-20, penemuan dan pengembangan antibiotik oleh Alexander Fleming dan lainnya merevolusi pengobatan penyakit infeksi. Sementara itu, upaya dalam pengembangan vaksin, seperti yang dilakukan oleh Jonas Salk dan Albert Sabin terhadap polio, telah menyelamatkan jutaan nyawa dan mengubah lanskap kesehatan global.

Di sisi parasitologi, penemuan siklus hidup parasit dan hubungan mereka dengan penyakit telah membantu dalam pengembangan strategi pengendalian dan pencegahan yang efektif. Kemajuan dalam pemahaman tentang penyakit parasit seperti malaria, schistosomiasis, dan filariasis telah mengarah pada pengembangan terapi dan tindakan pencegahan yang lebih baik.

Dengan kemajuan teknologi seperti PCR (*Polymerase Chain Reaction*), sekuen genetik, dan teknologi CRISPR, kita sekarang dapat memahami mikrobiologi dan parasitologi pada level yang jauh lebih mendalam. Ini tidak hanya membantu dalam pengembangan obat dan vaksin yang lebih efektif tetapi juga dalam pemahaman mekanisme resistensi obat dan penyebaran penyakit.

Selain aplikasi kesehatan, mikrobiologi juga telah berkontribusi secara signifikan di bidang industri dan pertanian. Penggunaan mikroorganisme dalam fermentasi, produksi antibiotik, dan bioremediasi adalah beberapa contoh aplikasi industri. Di sektor pertanian, pemahaman tentang mikroorganisme tanah dan interaksi mereka dengan tanaman telah membantu dalam pengembangan metode pertanian yang lebih berkelanjutan dan produktif.

Secara keseluruhan, sejarah dan evolusi mikrobiologi dan parasitologi merupakan cerminan dari kemajuan ilmiah manusia, menunjukkan bagaimana pengetahuan yang berkembang dan inovasi teknologi dapat membawa perubahan signifikan dalam

pemahaman dan pengelolaan dunia alam. Dengan terus berkembangnya teknologi dan pengetahuan, kita dapat mengharapkan lebih banyak terobosan dan aplikasi yang bermanfaat dari kedua bidang ilmu ini di masa depan.

1.1.3 Pentingnya Mikrobiologi dan Parasitologi dalam Kedokteran dan Biologi

Dalam konteks kedokteran, mikrobiologi dan parasitologi membantu dalam diagnosis dan pengobatan penyakit infeksi. Mereka juga berperan penting dalam penelitian untuk mengembangkan obat-obatan baru dan strategi pencegahan penyakit. Dalam biologi, mereka memberikan wawasan tentang keragaman kehidupan dan interaksi antara spesies yang berbeda. Aspek futuristik dari kedua bidang ini termasuk pengembangan teknologi genome editing seperti CRISPR untuk melawan resistensi antimikroba dan penelitian tentang mikrobioma untuk memahami peran mikroorganisme dalam kesehatan manusia. Pendekatan integratif dan solutif ini membantu mengatasi tantangan kesehatan global dan lingkungan, menandai era baru dalam penelitian ilmiah dan aplikasi praktisnya.

1.2 Mikroorganisme dan Parasit: Struktur dan Fungsi

1.2.1 Bakteri: Morfologi dan Fisiologi

Bakteri, dengan keragaman morfologi yang luar biasa, merupakan pilar penting dalam memahami mikrobiologi. Mereka dapat muncul dalam berbagai bentuk seperti batang, bola, dan spiral. Morfologi bakteri ini bukan hanya penting untuk identifikasi tetapi juga memberi petunjuk tentang perilaku dan habitat mereka. Dari segi fisiologi, bakteri menunjukkan adaptasi yang menakjubkan terhadap berbagai lingkungan, dari sumber air panas hingga lapisan es Arktik. Mereka berperan dalam siklus nutrisi penting seperti nitrogen dan karbon, dan beberapa bahkan memiliki kemampuan unik seperti fotosintesis dan fiksasi nitrogen. Teknologi modern seperti sekuensing DNA telah membuka wawasan baru tentang keragaman genetik bakteri, yang memberikan peluang untuk aplikasi di bidang bioteknologi,

pengolahan limbah, dan kedokteran. Pendekatan futuristik dalam mempelajari bakteri melibatkan penggunaan teknologi canggih seperti mikroskop elektron cryo untuk memvisualisasikan struktur pada tingkat atom dan pengembangan probiotik untuk terapi yang dirancang khusus.

Keragaman morfologi bakteri tidak hanya menarik dari sudut pandang biologi murni tetapi juga memiliki implikasi praktis yang signifikan. Misalnya, morfologi yang berbeda memungkinkan spesialisasi dalam berbagai niches ekologis. Bakteri batang, seperti *E. coli*, menunjukkan efisiensi dalam pergerakan dan penyerapan nutrien, sedangkan bakteri kokus, seperti *Staphylococcus aureus*, lebih efektif dalam menghindari respons imun inang. Bentuk spiral, seperti yang ditemukan pada spirochetes, memungkinkan pergerakan efisien melalui medium yang kental atau jeli, seperti lendir. Pemahaman ini sangat penting dalam mengembangkan strategi untuk mengobati infeksi bakteri dan memahami penyebaran mereka dalam populasi manusia dan hewan.

Dari segi fisiologi, bakteri menunjukkan kemampuan luar biasa untuk beradaptasi dengan kondisi ekstrem. Ekstremofil, seperti bakteri yang ditemukan di ventilasi hidrotermal di dasar laut, menunjukkan bagaimana kehidupan dapat bertahan dan berkembang dalam kondisi yang paling keras. Pemahaman ini penting tidak hanya untuk biologi evolusioner tetapi juga untuk aplikasi praktis seperti bioremediasi, di mana bakteri digunakan untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi. Di sisi lain, studi tentang bakteri yang hidup dalam kondisi normal, seperti flora usus manusia, memberikan wawasan tentang bagaimana mikrobioma memengaruhi kesehatan manusia secara keseluruhan.

Penggunaan teknologi canggih seperti mikroskop elektron cryo telah memungkinkan ilmuwan untuk memvisualisasikan struktur bakteri pada tingkat yang sangat detail. Ini membuka pintu untuk pemahaman yang lebih dalam tentang mekanisme molekuler bakteri, seperti cara kerja ribosom atau transferase, yang penting dalam sintesis protein. Pengetahuan ini penting dalam pengembangan antibiotik baru dan terapi lainnya.

Selain itu, pengembangan probiotik yang dirancang khusus menjanjikan revolusi dalam pengobatan dan pencegahan penyakit. Dengan memahami hubungan simbiosis antara manusia dan flora usus mereka, para peneliti dapat mengembangkan probiotik yang ditargetkan untuk mengatasi kondisi khusus, mulai dari gangguan pencernaan hingga penyakit autoimun dan bahkan masalah kesehatan mental.

Fokus masa depan dalam penelitian bakteri mungkin termasuk pengembangan teknik sintetik dan rekayasa genetika untuk menciptakan bakteri dengan fungsi yang diinginkan, seperti bakteri yang dapat menghasilkan obat atau bahan kimia industri, atau yang dapat digunakan dalam terapi gen. Teknologi seperti CRISPR-Cas9 dapat memainkan peran penting dalam usaha ini, memungkinkan untuk pengeditan gen yang tepat dan cepat.

Secara keseluruhan, penelitian bakteri terus berkembang dan menyatu dengan bidang ilmu lain, menjanjikan wawasan baru dan aplikasi inovatif yang dapat merevolusi kedokteran, bioteknologi, dan ilmu lingkungan. Pendekatan holistik dan multidisiplin dalam mempelajari bakteri pasti akan membawa kita ke era baru pemahaman dan pemanfaatan mikroorganisme ini.

1.2.2 Virus: Komposisi dan Mekanisme Infeksi

Virus, walaupun sering dilihat sebagai agen penyakit, memainkan peran kompleks dalam ekosistem. Mereka sangat bervariasi dalam komposisi, dengan beberapa mengandung DNA dan yang lain RNA, serta mengadopsi berbagai strategi untuk menginfeksi sel inang. Mekanisme infeksi virus melibatkan pengikatan ke sel inang dan menyusupkan materi genetiknya, yang kemudian memanfaatkan mesin sel inang untuk replikasi. Pemahaman ini telah menjadi kunci dalam pengembangan vaksin dan terapi antiviral. Dalam konteks futuristik, penelitian virus tidak hanya terfokus pada pengendalian penyakit tetapi juga pada pemanfaatan virus dalam terapi gen dan sebagai alat untuk memahami mekanisme seluler fundamental. Integrasi penelitian virus dengan teknologi seperti CRISPR dan bioinformatika

membuka potensi baru dalam perancangan strategi terapeutik yang lebih efektif dan solutif, serta meningkatkan pemahaman kita tentang evolusi dan ekologi virus.

Penelitian tentang virus, dengan fokusnya yang kini berkembang, mengungkapkan wawasan baru yang menantang pandangan tradisional kita tentang mereka sebagai entitas patogenik semata. Virus, dengan keragaman genetik mereka yang luar biasa, telah menjadi alat penting dalam biologi molekuler dan genetika. Mereka memiliki peran unik dalam evolusi, bertindak sebagai agen transfer genetik antar spesies, yang dapat membantu dalam adaptasi dan evolusi spesies inang. Penggunaan virus dalam terapi gen, khususnya menggunakan vektor virus yang telah dimodifikasi agar tidak berbahaya, menunjukkan potensi besar dalam mengobati penyakit genetik dan kanker.

Mekanisme infeksi virus, yang melibatkan penyusupan materi genetik ke dalam sel inang, telah menjadi subjek penelitian intensif. Penelitian ini telah mengarah pada pengembangan strategi pencegahan dan terapi yang lebih efektif, termasuk vaksin dan obat antiviral. Misalnya, teknologi vaksin mRNA, yang telah mencapai sorotan global selama pandemi COVID-19, adalah hasil dari dekade penelitian tentang mekanisme virus dan bagaimana sistem imun meresponsnya.

Selain itu, kemajuan dalam teknologi seperti mikroskop elektron cryo dan tomografi telah memungkinkan peneliti untuk memvisualisasikan virus pada tingkat resolusi atom. Hal ini tidak hanya memberikan wawasan tentang struktur virus tetapi juga mekanisme interaksi mereka dengan sel inang. Pengetahuan ini penting dalam desain molekuler obat antiviral dan vaksin yang lebih spesifik dan efektif.

Dalam konteks bioinformatika dan AI, analisis data besar dari sekuensing virus telah memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang variasi virus dan dinamika evolusinya. Teknik-teknik ini membantu dalam pemodelan penyebaran virus dan prediksi wabah, memungkinkan respons kesehatan masyarakat yang lebih cepat dan lebih tepat. AI juga berpotensi dalam

mengidentifikasi target terapeutik baru dan mempercepat proses pengembangan obat.

Pendekatan futuristik lainnya termasuk penggunaan virus dalam nanoteknologi. Misalnya, penggunaan kapsid virus sebagai pembawa obat dalam pengiriman terapi bertarget menawarkan cara baru untuk mengatasi tantangan dalam pengobatan penyakit.

Integrasi dari semua aspek penelitian virus ini - dari biologi molekuler hingga nanoteknologi, dan dari bioinformatika hingga AI - membuka era baru dalam pemahaman kita tentang virus. Ini tidak hanya akan mengarah pada terapi yang lebih efektif untuk penyakit yang disebabkan oleh virus tetapi juga akan memperluas pemahaman kita tentang kehidupan pada tingkat molekuler, mempengaruhi banyak bidang dalam biologi dan kedokteran. Pendekatan multidisiplin dan holistik dalam penelitian virus sangat penting dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan kompleks tentang kehidupan dan dalam mengembangkan solusi inovatif untuk tantangan kesehatan di masa depan.

1.2.3 Jamur: Diversitas dan Peran dalam Kesehatan Manusia

Jamur, organisme eukariotik yang meliputi ragi, kapang, dan jamur multiseluler, merupakan kelompok biologis yang luar biasa beragam. Mereka memiliki peran penting dalam ekosistem sebagai dekomposer, menguraikan materi organik dan memainkan peran kunci dalam siklus nutrisi. Dalam konteks kesehatan manusia, beberapa jamur bersifat patogen, menyebabkan infeksi seperti kandidiasis dan aspergilosis. Namun, jamur juga memberikan kontribusi positif yang signifikan, terutama dalam pembuatan antibiotik seperti penisilin, serta dalam industri makanan dan minuman. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa mikrobioma jamur (*mycobiome*) memiliki peran yang belum sepenuhnya dipahami dalam kesehatan manusia, mirip dengan bakteri dalam mikrobioma usus. Pendekatan futuristik dalam penelitian jamur melibatkan eksplorasi potensi mereka dalam bioteknologi, termasuk

pengembangan biofuel, pengolahan limbah, dan sebagai sumber baru antibiotik dan enzim.

Jamur, dengan keanekaragaman dan kompleksitasnya, terus menginspirasi penelitian yang mendalam dan inovatif. Di luar peran mereka sebagai patogen dan dekomposer, jamur memiliki potensi luar biasa dalam bidang seperti bioteknologi, kedokteran, dan perlindungan lingkungan. Misalnya, dalam industri farmasi, jamur telah menjadi sumber penting untuk pengembangan antibiotik, antikanker, dan obat-obat lainnya. Penisilin, yang dihasilkan oleh jamur *Penicillium*, adalah salah satu contoh paling terkenal, tetapi hanya menyentuh permukaan dari apa yang mungkin ditemukan dalam keanekaragaman jamur.

Penelitian terbaru dalam mikrobioma manusia menunjukkan bahwa jamur memainkan peran yang jauh lebih signifikan dalam kesehatan manusia daripada yang sebelumnya dipahami. Mycobiome, komunitas jamur yang hidup di dan dalam tubuh manusia, berinteraksi dengan bakteri, virus, dan sel inang dalam cara yang kompleks, mempengaruhi segalanya dari pencernaan hingga respons imun. Pemahaman yang lebih dalam tentang mycobiome dapat membuka pintu untuk terapi baru dalam mengobati penyakit autoimun, alergi, dan bahkan kondisi mental.

Dalam bioteknologi, jamur memiliki potensi luar biasa untuk mengatasi beberapa tantangan global paling mendesak. Misalnya, mereka dapat dimanfaatkan dalam produksi biofuel sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan daripada bahan bakar fosil. Jamur juga dapat digunakan dalam bioremediasi, menggunakan kemampuan alami mereka untuk mendegradasi atau mengubah polutan menjadi senyawa yang kurang berbahaya.

Pengembangan enzim jamur untuk aplikasi industri adalah area yang berkembang pesat. Enzim dari jamur dapat digunakan dalam berbagai proses, termasuk pembuatan kertas, pengolahan limbah, dan bahkan dalam industri pangan dan minuman. Karena kemampuan mereka untuk bekerja di bawah berbagai kondisi pH dan suhu, enzim jamur menawarkan fleksibilitas yang lebih besar dibandingkan dengan sumber lain.

Pada tingkat molekuler, kemajuan dalam teknik sekuensing dan biologi sintetis membuka kemungkinan untuk mengubah genom jamur demi menghasilkan senyawa yang berharga atau meningkatkan efisiensi proses yang ada. Misalnya, rekayasa ragi untuk menghasilkan protein terapeutik atau mengoptimalkan produksi metabolit sekunder.

Secara keseluruhan, potensi jamur di berbagai bidang sains dan industri sangat luas. Dengan pendekatan interdisipliner dan teknologi canggih, masa depan penelitian jamur akan membawa inovasi yang tidak hanya memajukan pemahaman kita tentang kehidupan tetapi juga membantu dalam mengatasi beberapa tantangan paling mendesak di dunia, mulai dari perubahan iklim hingga kesehatan manusia. Pendekatan futuristik ini, yang menggabungkan biologi, bioteknologi, ekologi, dan sains material, akan terus mengungkap kemungkinan baru dalam dunia jamur yang menarik.

1.2.4 Protozoa dan Helmint: Ciri-Ciri dan Siklus Hidup

Protozoa dan helmint, kedua kelompok parasit utama, memiliki peran penting dalam penyakit manusia dan hewan. Protozoa, organisme uniseluler, menyebabkan penyakit seperti malaria (*Plasmodium*), amebiasis (*Entamoeba*), dan giardiasis (*Giardia*). Helmint, yang termasuk cacing bulat, cacing pita, dan cacing trematoda, bertanggung jawab atas kondisi seperti schistosomiasis dan filariasis. Siklus hidup mereka seringkali kompleks, melibatkan berbagai tahap dan terkadang memerlukan inang perantara. Pengetahuan tentang siklus hidup ini krusial dalam pengembangan strategi pencegahan dan pengobatan. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian tentang protozoa dan helmint telah bergeser ke pendekatan yang lebih integratif, memanfaatkan teknologi genetika dan molekuler untuk memahami mekanisme patogenitas mereka dan mengembangkan vaksin dan terapi yang lebih efektif. Selain itu, studi tentang interaksi parasit dengan inang dan ekosistem lebih luas telah memberikan wawasan penting tentang dinamika penyakit dan cara-cara untuk mengontrol penyebaran penyakit parasit.

Protozoa dan helminth, dengan siklus hidup dan mekanisme infeksi mereka yang kompleks, terus menjadi subjek penelitian yang sangat penting dalam parasitologi. Pemahaman yang lebih dalam tentang karakteristik dan perilaku ini tidak hanya penting untuk pengendalian penyakit tetapi juga memberikan wawasan penting tentang evolusi dan ekologi.

Protozoa: Karakteristik dan Penelitian

Protozoa, sebagai organisme uniseluler, menunjukkan tingkat adaptasi dan keberagaman yang tinggi. Mereka dapat berkembang biak dengan cepat dan bervariasi dalam cara mereka berinteraksi dengan inang manusia atau hewan. Misalnya, Plasmodium, penyebab malaria, memiliki siklus hidup yang melibatkan perubahan antara inang manusia dan nyamuk. Pemahaman tentang siklus ini telah krusial dalam mengembangkan strategi pengendalian penyakit, seperti intervensi terhadap vektor nyamuk dan pengembangan vaksin.

Perkembangan teknologi seperti mikroskopi canggih, sekuensing genetik, dan pengeditan gen telah membuka jalan bagi penemuan baru dalam biologi protozoa. Teknik-teknik ini memungkinkan peneliti untuk mempelajari ekspresi gen dan jalur metabolik protozoa, memberikan wawasan tentang cara kerja organisme ini pada tingkat molekuler. Informasi ini sangat penting untuk mengembangkan obat-obatan yang lebih efektif dan vaksin yang bertarget.

Helminth: Kompleksitas dan Tantangan

Helminth, termasuk cacing bulat, cacing pita, dan cacing trematoda, memiliki siklus hidup yang seringkali memerlukan inang perantara. Proses ini menambah tingkat kompleksitas dalam pengembangan strategi pengendalian dan pengobatan. Penelitian terbaru telah difokuskan pada memahami interaksi helminth dengan sistem imun inang, yang dapat memberikan wawasan tentang cara mengembangkan respons imun yang lebih efektif terhadap infeksi.

Studi genetika dan molekuler pada helminth telah membuka kemungkinan untuk mengidentifikasi target

terapeutik baru. Misalnya, identifikasi gen atau jalur spesifik yang penting untuk kelangsungan hidup cacing dapat mengarah pada pengembangan obat yang lebih selektif dan kurang toksik bagi inang manusia.

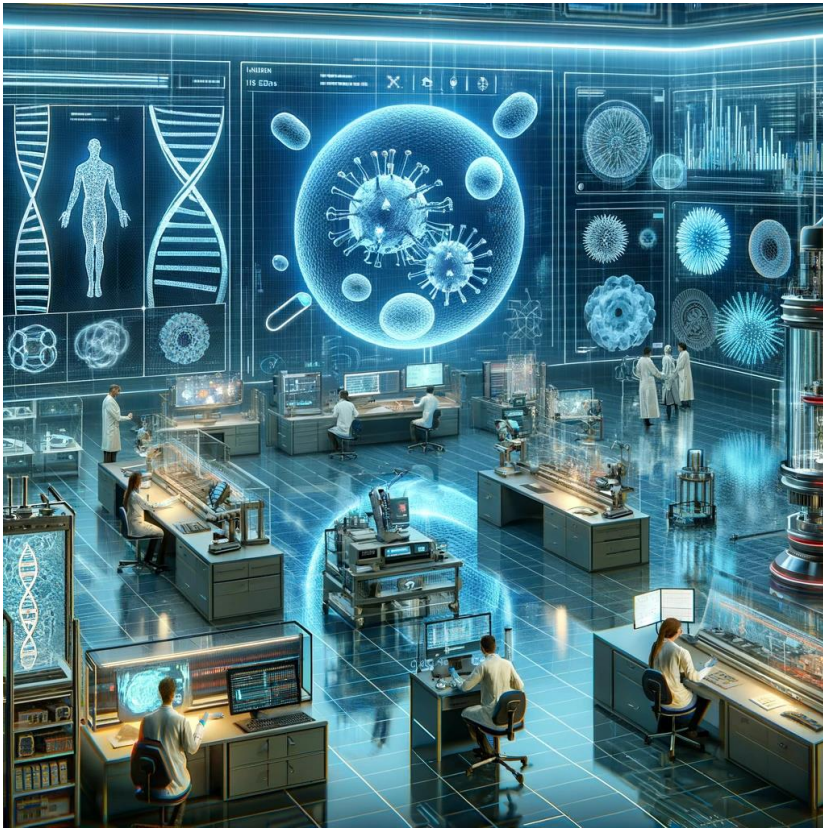
Selain itu, pemahaman yang lebih mendalam tentang helmint dari sudut pandang genetika dan molekuler juga membantu dalam mengatasi masalah resistensi obat. Helmint, seperti banyak patogen lainnya, dapat mengembangkan resistensi terhadap terapi yang ada, sehingga menemukan target baru untuk intervensi farmakologis sangat penting. Dengan mengidentifikasi dan memanfaatkan jalur atau gen spesifik yang vital bagi kelangsungan hidup helmint, peneliti dapat mengembangkan obat baru yang lebih efektif dalam mengatasi resistensi dan meningkatkan hasil pengobatan.

Teknologi canggih seperti pengurutan genom dan teknik sunting gen CRISPR-Cas9 telah memungkinkan peneliti untuk tidak hanya mengidentifikasi gen-gen penting dalam helmint, tetapi juga untuk mempelajari fungsi mereka secara lebih rinci. Hal ini membuka jalan bagi pendekatan yang lebih tepat sasaran dalam pengembangan obat dan vaksin terhadap helmint.

Selanjutnya, studi tentang interaksi helmint dengan sistem imun inang memberikan wawasan penting tentang mekanisme evasi imun yang digunakan oleh parasit ini. Helmint seringkali memiliki strategi yang rumit untuk menghindari atau memanipulasi respons imun inang, yang dapat mengajarkan kita tentang cara kerja sistem imun manusia itu sendiri. Memahami taktik ini dapat mengarah pada strategi baru dalam merancang terapi imunomodulator yang dapat meningkatkan kemampuan alami tubuh untuk melawan infeksi helmint.

Kemajuan ini juga memungkinkan pendekatan yang lebih holistik dalam mengatasi infeksi helmint. Dengan mempertimbangkan faktor lingkungan, sosial-ekonomi, dan perilaku yang berkontribusi pada penyebaran helmint, strategi pengendalian dapat dikembangkan untuk mengurangi prevalensi dan dampak helmintiasis. Pendidikan kesehatan masyarakat, peningkatan sanitasi, dan akses ke air bersih merupakan komponen penting dari upaya ini.

Di masa depan, integrasi antara penelitian dasar dan aplikatif, melibatkan kerjasama antar disiplin ilmu, akan menjadi kunci dalam mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh helmint. Dengan pendekatan yang berbasis bukti dan multidisiplin, kemungkinan besar kita akan melihat kemajuan signifikan dalam pengendalian dan pengobatan infeksi helmint.



Laboratorium masa depan
Desain oleh: Dito Anurogo dengan bantuan AI.

Integrasi Penelitian dan Pendekatan Masa Depan

Pendekatan integratif yang menggabungkan parasitologi dengan bidang lain seperti imunologi, genetika, dan biologi molekuler sangat penting untuk memahami protozoa dan

helminth. Hal ini memungkinkan penelitian yang lebih mendalam tentang mekanisme patogenitas dan interaksi inang-parasit.

Selain itu, pentingnya pemodelan ekosistem dalam memahami penyebaran penyakit parasit menjadi semakin diakui. Studi tentang bagaimana perubahan lingkungan, seperti perubahan iklim dan urbanisasi, memengaruhi penyebaran vektor penyakit (seperti nyamuk dan tikus) dapat membantu dalam pengembangan strategi pencegahan penyakit yang lebih efektif.

Dalam konteks kesehatan global, pemahaman yang lebih baik tentang parasit ini juga dapat membantu dalam mengembangkan strategi kesehatan masyarakat yang lebih efektif, terutama di daerah di mana penyakit parasit endemik.

Akhirnya, pendekatan holistik yang mempertimbangkan baik dimensi biologis maupun sosial-ekonomi infeksi parasit akan sangat penting. Ini termasuk pendidikan dan intervensi kesehatan masyarakat, serta penelitian dan pengembangan obat dan vaksin. Dengan mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu dan menggabungkan teknologi canggih dengan strategi kesehatan masyarakat, kita dapat mengharapkan kemajuan yang signifikan dalam pengendalian dan pencegahan penyakit yang disebabkan oleh protozoa dan helminth.

1.3 Interaksi Mikroorganisme dan Parasit dengan Inang

1.3.1 Mekanisme Patogenesis

Mekanisme patogenesis dalam interaksi mikroorganisme dan parasit dengan inangnya melibatkan serangkaian proses kompleks di mana patogen menginfeksi dan menyebabkan penyakit pada inang. Proses ini mencakup adhesi ke sel inang, invasi sel, penghindaran sistem imun, dan replikasi. Bakteri patogen, misalnya, dapat mengeluarkan toksin atau enzim yang merusak sel inang atau mengganggu fungsi normalnya. Virus memasuki sel inang dan menggunakan mesin seluler inang untuk replikasi. Patogenesis juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan genetik dari inang, yang menentukan seberapa efektif patogen menginfeksi dan menyebabkan penyakit. Pemahaman

mendalam tentang mekanisme patogenesis penting untuk pengembangan strategi pencegahan dan pengobatan penyakit infeksi, dan dalam era genomics dan proteomics, ini menjadi lebih terfokus pada tingkat molekuler dan genetik.

1.3.2 Respon Imun terhadap Infeksi

Respon imun inang terhadap infeksi adalah pertahanan utama melawan patogen. Ini melibatkan sistem imun bawaan dan adaptif. Sistem imun bawaan memberikan respons cepat melalui sel-sel seperti makrofag dan neutrofil, serta mekanisme seperti inflamasi dan demam. Sistem imun adaptif memberikan respons yang lebih spesifik dan bertahan lama, melibatkan limfosit seperti sel B dan sel T. Sel B menghasilkan antibodi yang mengikat patogen, sedangkan sel T membantu mengatur respons imun dan membunuh sel yang terinfeksi. Vaksinasi berfungsi dengan memicu sistem imun untuk mengingat patogen, memberikan perlindungan jangka panjang. Terapi imunomodulator dan vaksin terbaru, termasuk penggunaan RNA untuk menginduksi respons imun, menandakan era baru dalam pencegahan dan pengobatan penyakit infeksi.

Respon imun terhadap infeksi, yang melibatkan interaksi kompleks antara sistem imun bawaan dan adaptif, terus menjadi fokus utama dalam penelitian biomedis. Perkembangan terbaru dalam bidang ini membuka jalan bagi terapi yang lebih inovatif dan efektif, yang berpotensi merevolusi cara kita mengobati dan mencegah penyakit infeksi.

Imunoterapi dan Terapi Genetik

Salah satu area inovatif dalam respon imun adalah pengembangan imunoterapi, yang menggunakan dan meningkatkan sistem imun inang untuk melawan infeksi dan penyakit lainnya, seperti kanker. Terapi ini dapat melibatkan penggunaan antibodi monoklonal yang dirancang untuk mengenali dan menyerang sel-sel spesifik, termasuk sel yang terinfeksi oleh patogen. Selain itu, terapi genetik, yang memodifikasi gen dalam sel inang untuk meningkatkan atau

mengubah respons imun, menawarkan potensi besar dalam mengobati penyakit yang sebelumnya sulit diatasi.

Imunoterapi telah terbukti sangat efektif dalam pengobatan beberapa jenis kanker, seperti melanoma dan beberapa jenis leukemia, dengan terapi seperti pemblokir checkpoint imun memberikan hasil yang signifikan. Terapi ini bekerja dengan memblokir protein yang biasanya menahan respons imun, memungkinkan sistem kekebalan tubuh untuk menyerang sel kanker secara lebih efektif. Pengembangan vaksin terapeutik yang memicu sistem imun untuk menyerang sel kanker juga merupakan area penelitian yang sangat aktif dan menjanjikan.

Di sisi lain, terapi genetik menawarkan kemungkinan memperbaiki atau mengganti gen yang rusak atau tidak berfungsi, atau memasukkan gen baru untuk membantu melawan penyakit. Contoh terkini dari terapi genetik yang sukses adalah penggunaan CAR-T (*Chimeric Antigen Receptor T-cell*) therapy dalam pengobatan beberapa jenis kanker darah. Dalam terapi ini, sel T dari pasien dimodifikasi secara genetik di laboratorium untuk menghasilkan reseptor khusus yang mengenali protein pada sel kanker, dan kemudian disuntikkan kembali ke dalam pasien untuk menyerang kanker.

Selain kanker, terapi genetik juga sedang dijajaki sebagai pengobatan untuk berbagai penyakit genetik dan autoimun. Misalnya, penyakit yang disebabkan oleh satu mutasi genetik, seperti fibrosis sistik atau beberapa jenis distrofi otot, dapat menjadi target potensial untuk terapi genetik. Dengan mengganti atau memperbaiki gen yang rusak, terapi ini dapat memberikan solusi jangka panjang atau bahkan permanen untuk penyakit tersebut.

Namun, tantangan yang signifikan masih ada dalam kedua bidang ini. Dalam imunoterapi, mengidentifikasi target yang tepat untuk sel-sel kanker dan menghindari efek samping, seperti kerusakan pada sel normal atau respons imun yang berlebihan, adalah area penelitian yang kritis. Demikian pula, dalam terapi genetik, isu-isu seperti pengiriman gen yang aman dan efektif,

potensi efek samping jangka panjang, dan etika penggunaan terapi genetik terus menjadi topik perdebatan dan penelitian.

Di masa mendatang, kemajuan di bidang imunologi dan genetika, bersamaan dengan pengembangan teknologi baru, akan terus membuka jalan bagi terapi inovatif ini, menjanjikan perbaikan signifikan dalam pengobatan berbagai kondisi medis yang kompleks.

Vaksinasi: Pendekatan Molekuler dan Personalisasi

Vaksinasi, bentuk pencegahan penyakit yang paling efektif, terus berevolusi dengan kemajuan dalam bioteknologi. Pengembangan vaksin RNA, seperti yang digunakan dalam vaksin COVID-19, adalah langkah revolusioner dalam bidang ini. Teknologi ini memungkinkan untuk desain cepat dan produksi vaksin yang dapat disesuaikan dengan cepat terhadap varian baru dari patogen. Selanjutnya, pendekatan personalisasi dalam vaksinasi, di mana vaksin dirancang berdasarkan profil genetik atau imunologis individu, dapat meningkatkan efektivitas dan mengurangi efek samping.

Pendekatan molekuler dalam vaksinasi, terutama dengan vaksin RNA, membuka kemungkinan untuk mengembangkan vaksin terhadap berbagai penyakit yang sebelumnya sulit untuk divaksinasi. Teknologi vaksin RNA memungkinkan sintesis cepat antigen patogen hanya dengan mengetahui urutan genetiknya. Ini sangat berharga dalam menghadapi patogen yang cepat bermutasi seperti virus influenza atau HIV, di mana kemampuan untuk cepat menyesuaikan komposisi vaksin sangat penting.

Di samping itu, pendekatan personalisasi dalam vaksinasi bertujuan untuk meningkatkan efektivitas vaksin dengan menyesuaikannya dengan karakteristik imunologis individu. Misalnya, penelitian dalam farmakogenomika dapat membantu mengidentifikasi bagaimana variasi genetik individu mempengaruhi respons mereka terhadap vaksin. Hal ini dapat memungkinkan pengembangan vaksin yang lebih spesifik, yang dapat menghasilkan respon imun yang lebih kuat atau mengurangi risiko reaksi advers.

Selain itu, teknologi seperti mikroarray dan teknologi sekuen berikutnya (next-generation sequencing) telah memungkinkan peneliti untuk memeriksa respons imun terhadap vaksin pada tingkat molekuler yang sangat detail. Ini membantu dalam memahami mekanisme imunologis yang mendasari respons terhadap vaksin dan dapat membimbing pengembangan vaksin yang lebih efektif dan lebih aman.

Pendekatan personalisasi ini juga membuka jalan untuk pengembangan vaksin kanker. Dengan menargetkan antigen yang spesifik untuk tumor individu, vaksin kanker dapat merangsang sistem imun untuk menyerang sel kanker. Meskipun ini adalah area yang masih dalam penelitian intensif, potensinya dalam pengobatan kanker sangat besar.

Meskipun ada banyak kemajuan, tantangan tetap ada, termasuk masalah keamanan, penerimaan publik terhadap vaksin yang disesuaikan secara genetik, dan pertimbangan etika yang terkait dengan terapi genetik. Selain itu, produksi dan distribusi vaksin yang disesuaikan pada skala besar dapat menimbulkan tantangan logistik dan biaya.

Kemajuan dalam teknologi molekuler dan pendekatan personalisasi dalam vaksinasi menjanjikan perbaikan besar dalam pencegahan penyakit. Namun, pencapaian ini harus diimbangi dengan penelitian lanjutan, dialog etis yang terbuka, dan strategi implementasi yang efektif untuk memastikan manfaatnya dapat dirasakan secara luas di masyarakat.

Microbiome dan Respon Imun

Penelitian terkini juga mengungkapkan hubungan antara mikrobioma dan sistem imun. Mikrobioma, khususnya mikrobioma usus, memainkan peran penting dalam modulasi sistem imun. Keseimbangan mikrobioma dapat mempengaruhi respon imun terhadap patogen dan telah dikaitkan dengan berbagai penyakit, termasuk penyakit autoimun dan alergi. Manipulasi mikrobioma melalui probiotik, prebiotik, atau terapi transplantasi mikrobioma menjadi area penelitian yang menjanjikan dalam modulasi respon imun.

Pemahaman yang mendalam tentang hubungan antara mikrobioma dan sistem imun telah membawa perspektif baru dalam pengobatan dan pencegahan penyakit. Penelitian telah menunjukkan bahwa mikrobioma usus yang sehat dan beragam dapat membantu dalam pengembangan sistem imun yang kuat, sementara disbiosis mikrobioma – ketidakseimbangan mikroorganisme di dalam tubuh – dapat berkontribusi terhadap perkembangan kondisi inflamasi dan autoimun.

Studi-studi ini telah mengarah pada penggunaan probiotik dan prebiotik sebagai cara untuk memodifikasi mikrobioma untuk tujuan terapeutik. Probiotik, yang merupakan bakteri hidup yang bermanfaat, dapat membantu dalam mengembalikan atau mempertahankan keseimbangan mikrobioma yang sehat. Prebiotik, yang merupakan makanan bagi mikroorganisme baik di usus, juga dapat digunakan untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikrobioma yang sehat.

Selain itu, terapi transplantasi mikrobioma, yang melibatkan transfer mikrobioma sehat dari donor ke penerima, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam mengobati kondisi seperti *Clostridium difficile* infeksi dan bahkan sedang diteliti untuk potensi aplikasinya dalam kondisi lain seperti penyakit inflamasi usus, obesitas, dan beberapa kondisi autoimun.

Pemahaman ini juga membuka jalan bagi pengembangan vaksin dan terapi imun yang lebih tepat sasaran. Misalnya, dengan memahami bagaimana mikrobioma mempengaruhi respon imun, vaksin dapat dirancang untuk lebih efektif dengan mempertimbangkan status mikrobioma individu. Demikian pula, pengobatan untuk kondisi autoimun dan alergi dapat disesuaikan untuk mengatasi ketidakseimbangan spesifik dalam mikrobioma.

Pertimbangan tentang interaksi antara mikrobioma, diet, dan faktor lingkungan juga menjadi penting. Diet dan gaya hidup memainkan peran kunci dalam menentukan komposisi mikrobioma, dan oleh karena itu, modifikasi dalam diet dan gaya hidup dapat menjadi bagian dari strategi terapi.

Hubungan antara mikrobioma dan sistem imun adalah area penelitian yang dinamis dan berkembang, dengan potensi

yang signifikan untuk mempengaruhi pendekatan kita dalam pengobatan dan pencegahan berbagai penyakit. Dengan penelitian lebih lanjut, manipulasi mikrobioma dapat menjadi alat penting dalam kedokteran personalisasi dan strategi pengobatan yang lebih holistik.



Peran teknologi dalam riset
Desain oleh: Dito Anurogo dengan bantuan AI

Teknologi Bioinformatika dan AI dalam Imunologi

Penggunaan teknologi bioinformatika dan AI telah meningkatkan pemahaman kita tentang sistem imun. Analisis big data memungkinkan identifikasi pola dalam respons imun, yang dapat mengarah pada pengembangan strategi pencegahan dan

pengobatan yang lebih efektif. AI, dengan kemampuannya dalam pembelajaran mesin, dapat membantu dalam merancang vaksin baru dan mengidentifikasi target terapeutik untuk obat imunomodulator.

Teknologi bioinformatika dan AI dalam imunologi memanfaatkan data yang luas dan kompleks dari penelitian imunologis untuk mengungkap pemahaman baru. Misalnya, analisis genomik dan proteomik menggunakan bioinformatika dapat membantu dalam mengidentifikasi gen dan protein yang terlibat dalam respons imun. Hal ini membuka jalan untuk pengembangan terapi genetik yang bertujuan pada gen-gen tertentu atau pembuatan vaksin yang menargetkan protein spesifik pada patogen.

AI dan pembelajaran mesin memiliki peran penting dalam memproses dan menganalisis kumpulan data besar ini. Algoritma pembelajaran mesin dapat menemukan hubungan antara variabel yang mungkin tidak terlihat melalui analisis manual, memungkinkan penemuan target obat baru atau jalur imunologis yang belum dipahami sebelumnya. Ini sangat penting dalam penelitian kanker, di mana AI dapat membantu mengidentifikasi target untuk imunoterapi berbasis sel T.

Selanjutnya, AI juga memainkan peran kunci dalam desain vaksin. Dengan menggunakan data dari urutan patogen, AI dapat memprediksi bagian mana dari patogen yang paling mungkin menginduksi respons imun yang kuat, memandu pengembangan vaksin yang lebih efektif. Pendekatan ini telah digunakan dalam pengembangan vaksin COVID-19 dan memiliki potensi untuk digunakan dalam penyakit lain.

Di sisi lain, bioinformatika dan AI juga membantu dalam memahami mekanisme kekebalan tubuh pada tingkat yang lebih individual. Analisis data genomik dan imunofenotipik dari individu dapat membantu dalam mengidentifikasi pola unik yang dapat memengaruhi respons terhadap vaksin atau kecenderungan terhadap penyakit tertentu. Hal ini membuka jalan untuk pendekatan yang lebih personalisasi dalam imunologi dan pengobatan.

Selain itu, dalam konteks wabah penyakit, AI dapat digunakan untuk pemantauan dan peramalan. Dengan menganalisis data dari berbagai sumber, termasuk laporan kesehatan, media sosial, dan data genetik patogen, AI dapat membantu dalam memprediksi penyebaran penyakit dan mengidentifikasi area yang berpotensi mengalami wabah.

Integrasi teknologi bioinformatika dan AI dalam imunologi bukan hanya meningkatkan pemahaman kita tentang sistem imun tetapi juga membuka jalan bagi inovasi dalam pengembangan vaksin, terapi obat, dan strategi pencegahan penyakit. Seiring teknologi ini terus berkembang, potensi mereka dalam membantu mengatasi tantangan kesehatan global menjadi semakin jelas.

Tantangan dan Peluang

Meski kemajuan teknologi membawa harapan baru, tantangan tetap ada, termasuk memahami mekanisme resistensi dan kegagalan terapi, serta mengatasi masalah keamanan dan etika terkait terapi genetik. Selain itu, akses yang merata ke terapi canggih ini di seluruh dunia tetap menjadi kekhawatiran utama.

Dengan pendekatan yang lebih terintegrasi dan multidisipliner, yang menggabungkan imunologi, genetika, mikrobiologi, dan teknologi canggih, masa depan respon imun terhadap infeksi menjanjikan perbaikan signifikan dalam pencegahan, diagnosis, dan pengobatan penyakit infeksi. Penelitian yang sedang berlangsung dalam bidang ini tidak hanya akan memperdalam pemahaman kita tentang sistem imun tetapi juga akan membuka jalan untuk terobosan terapeutik yang dapat mengubah lanskap perawatan kesehatan.

1.3.3 Dinamika Simbiosis dan Komensalisme

Dinamika simbiosis dan komensalisme antara mikroorganisme, parasit, dan inangnya merupakan aspek penting dari ekologi mikrobiologi. Simbiosis mengacu pada hubungan saling menguntungkan, dimana kedua pihak mendapat manfaat. Misalnya, mikrobioma usus manusia, yang terdiri dari bakteri, jamur, dan virus, memainkan peran penting dalam

pencernaan dan regulasi sistem imun. Komensalisme adalah hubungan di mana satu pihak mendapat manfaat sementara yang lain tidak terpengaruh secara signifikan. Studi terbaru menyoroti bagaimana perubahan dalam mikrobioma dapat mempengaruhi kesehatan manusia, termasuk keterkaitan dengan penyakit kronis seperti diabetes dan obesitas. Pendekatan masa depan dalam memahami hubungan ini termasuk penggunaan teknologi seperti metagenomik untuk mempelajari mikrobioma dan mengidentifikasi peran spesifik mikroorganisme dalam kesehatan dan penyakit.

1.4 Teknologi dan Metodologi dalam Mikrobiologi dan Parasitologi

1.4.1 Teknik Kultur dan Identifikasi Mikroorganisme

Teknik kultur adalah dasar dalam mikrobiologi untuk mengisolasi dan mengidentifikasi mikroorganisme. Ini melibatkan penggunaan media kultur yang dirancang untuk menunjang pertumbuhan mikroorganisme tertentu, memungkinkan studi terperinci tentang sifat-sifat mereka. Metode kultur telah berevolusi dari media sederhana ke media selektif dan diferensial, memudahkan identifikasi spesies mikroorganisme berdasarkan karakteristik pertumbuhan dan morfologi koloni. Kemajuan dalam mikroskopi, seperti mikroskopi elektron dan mikroskopi fluoresens, juga memperkaya kemampuan kita untuk melihat struktur mikroskopis. Teknik biokimia seperti tes API dan ELISA digunakan untuk identifikasi lebih lanjut dan karakterisasi mikroorganisme. Kemajuan ini berperan penting dalam diagnosis klinis, penelitian lingkungan, dan bioteknologi.

1.4.2 Teknologi Molekuler dalam Studi Patogen

Teknologi molekuler telah merevolusi studi patogen. Teknik seperti PCR (*Polymerase Chain Reaction*) dan sekuensing gen telah membuka wawasan baru tentang genetika patogen, memungkinkan deteksi cepat dan akurat serta karakterisasi patogen pada level molekuler. Teknologi ini sangat penting dalam epidemiologi untuk melacak penyebaran penyakit,

mengidentifikasi sumber wabah, dan memantau resistensi terhadap antimikroba. Selain itu, teknik editing gen, seperti CRISPR-Cas9, menawarkan potensi besar dalam memodifikasi genetika mikroorganisme untuk aplikasi terapeutik, pengembangan vaksin, dan penelitian dasar. Pendekatan sistemik seperti metagenomik dan proteomik memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang komunitas mikroorganisme dan interaksi mereka dengan inang dan lingkungan.

Teknologi molekuler, khususnya dalam studi patogen, telah mengalami kemajuan luar biasa yang memengaruhi berbagai aspek penelitian dan aplikasi klinis. Kemampuan untuk mengkarakterisasi patogen pada tingkat DNA atau RNA dengan teknik seperti PCR dan sekuensing gen telah memberikan wawasan yang tidak pernah ada sebelumnya tentang biologi mikroorganisme. Ini tidak hanya meningkatkan efisiensi diagnostik tetapi juga memungkinkan penemuan target terapeutik baru.

Penggunaan metagenomik, yang memungkinkan analisis DNA dari sampel lingkungan, telah mengubah pemahaman kita tentang keanekaragaman mikrobiologi. Dengan teknik ini, ilmuwan dapat mengidentifikasi dan menganalisis komunitas mikroorganisme dalam berbagai habitat, dari usus manusia hingga lautan. Hal ini membuka kemungkinan untuk memahami bagaimana mikrobioma memengaruhi kesehatan manusia dan lingkungan secara keseluruhan.

Proteomik, analisis menyeluruh protein yang dihasilkan oleh organisme, memberikan dimensi lain dalam pemahaman kita tentang patogen. Teknik ini memungkinkan kita untuk memahami mekanisme aksi patogen dan interaksi mereka dengan inang pada level protein, yang bisa sangat penting dalam mengembangkan terapi baru.

Di sisi lain, teknologi CRISPR-Cas9, yang memungkinkan edit genetik yang tepat, telah membuka peluang baru dalam penelitian mikrobiologi. Kemampuan untuk mengubah secara spesifik urutan DNA dalam genom patogen memungkinkan penelitian dasar yang lebih mendalam dan pengembangan strategi terapeutik yang inovatif. Aplikasi CRISPR tidak terbatas

pada penelitian dasar saja, tetapi juga dalam pengembangan vaksin dan terapi genetik. Misalnya, dengan menggunakan CRISPR, peneliti dapat merancang vaksin yang lebih efektif dengan memodifikasi patogen untuk menghasilkan respons imun yang lebih kuat atau lebih spesifik.

Pengintegrasian teknologi AI dan big data dalam mikrobiologi dan parasitologi juga menjanjikan kemajuan besar. Dengan memanfaatkan kekuatan pemrosesan data besar dan pembelajaran mesin, peneliti dapat mengidentifikasi pola dalam penyebaran penyakit, resistensi antimikroba, dan bahkan memprediksi wabah masa depan. AI juga dapat membantu dalam perancangan obat dan vaksin dengan memprediksi struktur molekul dan interaksi biologis yang efektif.

Dalam konteks yang lebih futuristik, penggunaan nanoteknologi dalam pengiriman obat dan terapi bertarget merupakan area penelitian yang berkembang. Nanopartikel dapat dirancang untuk mengirimkan obat secara spesifik ke patogen atau sel yang terinfeksi, meningkatkan efikasi terapi sambil meminimalkan efek samping.

Secara keseluruhan, teknologi molekuler dalam studi patogen membuka jalan untuk era baru dalam mikrobiologi dan parasitologi. Kemajuan ini tidak hanya akan memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang patogen dan interaksi mereka dengan inang, tetapi juga memungkinkan pengembangan terapi yang lebih efektif, personal, dan berkelanjutan. Dengan pendekatan yang terintegrasi dan inovatif, masa depan mikrobiologi dan parasitologi sangat cerah, dengan potensi luar biasa untuk memengaruhi kesehatan manusia dan ekosistem secara global.

1.4.3 Penggunaan Model Hewan dalam Penelitian Parasitologi

Model hewan memainkan peran penting dalam penelitian parasitologi. Mereka memberikan sistem *in vivo* untuk mempelajari interaksi parasit dengan inang, patogenesis, dan pengujian terapi baru. Model ini berkisar dari cacing nematoda seperti *Caenorhabditis elegans*, yang digunakan untuk memahami

fungsi genetik dasar, hingga model mamalia seperti tikus, yang digunakan untuk mempelajari interaksi inang-parasit yang lebih kompleks. Model hewan juga penting dalam pengembangan vaksin dan uji coba obat antiparasit. Teknik pencitraan canggih dan teknologi biologis molekuler telah meningkatkan kemampuan kita untuk mempelajari parasit dalam inang, memberikan wawasan tentang mekanisme penyakit dan respon imun. Namun, etika penggunaan hewan dalam penelitian tetap menjadi pertimbangan penting, mendorong pengembangan metode alternatif dan penggunaan model yang lebih etis dan berkelanjutan.

Model hewan dalam penelitian parasitologi memegang kunci untuk banyak terobosan di masa depan, dari pemahaman mekanisme penyakit hingga pengembangan obat dan vaksin. Namun, pendekatan ini harus selalu mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan penelitian dan etika penggunaan hewan.

Peran Model Hewan dalam Penelitian Parasitologi

1. **Pemahaman Mekanisme Penyakit:** Model hewan memungkinkan peneliti untuk mempelajari bagaimana parasit berinteraksi dengan inang dan menyebabkan penyakit. Misalnya, tikus yang diinfeksi dengan spesies *Plasmodium* dapat memberikan wawasan berharga tentang perkembangan malaria dan mekanisme pertahanan inang.
2. **Pengembangan Obat dan Vaksin:** Dengan menggunakan model hewan, peneliti dapat menguji keamanan dan efikasi obat atau vaksin baru sebelum beralih ke uji coba manusia. Hal ini membantu dalam memastikan bahwa pengobatan yang dikembangkan tidak hanya efektif tetapi juga aman untuk digunakan.
3. **Studi Genetik dan Molekuler:** Organisme model seperti *C. elegans* menyediakan platform untuk mempelajari fungsi genetik yang mungkin berperan dalam resistensi atau kerentanan terhadap infeksi parasit. Teknik CRISPR-Cas9, misalnya, dapat digunakan untuk mengedit gen dalam model hewan ini untuk mempelajari efeknya pada infeksi parasit.

Inovasi dan Teknologi Baru dalam Penelitian Model Hewan

1. **Pemodelan Komputer dan AI:** Dengan kemajuan AI dan teknologi komputasi, simulasi komputer dapat digunakan untuk memodelkan interaksi parasit-inang. Ini dapat mengurangi ketergantungan pada model hewan dan membantu dalam memprediksi hasil tanpa uji coba langsung.
2. **Organ-on-a-Chip dan Kultur Sel 3D:** Teknologi seperti organ-on-a-chip dan kultur sel 3D memungkinkan peneliti untuk mempelajari interaksi parasit-inang dalam sistem yang lebih dekat menyerupai organisme hidup tanpa penggunaan hewan. Teknik ini dapat memberikan wawasan tentang mekanisme infeksi dan respon inang dalam lingkungan yang lebih terkontrol.
3. **Teknik Pencitraan Lanjutan:** Teknik pencitraan seperti mikroskop konfokal dan tomografi telah meningkatkan kemampuan kita untuk memvisualisasikan infeksi pada tingkat seluler dan sub-seluler dalam model hewan, memberikan pemahaman yang lebih detail tentang interaksi parasit-inang.

Tantangan Etis dan Masa Depan Penelitian

Etika dalam penggunaan model hewan tetap menjadi topik yang sangat penting. Ada tekanan yang meningkat untuk mengurangi penggunaan hewan dalam penelitian dan mencari alternatif yang etis. Pendekatan seperti prinsip 3R (*Reduction, Refinement, Replacement*) menjadi semakin penting dalam penelitian parasitologi.

1. **Reduction:** Mengurangi jumlah hewan yang digunakan dalam eksperimen.
2. **Refinement:** Memodifikasi teknik eksperimental untuk meminimalkan penderitaan hewan.
3. **Replacement:** Mengganti hewan dengan model non-hewan atau metode in vitro ketika memungkinkan.

Dalam jangka panjang, penelitian model hewan dalam parasitologi mungkin akan bergeser lebih banyak ke metode alternatif ini, didorong oleh kemajuan dalam teknologi,

peningkatan pemahaman tentang penyakit parasit, dan pertimbangan etis. Keselarasan antara inovasi ilmiah dan tanggung jawab etis akan menjadi kunci untuk kemajuan berkelanjutan dalam bidang ini.

1.5 Mikrobiologi dan Parasitologi dalam Konteks Global

1.5.1 Penyakit Infeksi Emerging dan Re-emerging

Penyakit infeksi yang emerging dan re-emerging menjadi perhatian kesehatan global utama karena dampaknya yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat. Penyakit emerging adalah penyakit infeksi yang muncul di populasi untuk pertama kalinya atau yang mungkin telah ada sebelumnya tetapi sedang meningkat secara dramatis dalam insidens atau distribusi geografis. Sementara itu, penyakit *re-emerging* adalah penyakit yang historis telah menurun dalam insiden tetapi kembali muncul. Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap fenomena ini termasuk urbanisasi, perubahan ekosistem, perjalanan internasional, dan perubahan pola perdagangan. Contoh penyakit seperti ini termasuk COVID-19, Zika, dan Ebola. Pentingnya surveillance global, kerjasama internasional, dan sistem kesehatan yang kuat ditekankan untuk mengendalikan penyebaran penyakit ini. Inovasi dalam vaksinasi, terapi antiviral, dan strategi pencegahan merupakan area penelitian kunci.

Penyakit infeksi emerging dan *re-emerging* menimbulkan tantangan unik dan signifikan dalam kesehatan global, memerlukan respons yang cepat, koordinasi internasional, dan inovasi dalam penelitian dan pengobatan.

1. Faktor Penyebab dan Dinamika Global

Faktor-faktor seperti urbanisasi, globalisasi, perubahan iklim, dan degradasi lingkungan berperan dalam munculnya penyakit baru dan kembali munculnya penyakit lama. Perubahan dalam pola interaksi manusia dengan lingkungan alam, seperti deforestasi dan kontak yang meningkat dengan hewan liar, juga meningkatkan risiko penyebaran patogen dari hewan ke manusia (zoonosis).

2. Surveillance dan Kerjasama Internasional

Dalam menghadapi ancaman ini, penting untuk memperkuat sistem surveillance penyakit global. Deteksi dini dan pelacakan penyebaran penyakit sangat penting untuk mencegah wabah besar. Kerjasama internasional dalam berbagi data, sumber daya, dan keahlian adalah kunci untuk mengatasi penyakit-penyakit ini secara efektif.

3. Inovasi dalam Vaksinasi dan Terapi

Kemajuan teknologi seperti vaksin mRNA telah membuka jalan bagi pengembangan vaksin yang cepat dan fleksibel terhadap patogen baru. Penelitian lanjutan dalam imunologi dan biologi molekuler dapat mengarah pada vaksin dan terapi antiviral yang lebih efektif dan dirancang khusus untuk mengatasi strain patogen yang beragam.

4. Pendekatan *One Health*

Pendekatan *One Health*, yang mengintegrasikan kesehatan manusia, hewan, dan lingkungan, sangat penting dalam mengatasi penyakit *emerging* dan *re-emerging*. Memahami hubungan antara kesehatan manusia dan ekosistem di mana kita hidup dapat membantu dalam mengidentifikasi dan mengurangi risiko penyakit baru.

5. Peran Teknologi dan Big Data

Teknologi canggih dan analisis big data dapat memainkan peran penting dalam memahami dan mengendalikan penyakit infeksi. Penggunaan AI dan machine learning dalam memodelkan penyebaran penyakit, mengidentifikasi pola infeksi, dan mengoptimalkan strategi respons dapat meningkatkan efektivitas tindakan kesehatan masyarakat.

6. Pendidikan dan Kesadaran Masyarakat

Meningkatkan kesadaran dan pendidikan di kalangan masyarakat tentang penyakit-penyakit ini, cara penyebarannya, dan tindakan pencegahan adalah penting untuk mengurangi risiko infeksi. Program-program pendidikan kesehatan publik yang efektif dapat memainkan peran penting dalam mengendalikan penyebaran penyakit. Dengan pendekatan yang komprehensif, integratif, dan berbasis bukti, komunitas global dapat lebih baik

dipersiapkan untuk menghadapi ancaman penyakit infeksi emerging dan *re-emerging*. Kolaborasi lintas sektoral, inovasi dalam penelitian dan pengembangan, serta keterlibatan masyarakat adalah kunci untuk mengatasi tantangan kesehatan global ini.

1.5.2 Resistensi Antimikroba dan Implikasinya

Resistensi antimikroba (AMR) merupakan tantangan kesehatan global yang semakin mendesak. Ini terjadi ketika mikroorganisme (seperti bakteri, virus, jamur, dan parasit) berubah setelah terpapar antimikroba (seperti antibiotik, antiviral, dan antifungal) dan kemudian antimikroba tersebut tidak lagi efektif. AMR dapat menyebabkan standar pengobatan menjadi tidak efektif, infeksi menjadi lebih sulit diobati, dan meningkatkan risiko penyebaran penyakit, morbiditas, dan mortalitas. Faktor-faktor seperti penggunaan antibiotik yang tidak tepat dan kurangnya pengembangan antibiotik baru memperburuk masalah ini. Pendekatan *One Health*, yang mengintegrasikan upaya kesehatan manusia, hewan, dan lingkungan, dianggap vital dalam mengatasi AMR. Pengembangan obat baru, strategi pengawasan, dan pendidikan kesehatan publik adalah bagian integral dari solusi.

Resistensi antimikroba (AMR) adalah salah satu tantangan kesehatan paling krusial di abad ke-21, dengan implikasi yang luas bagi pengobatan penyakit infeksi di seluruh dunia.

Strategi Multifaset untuk Mengatasi AMR

1. **Pengembangan Antibiotik Baru:** Ada kebutuhan mendesak untuk penemuan dan pengembangan antibiotik baru. Ini melibatkan penelitian untuk mengidentifikasi target biologis baru dalam patogen dan pengembangan molekul yang dapat mengganggu mekanisme resistensi yang ada. Bioteknologi dan farmakogenomik menawarkan jalan inovatif dalam desain obat ini.
2. **Pendekatan Terapi Alternatif:** Para peneliti juga mengeksplorasi terapi non-tradisional, termasuk penggunaan bakteriofag (virus yang menyerang bakteri),

terapi peptida antimikroba, dan penggunaan probiotik untuk mengendalikan infeksi yang resisten terhadap obat.

3. **Mengurangi Penggunaan Antibiotik yang Tidak Perlu:** Penggunaan antibiotik yang berlebihan dan tidak tepat adalah pendorong utama AMR. Edukasi untuk praktisi kesehatan dan publik tentang pentingnya penggunaan antibiotik yang bertanggung jawab adalah langkah penting. Sistem surveilans yang lebih baik untuk penggunaan antibiotik di sektor kesehatan dan pertanian juga sangat diperlukan.
4. **Pengawasan dan Diagnostik Cepat:** Mengembangkan metode diagnostik yang cepat dan akurat dapat membantu dalam penentuan terapi yang tepat, sehingga mengurangi penggunaan antibiotik yang tidak tepat. Teknologi seperti biosensor nanoteknologi dan platform diagnostik berbasis AI dapat mempercepat identifikasi patogen dan profil resistensinya.
5. **Pendekatan *One Health*:** AMR bukan hanya masalah kesehatan manusia tetapi juga berkaitan erat dengan kesehatan hewan dan lingkungan. Pendekatan *One Health*, yang melibatkan koordinasi antara berbagai disiplin dan sektor, penting untuk mengatasi masalah AMR secara holistik.
6. **Kolaborasi Global dan Kebijakan:** Mengatasi AMR memerlukan upaya kolaboratif di tingkat global. Ini termasuk pembagian data dan sumber daya, koordinasi kebijakan antara negara, dan investasi dalam penelitian dan pengembangan.
7. **Inovasi dalam Pendekatan Kesehatan Masyarakat:** Pengembangan strategi kesehatan masyarakat yang inovatif, termasuk kampanye kesadaran, program imunisasi yang diperluas, dan strategi pencegahan infeksi, adalah kunci untuk mengurangi beban AMR.

Menuju Masa Depan dengan AMR yang Terkendali

Pandangan ke depan dalam menghadapi AMR membutuhkan integrasi antara penelitian canggih, pendidikan,

kebijakan kesehatan publik, dan kerjasama internasional. Peran teknologi canggih seperti AI, genomika, dan nanoteknologi akan menjadi semakin penting dalam mengidentifikasi solusi baru. Pada akhirnya, mengatasi AMR membutuhkan pendekatan yang komprehensif dan berkelanjutan, menggabungkan sains, teknologi, dan kebijakan untuk melindungi kesehatan global di masa depan.

1.5.3 Perubahan Iklim dan Pengaruhnya terhadap Penyebaran Penyakit

Perubahan iklim memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyebaran penyakit infeksi. Pemanasan global dan perubahan pola cuaca mempengaruhi distribusi vektor penyakit (seperti nyamuk dan tikus) dan reservoir inang, sehingga mempengaruhi epidemi penyakit seperti malaria, demam dengue, dan penyakit Lyme. Perubahan ekosistem juga dapat menyebabkan munculnya penyakit zoonotik baru, di mana patogen berpindah dari hewan ke manusia. Pendekatan multi-disiplin yang mempertimbangkan ekologi, kesehatan hewan, dan kesehatan manusia diperlukan untuk memahami dan merespons dampak perubahan iklim pada penyakit infeksi. Strategi adaptasi dan mitigasi, seperti pengembangan infrastruktur kesehatan yang tahan terhadap perubahan iklim dan penelitian yang fokus pada pengaruh perubahan iklim terhadap penyakit, menjadi semakin penting.

Perubahan iklim bukan hanya masalah lingkungan, tetapi juga merupakan isu kesehatan global yang mendesak dengan dampak yang signifikan terhadap penyebaran dan munculnya penyakit infeksi.

Peran Perubahan Iklim dalam Penyebaran Penyakit

1. Perubahan Distribusi dan Perilaku Vektor Penyakit:

Peningkatan suhu dan perubahan pola hujan berdampak pada habitat vektor penyakit seperti nyamuk dan tikus. Ini mengubah geografi dan musim dari penyakit vektor seperti malaria dan demam dengue, meningkatkan risiko di daerah yang sebelumnya tidak terpengaruh.

2. **Munculnya Penyakit Zoonotik:** Perubahan iklim memengaruhi ekosistem dan interaksi antara spesies, yang dapat menyebabkan munculnya penyakit zoonotik baru. Misalnya, perubahan iklim dapat memperluas habitat untuk hewan liar yang membawa patogen, meningkatkan interaksi antara hewan liar, ternak, dan manusia, dan memfasilitasi penyebaran patogen.
3. **Stres Lingkungan dan Imunitas:** Faktor-faktor stres lingkungan, seperti kekeringan dan polusi udara, dapat memengaruhi kesehatan manusia dan kekebalan, membuat populasi lebih rentan terhadap penyakit.

Pendekatan Terintegrasi untuk Menangani Dampak Perubahan Iklim :

1. **Pengawasan Epidemiologis dan Prediksi:** Memperkuat sistem pengawasan penyakit dan menggunakan model prediktif untuk memahami bagaimana perubahan iklim akan mempengaruhi penyebaran penyakit. Teknologi seperti AI dan big data dapat memainkan peran penting dalam analisis tren dan prediksi wabah.
2. **Kolaborasi *One Health*:** Pendekatan *One Health* yang menggabungkan kesehatan manusia, hewan, dan ekologi esensial untuk mengatasi dampak perubahan iklim terhadap penyakit. Ini termasuk kerjasama lintas disiplin ilmu dan lintas sektor untuk memahami dan menanggapi tantangan yang disajikan oleh perubahan iklim.
3. **Adaptasi dan Mitigasi Infrastruktur Kesehatan:** Mengembangkan infrastruktur kesehatan yang tangguh dan mampu beradaptasi dengan perubahan iklim. Hal ini termasuk membangun fasilitas kesehatan yang tahan terhadap bencana alam dan mengintegrasikan pertimbangan perubahan iklim ke dalam perencanaan kesehatan publik.
4. **Edukasi dan Pemberdayaan Masyarakat:** Meningkatkan kesadaran dan pengetahuan masyarakat tentang hubungan antara perubahan iklim dan kesehatan. Program pendidikan yang fokus pada pencegahan dan pengurangan risiko penyakit yang terkait dengan perubahan iklim akan penting.

Menatap Masa Depan

Dalam menghadapi tantangan yang disajikan oleh perubahan iklim, pendekatan yang proaktif, berbasis bukti, dan kolaboratif diperlukan. Penelitian lanjutan tentang dampak perubahan iklim pada penyakit infeksi, pengembangan teknologi adaptif, dan kebijakan yang berorientasi pada kesehatan dan keberlanjutan lingkungan akan menjadi kunci untuk menjaga kesehatan global di masa yang akan datang. Ketersediaan untuk beradaptasi dan berevolusi dalam cara kita memahami dan menanggapi penyakit dalam konteks perubahan iklim adalah penting untuk memastikan kesehatan dan kesejahteraan generasi masa depan.

1.6 Masa Depan Mikrobiologi dan Parasitologi

1.6.1 Inovasi dalam Terapi dan Pencegahan Penyakit

Masa depan mikrobiologi dan parasitologi diperkaya dengan inovasi dalam pengembangan terapi dan strategi pencegahan penyakit. Bidang-bidang seperti terapi fag, yang menggunakan bakteriofag untuk menargetkan patogen spesifik, menjanjikan alternatif baru dalam mengatasi resistensi antibiotik. Kemajuan dalam teknologi vaksin, seperti penggunaan platform mRNA, telah membuka jalan untuk respons cepat terhadap penyakit infeksi emerging. Selain itu, pengembangan terapi berbasis mikrobioma, yang memanfaatkan hubungan simbiosis antara mikroorganisme dan inang manusia, menawarkan potensi besar dalam pengobatan dan pencegahan penyakit. Pendekatan terapi yang lebih personal dan tepat sasaran, didorong oleh penelitian genetika dan molekuler yang lebih canggih, diharapkan menjadi norma dalam pengobatan masa depan.

Masa depan mikrobiologi dan parasitologi dipenuhi dengan potensi inovasi yang dapat mengubah cara kita mengobati dan mencegah penyakit.

1. Terapi Fag dan Aplikasinya

Terapi fag, menggunakan virus bakteriofag untuk menyerang bakteri patogen spesifik, menjadi semakin relevan dalam mengatasi resistensi antibiotik.

Pengembangan lebih lanjut dari terapi fag yang disesuaikan dapat menyediakan solusi yang lebih efektif dan spesifik terhadap infeksi bakteri yang resisten terhadap obat. Kolaborasi antara genetika, bioteknologi, dan klinis diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan bakteriofag dalam pengobatan.

Salah satu tantangan utama dalam terapi fag adalah menemukan bakteriofag yang tepat untuk setiap jenis bakteri patogen. Keanekaragaman genetik bakteriofag memungkinkan mereka untuk menargetkan berbagai jenis bakteri, tetapi ini juga berarti bahwa proses pemilihan fag yang spesifik memerlukan penelitian yang mendalam. Selain itu, ada pertimbangan mengenai bagaimana bakteriofag dapat memengaruhi mikrobioma alami tubuh manusia, yang masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Namun, potensi terapi fag sangat besar. Bakteriofag memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan mutasi bakteri, yang berarti mereka dapat terus efektif bahkan ketika bakteri mengembangkan resistensi terhadap fag tertentu. Ini sangat penting dalam konteks resistensi antibiotik yang terus meningkat. Selain itu, fag dapat dirancang untuk sangat spesifik, meminimalkan efek samping yang sering dilihat dengan antibiotik yang luas spektrumnya.

Integrasi terapi fag dalam praktik medis memerlukan kerjasama antar-disiplin ilmu dan pendekatan regulasi yang hati-hati. Perlu ada standar untuk memastikan keamanan dan efikasi fag yang digunakan. Regulasi yang sesuai akan membantu dalam mengintegrasikan terapi fag ke dalam pengobatan konvensional, sambil memastikan bahwa pasien menerima perawatan yang aman dan efektif.

Edukasi kepada profesional medis dan masyarakat umum juga penting. Pengetahuan tentang cara kerja bakteriofag, manfaat, dan potensi risikonya perlu disampaikan dengan jelas untuk membangun kepercayaan dan penerimaan terhadap terapi fag. Dengan pendekatan ini,

terapi fag dapat menjadi bagian penting dari solusi untuk mengatasi tantangan resistensi antibiotik di masa depan.

2. Revolusi Teknologi Vaksin

Penggunaan platform mRNA dalam vaksin telah membuktikan efektivitasnya selama pandemi COVID-19. Kecepatan dan fleksibilitas dalam pengembangan vaksin mRNA menjanjikan respons yang lebih cepat terhadap penyakit infeksi emerging dan re-emerging. Selain itu, penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan vaksin yang dapat menargetkan berbagai patogen sekaligus, meningkatkan efisiensi dalam pencegahan penyakit.

Teknologi vaksin mRNA membuka pintu untuk strategi vaksinasi yang lebih personalisasi. Dengan kemampuan untuk menyesuaikan urutan mRNA, vaksin dapat dirancang untuk menargetkan karakteristik spesifik dari sistem imun individu, meningkatkan efektivitas dan mengurangi risiko reaksi yang tidak diinginkan. Pendekatan ini juga membuka kemungkinan untuk mengembangkan vaksin untuk kondisi yang sebelumnya sulit untuk divaksinasi, seperti beberapa jenis kanker dan penyakit autoimun.

Selain itu, teknologi vaksin mRNA berpotensi memainkan peran penting dalam memerangi perubahan virus dan bakteri. Dengan kemampuan untuk cepat memodifikasi urutan mRNA, vaksin dapat disesuaikan dengan cepat untuk menanggapi mutasi patogen. Ini akan sangat berharga dalam menghadapi pandemi atau wabah penyakit yang cepat berubah.

Penggunaan teknologi mRNA juga menawarkan manfaat logistik, seperti penyimpanan dan transportasi yang lebih mudah. Vaksin mRNA biasanya memerlukan kondisi penyimpanan yang kurang ketat dibandingkan dengan vaksin konvensional, yang berarti dapat lebih mudah didistribusikan di daerah-daerah dengan infrastruktur terbatas.

Secara keseluruhan, revolusi teknologi vaksin berbasis mRNA menandai babak baru dalam bidang imunologi dan

kesehatan masyarakat. Dengan terus berkembangnya penelitian dan aplikasi klinis, vaksin mRNA berpotensi mengubah cara kita merespons ancaman kesehatan global dan meningkatkan kesehatan manusia secara keseluruhan.

3. Pemanfaatan Mikrobioma dalam Terapi

Pemahaman yang berkembang tentang mikrobioma manusia telah membuka jalan untuk terapi baru. Manipulasi mikrobioma, baik melalui probiotik, prebiotik, atau terapi transplantasi mikrobioma, dapat berperan dalam pengobatan dan pencegahan penyakit, termasuk gangguan autoimun dan infeksi.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa mikrobioma memiliki pengaruh signifikan terhadap sistem imun, pencernaan, dan bahkan fungsi otak. Dengan memanfaatkan hubungan ini, terapi yang berbasis mikrobioma dapat dirancang untuk meningkatkan kesehatan dan keseimbangan tubuh. Misalnya, penggunaan probiotik dan prebiotik dapat membantu dalam memperkuat mikroflora usus yang sehat, yang berperan penting dalam pencegahan dan pengobatan gangguan pencernaan, penyakit inflamasi usus, dan bahkan kondisi psikologis seperti depresi dan kecemasan.

Terapi transplantasi mikrobioma, yang melibatkan transfer mikrobioma sehat dari donor ke penerima, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam mengobati kondisi seperti infeksi *Clostridium difficile*, yang sering terjadi akibat penggunaan antibiotik berlebihan. Prosedur ini juga sedang diteliti untuk potensi aplikasinya dalam pengobatan gangguan autoimun, obesitas, dan diabetes tipe 2.

Selain itu, penelitian lebih lanjut sedang dilakukan untuk memahami bagaimana komposisi mikrobioma spesifik dapat mempengaruhi kerentanan individu terhadap penyakit tertentu. Hal ini membuka peluang untuk terapi yang disesuaikan berdasarkan profil mikrobioma pribadi, yang dapat meningkatkan efektivitas pengobatan dan mengurangi efek samping.

Secara keseluruhan, pemanfaatan mikrobioma dalam terapi merupakan bidang yang sangat potensial, menawarkan pendekatan baru dan inovatif dalam pengobatan dan pencegahan berbagai penyakit. Seiring berkembangnya penelitian, kita dapat mengharapkan integrasi terapi mikrobioma ini ke dalam praktik klinis menjadi lebih umum, membawa dampak positif pada kesehatan global.

4. Pendekatan Terapi Personalisasi

Kemajuan dalam genetika dan genomika telah memungkinkan pendekatan yang lebih personal dalam pengobatan. Menganalisis genetika individu dan patogen dapat membantu dalam merancang terapi yang lebih efektif dan minim efek samping, memperhitungkan perbedaan individu dalam respons terhadap obat dan vaksin.

Pendekatan terapi personalisasi ini juga melibatkan penggunaan biomarker untuk mengidentifikasi kondisi kesehatan tertentu dan memprediksi respon terhadap terapi. Biomarker genetik, protein, atau molekul lain yang dapat diukur dalam tubuh, memberikan informasi penting tentang risiko penyakit, prognosis, dan respons terhadap pengobatan. Dengan memanfaatkan data ini, dokter dapat merancang strategi pengobatan yang lebih tepat dan efektif untuk setiap pasien.

Selain itu, pendekatan personalisasi ini berkontribusi pada pengembangan obat-obatan yang disesuaikan, dikenal sebagai terapi berbasis genom atau farmakogenomika. Dengan memahami variasi genetik yang mempengaruhi cara tubuh seseorang memetabolisme obat, dokter dapat menyesuaikan dosis dan jenis obat untuk mengurangi risiko efek samping dan meningkatkan keefektifan pengobatan.

Pendekatan terapi personalisasi juga berpotensi besar dalam pengobatan kanker. Dengan mengidentifikasi mutasi genetik yang spesifik pada tumor individu, terapi dapat ditargetkan untuk menyerang sel kanker secara spesifik, sambil meminimalkan kerusakan pada sel-sel sehat. Ini tidak

hanya meningkatkan kesempatan untuk pengobatan yang sukses tetapi juga secara signifikan mengurangi efek samping.

Penggunaan teknologi canggih seperti pengurutan DNA berkecepatan tinggi dan analisis data besar memainkan peran kunci dalam mempercepat kemajuan terapi personalisasi. Seiring dengan kemajuan ini, kita dapat mengharapkan peningkatan signifikan dalam efektivitas dan efisiensi perawatan kesehatan, dengan perawatan yang semakin disesuaikan dengan kebutuhan individu. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan hasil klinis tetapi juga dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya dalam sistem kesehatan.

5. Integrasi Teknologi Canggih

Teknologi seperti AI, nanoteknologi, dan bioinformatika dapat terintegrasi dalam penelitian dan pengembangan di mikrobiologi dan parasitologi. Misalnya, AI dapat digunakan untuk prediksi wabah penyakit, identifikasi target obat baru, dan desain vaksin yang efisien. Nanoteknologi dapat memainkan peran dalam pengiriman obat yang tepat sasaran dan terapi bertarget.

Integrasi teknologi canggih ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan efektivitas penelitian, tetapi juga membuka jalan bagi inovasi dalam pengobatan dan pencegahan penyakit. Dalam konteks bioinformatika, analisis data besar memungkinkan peneliti untuk menggali insight yang lebih dalam dari urutan genom, struktur protein, dan jalur metabolik, memberikan pemahaman yang lebih luas tentang mekanisme penyakit dan interaksi antara host dan patogen.

AI, khususnya, memiliki potensi besar dalam mempercepat penemuan obat dan pengembangan vaksin. Dengan kemampuan untuk memproses dan menganalisis jumlah data yang besar dengan cepat, AI dapat mengidentifikasi pola dan hubungan yang mungkin tidak terlihat oleh peneliti manusia. Ini dapat mempercepat

identifikasi target obat yang potensial, merancang molekul obat, dan memprediksi efek samping sebelum uji klinis.

Nanoteknologi, di sisi lain, menawarkan solusi inovatif dalam pengiriman obat dan terapi. Nanopartikel dapat dirancang untuk mengirimkan obat ke lokasi spesifik dalam tubuh, meningkatkan efektivitas pengobatan dan mengurangi efek samping. Dalam terapi kanker, misalnya, nanopartikel dapat digunakan untuk mengantarkan obat secara langsung ke sel kanker, meningkatkan efisiensi pengobatan dan meminimalkan kerusakan pada sel-sel sehat di sekitarnya.

Kemajuan dalam teknologi ini juga membantu dalam pemantauan dan kontrol wabah penyakit. AI dapat digunakan untuk menganalisis data dari berbagai sumber, termasuk media sosial, laporan kesehatan, dan data lingkungan, untuk memprediksi dan melacak penyebaran penyakit. Ini memungkinkan respons yang lebih cepat dan lebih terkoordinasi terhadap wabah penyakit.

Secara keseluruhan, integrasi teknologi canggih dalam mikrobiologi dan parasitologi berpotensi mengubah cara kita memahami, mendiagnosa, dan mengobati penyakit. Dengan terus berkembangnya teknologi ini, kita dapat mengharapkan kemajuan yang signifikan dalam perawatan kesehatan dan kesejahteraan manusia.

6. Pengembangan Metode Deteksi dan Diagnostik Cepat

Kemajuan dalam metode deteksi dan diagnostik cepat adalah kunci dalam mengidentifikasi dan mengatasi infeksi secara tepat waktu. Ini termasuk pengembangan biosensor yang sensitif dan cepat serta platform diagnostik yang dapat dengan mudah digunakan dalam berbagai setting klinis.

Pengembangan metode deteksi dan diagnostik cepat ini sangat penting dalam mengendalikan penyebaran penyakit infeksius, terutama dalam situasi darurat kesehatan masyarakat seperti wabah atau pandemi. Teknologi biosensor yang canggih, misalnya, dapat mendeteksi patogen dengan kepekaan dan spesifisitas yang tinggi, seringkali

dalam hitungan menit. Ini memungkinkan diagnosis awal yang dapat menyelamatkan nyawa dan mengurangi penyebaran penyakit.

Platform diagnostik cepat ini juga berperan penting dalam pengawasan epidemiologi. Dengan kemampuan untuk mengumpulkan dan menganalisis data diagnostik secara *real-time*, otoritas kesehatan dapat lebih efektif dalam memantau dan merespons terhadap tren penyakit. Selain itu, akses ke diagnostik yang cepat dan akurat di tempat perawatan (*point-of-care*) sangat berharga dalam meningkatkan akses perawatan kesehatan di daerah terpencil atau di negara-negara dengan sumber daya kesehatan terbatas.

Pengembangan diagnostik ini tidak hanya terbatas pada penyakit infeksius. Dengan kemajuan teknologi, metode deteksi untuk kondisi kronis, kanker, dan penyakit genetik juga mengalami peningkatan. Metode ini dapat mencakup penggunaan biomarker yang spesifik, analisis DNA atau RNA, dan penggunaan teknologi seperti CRISPR untuk deteksi yang lebih akurat dan cepat.

Integrasi teknologi digital dan AI juga meningkatkan potensi metode diagnostik ini. AI dapat membantu dalam menganalisis hasil tes secara lebih cepat dan akurat, mengidentifikasi pola yang mungkin terlewat oleh mata manusia. Ini sangat berharga dalam kasus-kasus di mana deteksi dini dapat membuat perbedaan signifikan dalam hasil pengobatan.

Dengan terus berkembangnya teknologi dan penelitian, kita dapat mengharapkan bahwa metode deteksi dan diagnostik akan menjadi lebih canggih, cepat, dan mudah diakses, memberikan dampak positif pada penanganan penyakit dan peningkatan kesehatan global.

Membangun Masa Depan yang Sehat dan Berkelanjutan

Dengan berbagai inovasi ini, masa depan mikrobiologi dan parasitologi tidak hanya tentang mengatasi tantangan kesehatan saat ini tetapi juga tentang mencegah masalah di masa depan.

Pendekatan yang berkelanjutan dan bertanggung jawab, yang menggabungkan pengetahuan ilmiah dengan pertimbangan etis dan lingkungan, akan menjadi penting. Kerjasama lintas disiplin dan internasional, bersama dengan investasi berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan, akan menjadi kunci untuk mengatasi tantangan kesehatan global dan meningkatkan kesejahteraan umat manusia.

1.6.2 Integrasi AI dan Big Data dalam Penelitian

Kecerdasan buatan (AI) dan big data menjanjikan perubahan paradigma dalam mikrobiologi dan parasitologi. AI, dengan kemampuannya dalam analisis data besar dan pembelajaran mesin, dapat membantu dalam mengidentifikasi pola penyakit, prediksi wabah, dan pengembangan obat baru. Integrasi AI dalam analisis genomik dan proteomik memungkinkan penemuan cepat hubungan genetik dan biomarker penyakit. Selain itu, AI juga memainkan peran penting dalam pemodelan epidemiologi dan simulasi dinamika penyakit, yang penting untuk perencanaan kesehatan masyarakat dan respons terhadap wabah penyakit. *Big data*, yang dihasilkan dari sumber-sumber seperti rekam medis elektronik dan *surveillance* penyakit, menjadi aset berharga dalam penelitian epidemiologi dan penemuan obat.

Peran Transformatif AI dan Big Data

- 1. Pemodelan Penyebaran Penyakit:** AI dan big data telah merevolusi cara kita memahami dan memprediksi penyebaran penyakit. Model yang dikembangkan menggunakan AI dapat memperhitungkan berbagai faktor, seperti mobilitas populasi, perubahan iklim, dan data demografis, untuk memprediksi bagaimana dan di mana penyakit mungkin menyebar. Hal ini sangat penting untuk mengantisipasi wabah dan mengalokasikan sumber daya kesehatan secara efektif.
- 2. Personalisasi Pengobatan:** AI membantu dalam personalisasi pengobatan infeksi mikroba dan parasit. Dengan menganalisis data genetik pasien dan patogen, AI dapat membantu dalam menentukan terapi yang paling

efektif untuk individu tertentu, berpotensi meningkatkan hasil pengobatan dan mengurangi efek samping.

3. **Analisis Genomik dan Proteomik:** AI mempercepat analisis data genomik dan proteomik yang besar, memungkinkan peneliti untuk lebih cepat mengidentifikasi hubungan genetik penyakit, biomarker, dan target obat potensial. Ini membuka jalan untuk pengembangan obat dan vaksin yang lebih cepat dan lebih efektif.
4. **Optimisasi Pengembangan Obat:** AI dapat digunakan untuk merancang obat dan vaksin baru dengan memprediksi bagaimana molekul obat akan berinteraksi dengan target biologis. Ini tidak hanya mempercepat proses penemuan obat tetapi juga dapat mengurangi biaya dan kegagalan dalam uji coba klinis.
5. **Pengelolaan dan Analisis Big Data:** Dengan semakin banyaknya data yang tersedia dari sumber-sumber seperti rekam medis elektronik, penelitian laboratorium, dan data epidemiologi, AI menjadi alat penting untuk mengelola dan menganalisis data tersebut. Kemampuan untuk mengintegrasikan dan menganalisis data ini secara komprehensif memungkinkan wawasan baru tentang penyakit dan respon terhadapnya.

Masa Depan yang Digerakkan oleh AI dan Big Data

1. **Pengembangan Sistem Peringatan Dini:** Dengan integrasi AI dan big data, pengembangan sistem peringatan dini untuk penyakit infeksi menjadi lebih canggih. Ini akan memungkinkan deteksi awal wabah penyakit, memungkinkan tindakan responsif lebih cepat dan efektif.
2. **Penelitian Kolaboratif dan Terbuka:** AI dan big data mendorong model penelitian yang lebih kolaboratif dan terbuka. Berbagi data dan hasil penelitian secara global dapat mempercepat penemuan dan aplikasi terapeutik baru, terutama dalam menghadapi ancaman kesehatan global.
3. **Etika dan Privasi:** Seiring dengan penggunaan AI dan big data, muncul pertanyaan etis dan privasi. Pengembangan kebijakan yang melindungi privasi pasien sambil

memungkinkan penelitian penting adalah kunci untuk memanfaatkan sepenuhnya potensi teknologi ini.

4. **Kecerdasan Buatan sebagai Mitra Peneliti:** Dalam masa depan, AI tidak hanya akan menjadi alat tetapi juga mitra dalam penelitian, membantu para ilmuwan dalam mengidentifikasi hipotesis baru, merancang eksperimen, dan bahkan dalam interpretasi hasil.

Integrasi AI dan big data dalam mikrobiologi dan parasitologi menjanjikan era baru dari penemuan ilmiah yang lebih cepat, pengobatan yang lebih personal dan efektif, serta respons yang lebih dinamis terhadap tantangan kesehatan global. Kemajuan ini, didorong oleh inovasi teknologi, akan terus membentuk masa depan penelitian dan pengobatan penyakit infeksi.

1.6.3 Tantangan Etik dan Sosial dalam Penelitian Mikrobiologi

Seiring dengan kemajuan teknologi, mikrobiologi dan parasitologi menghadapi tantangan etik dan sosial yang signifikan. Isu-isu seperti privasi data pasien, konsensus dalam penggunaan sampel biologis, dan implikasi terapi genetik menjadi semakin relevan. Tantangan ini menuntut dialog yang berkelanjutan antara ilmuwan, masyarakat, dan pembuat kebijakan untuk memastikan bahwa penelitian dan aplikasi teknologi dilakukan dengan cara yang etis dan bertanggung jawab. Keterlibatan masyarakat dan edukasi publik dalam sains menjadi kritis dalam membangun kepercayaan dan dukungan terhadap inovasi ilmiah. Selain itu, pentingnya akses yang adil terhadap terapi baru dan teknologi di seluruh dunia menyoroti kebutuhan untuk mengatasi ketidaksetaraan dalam kesehatan global.

Mengatasi Isu Etika dan Sosial

1. **Privasi Data dan Konsensus:** Dalam era big data dan genomika, perlindungan privasi data pasien menjadi sangat penting. Protokol etika yang ketat dan mekanisme konsensus, seperti informed consent (persetujuan yang diberikan

dengan pemahaman penuh), harus diintegrasikan dalam setiap penelitian yang melibatkan data pasien atau sampel biologis. Penggunaan teknologi enkripsi dan anonimisasi data dapat membantu dalam melindungi privasi pasien.

2. **Implikasi Terapi Genetik:** Terapi genetik, meskipun menjanjikan, menimbulkan pertanyaan etis tentang modifikasi genetik, terutama ketika melibatkan garis sel germ (yang dapat diwariskan). Dialog terbuka tentang risiko, manfaat, dan implikasi moral dari terapi genetik penting untuk mendapatkan dukungan publik dan memastikan penggunaan teknologi ini secara bertanggung jawab.
3. **Edukasi dan Keterlibatan Masyarakat:** Meningkatkan kesadaran dan pemahaman publik tentang mikrobiologi dan parasitologi adalah penting untuk membangun kepercayaan. Program pendidikan dan kampanye kesadaran dapat membantu masyarakat memahami manfaat dan risiko penelitian. Partisipasi aktif masyarakat dalam dialog sains juga dapat meningkatkan transparansi dan penerimaan terhadap penelitian dan aplikasinya.
4. **Akses Adil terhadap Terapi dan Teknologi:** Ketidaksetaraan dalam akses terhadap perawatan kesehatan merupakan masalah global yang mendalam. Penting untuk memastikan bahwa inovasi dalam mikrobiologi dan parasitologi dapat diakses oleh semua orang, tidak hanya di negara maju. Kerjasama internasional dan kebijakan yang mendukung distribusi adil sumber daya dan pengetahuan adalah kunci untuk mengatasi ketidaksetaraan ini.
5. **Pengembangan Kebijakan yang Responsif:** Pembuat kebijakan harus bekerja sama dengan ilmuwan untuk mengembangkan regulasi yang mendukung inovasi sambil memastikan keselamatan dan etika. Kebijakan yang fleksibel dan dapat beradaptasi dengan perkembangan teknologi dan penemuan baru sangat penting.
6. **Pertimbangan Lingkungan dalam Penelitian:** Dalam mikrobiologi dan parasitologi, pertimbangan lingkungan seperti dampak penelitian dan pengembangan terapi

terhadap ekosistem juga harus diperhitungkan. Praktik penelitian yang berkelanjutan harus menjadi norma.

Menavigasi Masa Depan

Pendekatan yang etis dan bertanggung jawab dalam penelitian mikrobiologi dan parasitologi tidak hanya penting untuk menjaga integritas ilmiah tetapi juga untuk memastikan bahwa manfaat penelitian dapat dirasakan secara luas. Dengan mempertimbangkan secara hati-hati implikasi sosial dan etika dari penelitian mereka, para ilmuwan dapat membantu membentuk masa depan di mana inovasi sains berjalan seiring dengan nilai-nilai masyarakat dan keberlanjutan lingkungan. Dialog yang berkelanjutan, transparansi, dan kolaborasi antar disiplin ilmu, serta dengan masyarakat umum, akan menjadi kunci untuk mencapai hal ini.

1.7 Konklusi dan Rekomendasi

1.7.1 Implikasi Mikrobiologi dan Parasitologi untuk Pemahaman Kehidupan

Mikrobiologi dan parasitologi memberikan wawasan mendalam tentang kehidupan pada tingkat yang paling dasar. Mereka membantu kita memahami bagaimana kehidupan berkembang, beradaptasi, dan bertahan dalam berbagai kondisi. Pengetahuan ini tidak hanya penting untuk memahami kesehatan manusia dan penyakit tetapi juga memberi kita perspektif baru tentang keberadaan kita dalam konteks yang lebih luas. Dari memahami fungsi dasar sel hingga mengeksplorasi potensi kehidupan di luar bumi, mikrobiologi dan parasitologi berperan penting dalam banyak bidang ilmu pengetahuan.

1.7.2 Peran Mikroorganisme dan Parasit dalam Keseimbangan Ekosistem

Mikroorganisme dan parasit memainkan peran kunci dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Mereka berkontribusi pada proses biogeokimia penting, seperti siklus nitrogen dan karbon, dan memengaruhi kesehatan dan keberlanjutan ekosistem. Penguraian oleh mikroorganisme adalah esensial untuk

mengembalikan nutrisi ke tanah, mendukung pertumbuhan tumbuhan dan, pada gilirannya, seluruh jaringan makanan. Penyakit dan parasit juga memainkan peran penting dalam pengaturan populasi spesies dan menjaga keragaman biologis.

1.7.3 Refleksi tentang Hubungan Manusia dengan Dunia Mikro

Refleksi tentang interaksi manusia dengan dunia mikro mendorong kita untuk mempertimbangkan bagaimana tindakan kita, seperti penggunaan antibiotik dan dampak kita terhadap lingkungan, memengaruhi mikrobioma dunia. Ada kebutuhan untuk menghargai dan memelihara hubungan ini untuk kesehatan dan kesejahteraan kita sendiri serta untuk planet ini. Kita harus memikirkan kembali interaksi kita dengan mikroorganisme, mengakui mereka tidak hanya sebagai patogen tetapi juga sebagai elemen penting dalam kehidupan kita.

1.7.4 Rekomendasi untuk Pendidik, Peneliti, Praktisi, Pebisnis, Pemerintah, Pembuat Kebijakan, Masyarakat

Untuk pendidik: Integrasikan pengetahuan mikrobiologi dan parasitologi dalam kurikulum, menekankan pentingnya dalam kesehatan global dan ekosistem.

Untuk peneliti: Fokus pada penelitian interdisipliner yang menghubungkan mikrobiologi dengan bidang lain seperti perubahan iklim, bioteknologi, dan kecerdasan buatan.

Untuk praktisi kesehatan: Terus diperbarui dengan penemuan terbaru dan terapkan praktik berbasis bukti dalam mengelola infeksi dan penyakit.

Untuk pebisnis: Jelajahi inovasi bioteknologi yang berkelanjutan dan etis, mengintegrasikan mikrobiologi dalam solusi untuk masalah kesehatan dan lingkungan.

Untuk pemerintah dan pembuat kebijakan: Alokasikan sumber daya yang cukup untuk penelitian mikrobiologi, dan kembangkan kebijakan yang mendukung pengelolaan penyakit dan kesehatan masyarakat.

Untuk masyarakat: Tingkatkan kesadaran tentang peran penting mikroorganisme dalam kehidupan kita dan adopsi praktik yang mendukung keseimbangan ekologis.

DAFTAR PUSTAKA

- Bordenstein, S., & Bordenstein, S. (2022). Widespread phages of endosymbionts: Phage WO genomics and the proposed taxonomic classification of Symbioviridae. *PLoS Genetics*, 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1010227>.
- Carlo, P., Serra, N., Alduina, R., Guarino, R., Craxì, A., Giammanco, A., Fasciana, T., Cascio, A., & Sergi, C. (2022). A systematic review on omics data (metagenomics, metatranscriptomics, and metabolomics) in the role of microbiome in gallbladder disease. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.888233>.
- Carmona-Gutierrez, D., Kainz, K., Zimmermann, A., Hofer, S., Bauer, M., Ruckstuhl, C., Kroemer, G., & Madeo, F. (2022). A hundred spotlights on microbiology: how microorganisms shape our lives. *Microbial Cell*, 9, 72 - 79. <https://doi.org/10.15698/mic2022.04.773>.
- Cunningham-Oakes, E., & Trivett, H. (2022). Applied Bioinformatics and Public Health Microbiology: challenges, discoveries and innovations during a pandemic. *Microbial Genomics*, 8. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000757>.
- Dudley, E. (2022). Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers, 5th Edition. *Emerging Infectious Diseases*, 28, 267 - 267. <https://doi.org/10.3201/eid2801.211862>.
- Hassan, A., & Blanchard, N. (2022). Microbial (co)infections: Powerful immune influencers. *PLoS Pathogens*, 18. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1010212>.
- Ianiro, G., Iorio, A., Porcari, S., Masucci, L., Sanguinetti, M., Perno, C., Gasbarrini, A., Putignani, L., & Cammarota, G. (2022). How the gut parasitome affects human health. *Therapeutic Advances in Gastroenterology*, 15. <https://doi.org/10.1177/17562848221091524>.

- Jiang, Y., Luo, J., Huang, D., Liu, Y., & Li, D. (2022). Machine Learning Advances in Microbiology: A Review of Methods and Applications. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.925454>.
- Kinsella, C., Deijs, M., Gittelbauer, H., Hoek, L., & Dijk, K. (2022). Human Clinical Isolates of Pathogenic Fungi Are Host to Diverse Mycoviruses. *Microbiology Spectrum*, 10. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01610-22>.
- Lipkin, W., & Briese, T. (2022). Building a global immune system. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 18. <https://doi.org/10.1080/21645515.2022.2036069>.
- Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E., & Rotondo, J. (2023). Probiotics Mechanism of Action on Immune Cells and Beneficial Effects on Human Health. *Cells*, 12. <https://doi.org/10.3390/cells12010184>.
- Morgan, E., Perdew, G., & Patterson, A. (2022). Multi-omics strategies for investigating the microbiome in toxicology research. *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology*. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfac029>.
- Nagai, K., & Goto, Y. (2022). Parasitomimetics: Can We Utilize Parasite-Derived Immunomodulatory Molecules for Interventions to Immunological Disorders?. *Frontiers in Immunology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.824695>.
- Pavlidou, E., Fasoulas, A., Mantzorou, M., & Giaginis, C. (2022). Clinical Evidence on the Potential Beneficial Effects of Probiotics and Prebiotics in Cardiovascular Disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms232415898>.
- Portincasa, P., Bonfrate, L., Vacca, M., Angelis, M., Farella, I., Lanza, E., Khalil, M., Wang, D., Sperandio, M., & Ciaula, A. (2022). Gut Microbiota and Short Chain Fatty Acids: Implications in Glucose Homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms23031105>.

- Richter, F., Bindschedler, S., Calonne-Salmon, M., Declerck, S., Junier, P., & Stanley, C. (2022). Fungi-on-a-Chip: microfluidic platforms for single-cell studies on fungi. *FEMS Microbiology Reviews*, 46. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuac039>.
- Sardinha-Silva, A., Alves-Ferreira, E., & Grigg, M. (2022). Intestinal immune responses to commensal and pathogenic protozoa. *Frontiers in Immunology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.963723>.
- Sorboni, S., Moghaddam, H., Jafarzadeh-Esfehani, R., & Soleimanpour, S. (2022). A Comprehensive Review on the Role of the Gut Microbiome in Human Neurological Disorders. *Clinical Microbiology Reviews*, 35. <https://doi.org/10.1128/CMR.00338-20>.
- Speer, K. (2022). Microbiomes mediate host-parasite interactions. *Molecular Ecology*, 31, 1925 - 1927. <https://doi.org/10.1111/mec.16381>.
- Spencer, L., Olawuni, B., & Singh, P. (2022). Gut Virome: Role and Distribution in Health and Gastrointestinal Diseases. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.836706>.
- Torres-Sangiao, E., Giddey, A., Rodríguez, C., Tang, Z., Liu, X., & Soares, N. (2022). Proteomic Approaches to Unravel Mechanisms of Antibiotic Resistance and Immune Evasion of Bacterial Pathogens. *Frontiers in Medicine*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.850374>.
- Wang, H., Zhang, W., & Tang, Y. (2022). Clinical microbiology in detection and identification of emerging microbial pathogens: past, present and future. *Emerging Microbes & Infections*, 11, 2579 - 2589. <https://doi.org/10.1080/22221751.2022.2125345>.

BAB 2

BAKTERIOLOGI DASAR

Oleh Ayu Saka Laksmita W

2.1 Pendahuluan

2.1.1 Ruang Lingkup Bakteriologi

Bakteriologi meliputi sel bakteri, pengendalian bakteri, dan peran bakteri. Kerangka kerja bakteriologis yang bertujuan untuk memahami sel bakteri, termasuk bentuk dan struktur halus sel bakteri (ultrastruktur), nutrisi dan budidaya bakteri, identifikasi dan klasifikasi, reproduksi dan proliferasi sel bakteri, serta genetika bakteri. Pembahasan berbagai aspek di dalamnya. Sel bakteri merupakan struktur mikro (superstruktur) sel bakteri. Ultrastruktur sel bakteri meliputi struktur luar dan dalam sel bakteri seperti flagela, pili, kapsul, dinding sel, membran sel, mesosom, ribosom, nukleoid, dan spora. Bakteri yang kehadirannya pada media atau lingkungan tertentu tidak diinginkan atau tidak diinginkan harus dihambat agar tidak tumbuh atau dibunuh (Silhavy, Kahne and Walker, 2010).

Pengendalian bakteri melibatkan penghambatan pertumbuhan bakteri atau membunuh bakteri. Tujuan pengendalian bakteri adalah untuk menghilangkan patogen (bakteri penyebab penyakit) atau mencegah tumbuhnya bakteri yang tidak diinginkan pada media pertumbuhan tertentu. Pengendalian bakteri meliputi sterilisasi, desinfeksi, dan penggunaan agen antimikroba (termasuk antibiotik) (Sopialena, 2018)

Sel bakteri dapat tumbuh pada kondisi yang mirip dengan kondisi alami bakteri tertentu. Pada saat transplantasi sel bakteri di laboratorium, perhatian harus diberikan pada nutrisi dalam media pertumbuhan untuk memastikan kebutuhan bakteri akan nutrisi tertentu terpenuhi dan sel bakteri dapat tumbuh secara optimal. Saat menyiapkan media pertumbuhan, nutrisi dan faktor pertumbuhan lainnya harus dipertimbangkan dengan cermat

untuk memastikan keberadaan sel bakteri yang diperlukan dalam media untuk pertumbuhan yang memadai. Bakteri tumbuh di laboratorium. Ketika semua persyaratan kelangsungan hidup sel terpenuhi, sel akan tumbuh. Jika proses regenerasi sel berlangsung dalam suasana optimal maka sel bakteri dapat berkembang biak. Sel bakteri berkembang biak seiring bertambahnya jumlah mereka. Oleh karena itu, peningkatan jumlah sel dalam sel bakteri berarti telah terjadi perkembangbiakan sel bakteri (Sanchez-Rosario and Johnson, 2021)

Hal ini juga berarti jumlah sel bakteri individu juga meningkat. Berbagai jenis bakteri terdapat di alam. Bakteri hidup bebas di lingkungan, tersebar di udara, tanah, air, makanan, bahkan mikroorganisme yang hidup di dalam tubuh manusia. Oleh karena itu, klasifikasi bakteri lebih lanjut memerlukan proses identifikasi. Proses identifikasi dilakukan dengan melakukan serangkaian pengujian terhadap sel bakteri yang ditumbuhkan di laboratorium. Dengan mengetahui persamaan dan perbedaan sel bakteri yang berbeda, kita dapat melakukan klasifikasi bakteri untuk membagi bakteri menjadi kelompok atau kelas sesuai dengan kesamaan ciri dari masing-masing sel bakteri. Proses pengklasifikasian bakteri tidak hanya dilakukan dengan mengamati morfologi sel bakteri. Hal ini dapat dilakukan dengan teknik isolasi. Beberapa metode yang sering digunakan dalam isolasi mikroba. Metode yang digunakan juga disesuaikan dengan jenis mikroba yang akan diamati (Jufri, 2020).

Informasi genetik bakteri memberikan gambaran yang cukup akurat tentang persamaan dan perbedaan antara sel bakteri yang berbeda. Genetika Bakteri memberikan gambaran tentang struktur asam deoksiribonukleat (DNA) bakteri dan asam ribonukleat (RNA). Selain itu, genetika bakteri juga mengkaji transmisi dan mutasi materi genetik. Oleh karena itu, untuk memahami sifat-sifat sel bakteri tertentu, tidak hanya diperlukan informasi tentang morfologi dan fisiologi sel bakteri saja, namun aspek genetik sel bakteri juga dapat membantu dalam memahami sifat-sifat bakteri tersebut (Jørgen Christensen *et al.*, 2005)

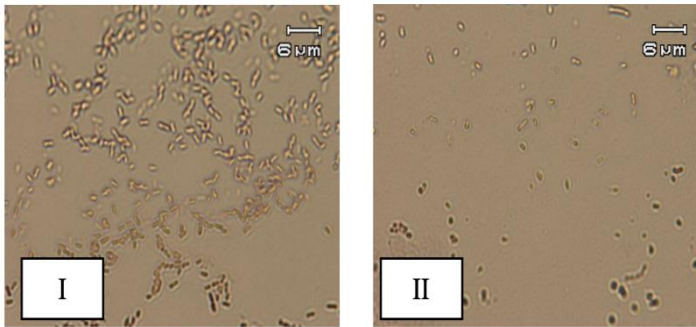
2.1.2 Bakteri Menguntungkan dan Merugikan

Peranan bakteri, ada yang menguntungkan dan ada yang merugikan. Peranan bakteri yang menguntungkan antara lain dalam bidang industri, kesehatan, lingkungan, dan bioteknologi. Selain itu, ada juga peranan bakteri yang merugikan, antara lain dalam bidang: kesehatan (bakteri patogen), pangan (bakteri merusak bahan makanan). Secara umum, bakteri menguntungkan digunakan dalam berbagai bidang seperti lingkungan, makanan, industri, dan obat-obatan. Misalnya bakteri sporofit yang berperan penting dalam penguraian tubuh organisme mati, serta sisa-sisa dan kotoran organisme lain di dunia ini. Bakteri ini memecah karbohidrat, protein, dan komponen lainnya menjadi amonia, CO₂, dan komponen lain yang lebih sederhana dari aslinya. Jenis bakteri humat atau pengurai antara lain *Proteus* dan *Clostridium* (Sionek *et al.*, 2023).

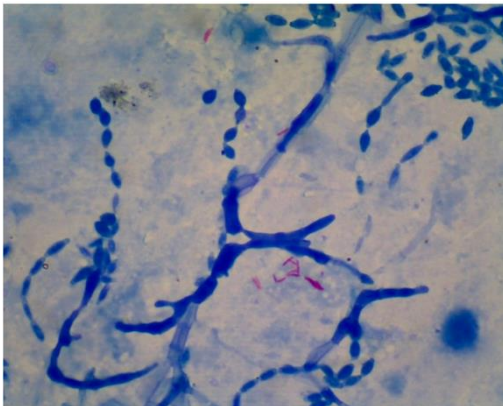
Mikroba ada di mana-mana. Beberapa hidup di mata air panas dan ventilasi laut dalam pada suhu di atas titik didih, sementara yang lain bertahan hidup pada suhu jauh di bawah titik beku, bahkan di kedalaman gletser terdalam. Mereka dapat tumbuh dalam kondisi asam dan basa, di mana tidak ada bentuk kehidupan lain yang dapat bertahan hidup. Mereka tumbuh subur pada konsentrasi garam yang tinggi, seperti yang ada di Laut Mati, dan mereka diketahui tumbuh di lingkungan yang mengandung logam berat beracun, pelarut organik, dan segala jenis racun. Mereka dapat bertahan hidup dalam tingkat radiasi yang luar biasa seperti yang terjadi di tambang uranium, reaktor nuklir, dan luar angkasa (Saier, 2005).

Bakteri bermanfaat lainnya termasuk yang termasuk dalam kelompok nitrifikasi, yaitu kelompok bakteri yang memiliki kemampuan menyerap berbagai senyawa nitrat yang umum ditemukan di dalam tanah. Bakteri yang tergolong dalam kelompok ini mempunyai sifat kemolitik dan trofik. Di bidang pertanian, keberadaan bakteri ini tentunya bermanfaat karena nitrat yang dihasilkan bakteri tersebut berperan sangat penting dalam meningkatkan kualitas tanaman. Bakteri yang termasuk dalam kelompok ini antara lain *Pseudomonas stotteri*, *Paracoccus denitrificans*, dan *Pseudomonas aeruginosa*. Selain bakteri

tersebut, ada juga kelompok bakteri yang disebut bakteri nitrogen. Bakteri ini juga bermanfaat bagi petani karena dapat mengikat nitrogen dari udara dan menyimpannya di akar sehingga tanaman lebih subur. Jenis bakteri nitrat tersebut antara lain *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, dan *Mesorhizobium*.



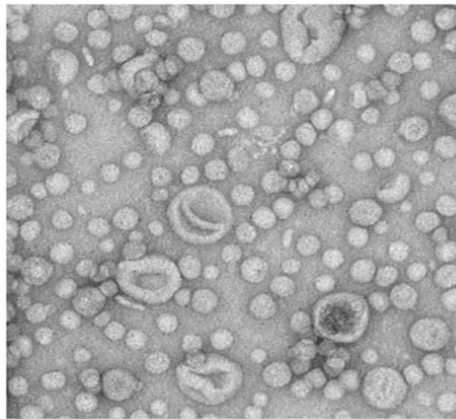
Gambar 2.1. Hasil pengamatan bentuk sel *Pseudomonas sp*: isolat I (kiri) dan isolat II (kanan) (Suyono and Salahudin, 2011).



Gambar 2.2. Hasil pengamatan bentuk sel *Paracoccus denitrificans* (Morinaga *et al.*, 2020)

Bakteri membentuk asosiasi yang erat dengan jenis organisme lain, dan sebagian besar di antaranya saling menguntungkan. Hal ini disebut sebagai hubungan mutualistik atau simbiosis. Hanya sedikit sekali bakteri yang menyebabkan penyakit, tetapi karena pentingnya bakteri bagi manusia dan

tanaman serta hewan peliharaannya, organisme-organisme berbahaya bakteri diantaranya: *Mycobacterium tuberculosis*, *Salmonella typhi*, *Corynebacterium diphtheriae*, dan *Haemophilus influenzae*, semuanya diberi nama sesuai dengan penyakit yang ditimbulkannya pada manusia. Namun, hampir semua dari ribuan spesies bakteri dalam tubuh kita memiliki fungsi yang berguna, bahkan sangat penting untuk meningkatkan kesehatan tubuh (Saier, 2005).



Gambar 2.3. *Mycobacterium tuberculosis* (Ade Pangestu *et al.*, 2020)



Gambar 2.4. *Salmonella typhi* (Lestari and Hendrayana, 2017)

2.2 Struktur dan Morfologi Bakteri

2.2.1 Bentuk Sel Bakteri

Bakteri merupakan salah satu jenis mikroorganisme yang tidak dapat dilihat secara langsung dengan mata telanjang. Bakteri merupakan organisme hidup yang paling melimpah dibandingkan organisme hidup lainnya, dengan spesies tersebar luas di seluruh dunia. Ratusan ribu spesies bakteri hidup di darat, laut, udara, dan di lokasi ekstrim (Üçüncü, Karakaya and Yilmaz, 2022). Bakteri bersifat mikroskopis dan berukuran sangat kecil. Ukuran bakteri diukur dalam satuan panjang yang disebut mikron. Mikron (mikrometer, m) adalah unit pengukuran yang digunakan dalam bakteriologi.

1 mikron (m) $1/1000$ milimeter (mm).

1 nanometer (nm) $1/1000$ mikron (m).

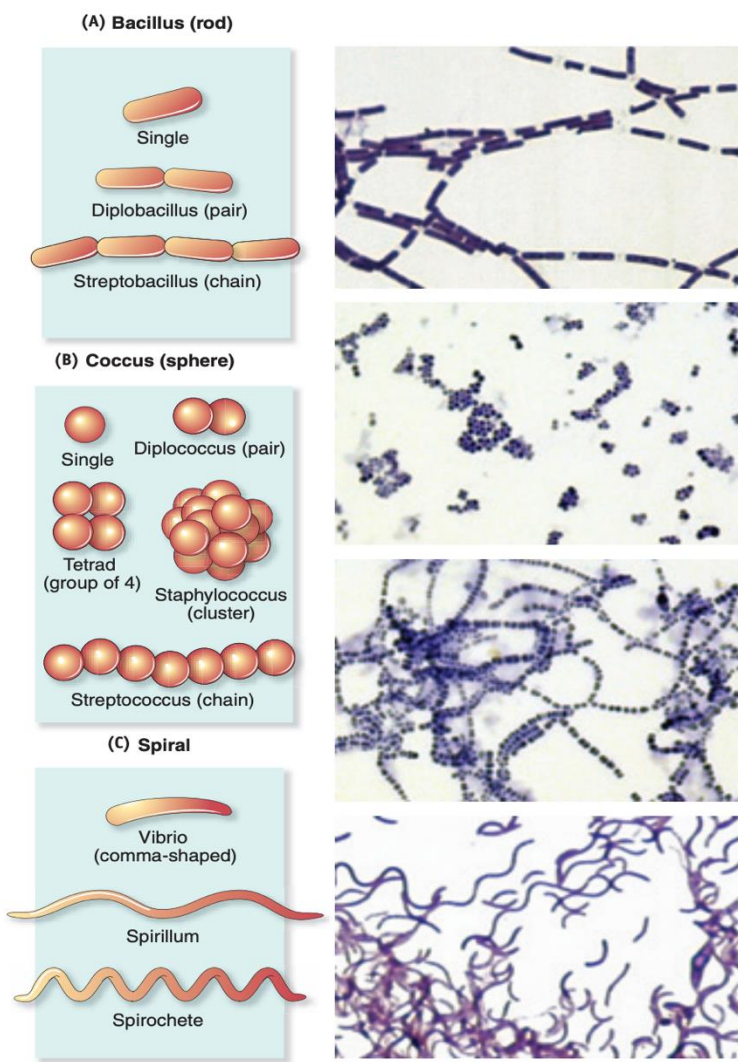
1 unit Angstrom (A) $1/10$ nm (nanometer).

Bakteri yang penting secara medis berukuran 2-5 m (panjang) 0,2-1,5 m (lebar)

(Levin and Angert, 2015).

Bakteri memiliki ciri-ciri yang berbeda dengan makhluk lain antara lain: organisme uniseluler (bersel satu); prokariot (tidak mempunyai membran inti sel); tidak mempunyai klorofil, tubuh berukuran antara 0,12 mikron sampai ratusan mikron, mempunyai bentuk tubuh yang beraneka seperti basil (batang), kokus (bulat), spirillum (spiral), kokobasil (bulat dan batang), dan vibrio (tanda baca koma); Memiliki dinding sel; Pada dinding sel bakteri tersusun atas mukopolisakarida dan peptidoglikan. Peptidoglikan terdiri dari polimer besar yang tersusun atas N-asetil glukosamin dan N-asetil muramat yang saling berikatan kovalen; Hidup dengan bebas atau parasite; Hidup di lingkungan yang ekstrim seperti mata air panas, kawah atau gambut karena dinding selnya tidak mengandung peptidoglikan; Hidupnya kosmopolit diberbagai lingkungan karena dinding selnya mengandung peptidoglikan; Pada dinding sel bakteri tersusun atas mukopolisakarida dan peptidoglikan; Peptidoglikan terdiri dari polimer besar yang tersusun atas N-asetil glukosamin dan N-asetil muramat yang saling berikatan kovalen; Bakteri memiliki

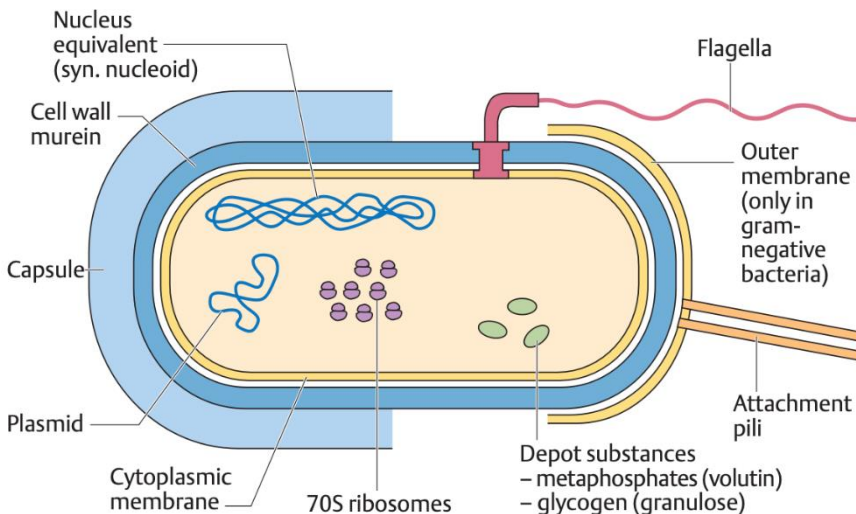
endospora yaitu kapsul yang muncul jika kondisi yang tidak menguntungkan sebagai perisai terhadap panas dan gangguan alam; Bakteri ada yang bergerak dengan flagella dan ada juga yang bergerak dengan berguling (tanpa flagella) (Levin and Angert, 2015)



Gambar 2.5. Berbagai bentuk bakteri (Levin and Angert, 2015).

2.2.2 Struktur Bakteri

Bakteri diklasifikasikan menjadi dua, yaitu struktur dasar dan struktur tambahan. Struktur dasar meliputi dinding sel, membran sel, sitoplasma, ribosom, butiran, dan DNA. Struktur tambahan termasuk kapsul, flagela, pili, kromosom, vakuola, dan endospora. Mikroskopi adalah komponen penting dari biologi mikro diagnostik. Bakteri yang berukuran sangat kecil tidak dapat divisualisasikan dengan mata telanjang, karena batas resolusi dengan mata telanjang adalah sekitar 200 mikron. Jadi, studi tentang bakteri membutuhkan penggunaan mikroskop. Mikroskop adalah sebuah instrumen yang menggunakan satu atau lebih lensa untuk menghasilkan gambar yang diperbesar dari suatu objek yang tidak terlihat oleh mata telanjang. Pengenalan genus dan spesies bakteri diperlukan karena pengetahuan tentang biologi mikroorganisme sangat penting dalam bidang kedokteran, kedokteran hewan, biokimia, industri makanan, dan pertanian. Meskipun sebagian besar mikroorganisme memiliki dampak positif pada berbagai bidang kehidupan, mereka dapat menyebabkan banyak penyakit, termasuk penyakit menular (Nurtanio et al., 2022).

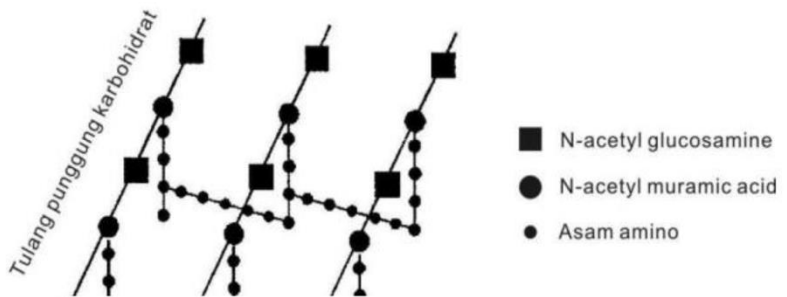


Gambar 2.6. Semua bakteri memiliki struktur dasar yang sama (Kayser *et al.*, 2005)

Struktur Utama

1. Dinding sel

Dinding sel bakteri mempunyai struktur yang kompleks dan sangat keras. Dinding sel bakteri menentukan bentuk sel. Meskipun bebas enzim dan tidak semipermeabel, dinding sel diperlukan untuk berfungsinya sel bakteri secara normal. Dinding sel yang kaku memungkinkan bakteri mengatasi osmolaritas yang bervariasi dan sitoplasma tidak meluas melampaui batas dinding yang kaku. Saat ini diketahui bahwa ketebalan dinding sel bakteri adalah 10 sampai 35 nm. Komposisi Kimia Dinding Sel Bakteri Komposisi dan struktur dinding sel prokariotik sangat unik dan khas serta tidak terdapat pada sel eukariotik. Alasan mengapa dinding sel bakteri keras adalah kandungan peptidoglikan (PG). Peptidoglikan terdiri dari: (1) N-asetilglukosamin (NAG), (2) Asam N-asetilmuramat (NAM), (3) Peptida yang tersusun dari asam amino: Alanin, asam glutamat, asam diaminopimelat atau lisin, dan alanin. Posisi NAG (N-asetilglukosamin) dan NAM (N-asetilmuramin) yang bergantian membentuk kerangka dinding sel. NAM memiliki empat asam amino. Asam amino ini membentuk jembatan dengan asam amino NAM lainnya (Tadesse and Alem, 2006).



Gambar 2.7. Ikatan Komponen Penyusun Peptidoglikan(Tadesse and Alem, 2006)

Peptidoglikan juga disebut mukopeptida, glikopeptida, muropeptida, atau murein peptidoglikan. Serat peptidoglikan membentuk jaringan yang kuat tetapi tidak

kompak (kencang) sehingga tidak menghalangi masuknya seperti air, zat makanan, mineral, glukosa, asam amino, bahkan molekul organik (Kayser et al., 2005).

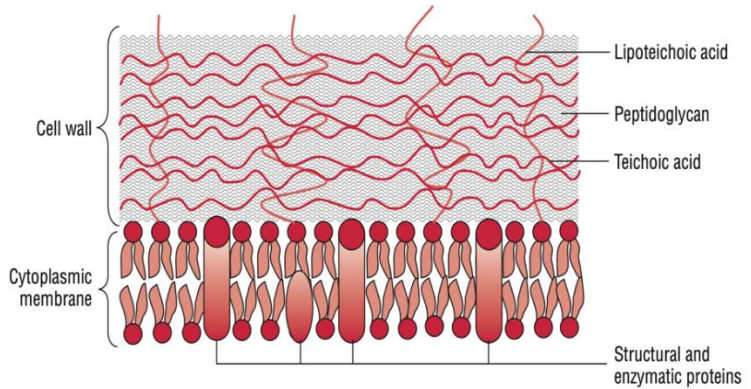
2. Bakteri Berdasarkan Struktur Dinding Sel

Sel prokariotik hampir selalu dibatasi oleh struktur yang cukup kaku dan kompleks secara kimiawi yang ada di antara membran sel dan lapisan kapsul/lendir yang disebut dinding sel. Peptidoglikan adalah komponen utama dinding sel dan bertanggung jawab atas bentuk dan kekuatan sel. Ini adalah disakarida dan mengandung dua turunan gula - N-asetilglukos-amin dan asam N-asetilmuramat - yang disatukan oleh rantai peptida pendek. Asam N-asetilmuramat membawa rantai samping tetrapeptida yang terdiri dari asam D dan L-amino (asam D-glutamat dan L-alanin) dengan asam mesodiaminopimelat (bakteri Gram negatif) atau L-lisin (bakteri Gram positif). Rantai samping tetrapeptida saling berhubungan dengan jembatan pentaglikin. Sebagian besar dinding sel Gram negatif tidak memiliki jembatan interpeptida. Dinding sel memberikan bentuk pada sel dan melindungi bakteri dari perubahan tekanan inosmotik, yang di dalam sel bakteri berukuran 5-20 atmosfer. Sel bakteri dapat diklasifikasikan menjadi Gram-positif atau Gram-negatif berdasarkan perbedaan struktural antara dinding sel Gram-positif dan Gram-negatif. Dinding sel bakteri Gram-positif memiliki struktur kimia yang lebih sederhana dibandingkan dengan bakteri Gram-negatif (Cornilleau *et al.*, 2023).

a. Dinding sel Gram positif

Dinding sel Gram positif tebal (15-80 nm) dan lebih homogen dibandingkan dengan dinding sel Gram negatif yang tipis (2 nm). Dinding sel Gram positif mengandung sejumlah besar peptidoglikan yang terdapat dalam beberapa lapisan yang membentuk sekitar 40-80% dari berat kering dinding sel (Gbr. 2-8). Dinding sel Gram positif terutama terdiri dari asam teikoat dan teikuronat. Kedua komponen ini menyumbang hingga 50% dari

berat kering dinding dan 10% dari berat kering total sel (Lavelle, Sinderen and Mahony, 2021).



Gambar 2.8. Diagram skematik dinding sel bakteri Gram positif (Parija, 2012)

b. Dinding sel Gram negatif

Dinding sel Gram negatif jauh lebih kompleks daripada dinding sel Gram positif. Kandungan peptidoglikan pada dinding sel Gram negatif jauh lebih sedikit daripada dinding sel Gram positif. Hanya 1-2 lapis peptidoglikan (2-8 nm) yang terdapat di luar membran sel. Dinding sel Gram negatif di luar lapisan peptidoglikan mengandung tiga komponen utama - (a) lapisan lipoprotein, (b) membran luar, dan (c) lipopolisakarida (El Rayes, Rodríguez-Alonso and Collet, 2021)

Lapisan lipoprotein: Lapisan lipoprotein terutama terdiri dari lipoprotein Braun. Lipoprotein Braun adalah lipoprotein kecil yang secara kovalen bergabung dengan peptidoglikan di bawahnya dan tertanam di membran luar pada ujung hidrofobiknya. Lipoprotein ini menstabilkan membran luar dinding sel Gram-negatif (Smithers, Olatunji and Caffrey, 2021).

Membran luar: Membran luar adalah struktur berlapis dua; bagian dalamnya memiliki komposisi yang mirip dengan membran sel, sedangkan bagian luarnya mengandung komponen khas yang disebut

lipopolisakarida. Membran luar dan membran plasma tampak bersentuhan langsung di banyak tempat di dinding Gram negatif (Smithers, Olatunji and Caffrey, 2021)

Pada sel bakteri Gram-negatif, sebagian bahan lapisan luar mungkin masih menempel pada membran sitoplasma setelah dinding sel dihilangkan. Struktur ini disebut spheroplast. Struktur sferoplasma dan protoplas. Jika sel ini mampu tumbuh dan membelah disebut berbentuk L. Beberapa cetakan berbentuk L dapat kembali ke bentuk normalnya. Hal ini dapat terjadi jika faktor penyebabnya dihilangkan. Untuk kembali ke morfologi normal, sel bakteri harus meninggalkan peptidoglikan sebagai starter untuk biosintesis dinding sel (Radkov *et al.*, 2018).

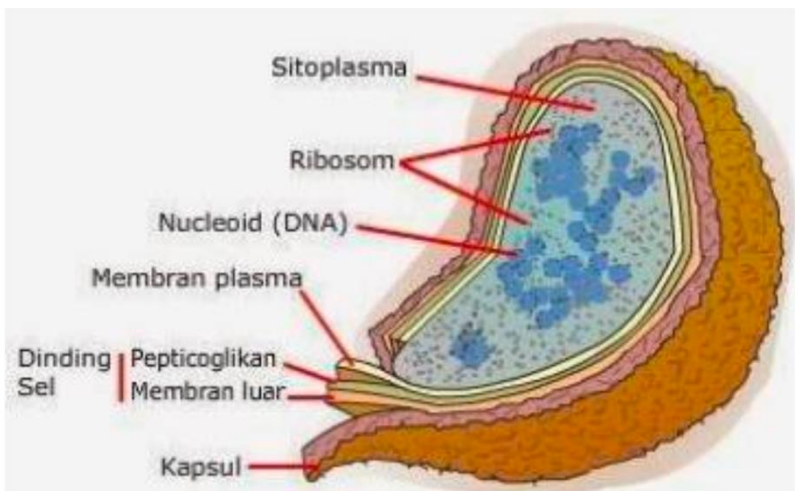
c. Membran sel

Membran sitoplasma atau struktur membran sel terletak di dalam dinding sel. Oleh karena itu, jika kita melihat struktur lapisan sel bakteri, membran plasma dilindungi oleh dinding sel bakteri. Hal ini disebabkan sifat dinding sel bakteri yang lebih kaku dibandingkan membran sitoplasma. Mesosom adalah struktur yang membran sitoplasmanya terlipat (berinvaginasi) ke dalam sitoplasma. Mesosom terlibat dalam sintesis dinding sel dan pembelahan inti sel bakteri. Membran sitoplasma penting dalam mengontrol pergerakan bahan kimia dalam larutan masuk dan keluar sel. Susbtansi-substansi (solut) dapat melewati membrane sitoplasma, dapat dengan cara sebagai yaitu difusi pasif dan transport aktif (Kalkan and Eşrefoğlu, 2020)

d. Kapsul

Kapsul terdapat pada beberapa bakteri di luar membran sel dan dinding sel. Kapsul dapat berupa polisakarida seperti pada pneumokokus, meningokokus atau polipeptida seperti *Bacillus anthracis* atau asam

hialuronat seperti pada streptokokus. Kapsul tidak ditandai dengan protokol pewarnaan normal dan dapat dideteksi oleh tinta India atau metil biru ; yang memungkinkan kontras yang lebih tinggi antara sel untuk pengamatan. Ditemukan pada beberapa sel bakteri, penutup luar tambahan ini melindungi sel saat itu ditelan oleh organisme lain, membantu mempertahankan kelembapan, dan membantu sel melekat ke permukaan dan nutrisi (Moon, 2019).



Gambar 2.9. Kapsul pada Bakteri (Chylen and Jamilatur, 2020)

e. Sitoplasma

Zat seperti gel yang sebagian besar terdiri dari air yang juga mengandung enzim, garam, komponen sel, dan berbagai molekul organik. Sitoplasma dalam sel prokariotik adalah zat seperti gel, namun cair, di mana semua sel lainnya komponen ditangguhkan. Gel ini sangat mirip dengan eukariotik sitoplasma, kecuali bahwa ia tidak mengandung organel. Baru-baru ini, ahli biologi memiliki menemukan bahwa sel prokariotik memiliki sitoskeleton yang kompleks dan fungsional yang serupa sitoskeleton yang kompleks dan fungsional

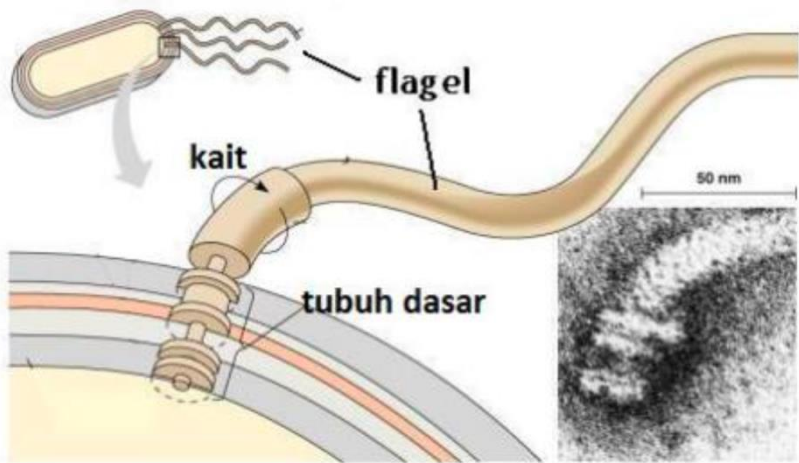
seperti yang terlihat pada sel eukariotik. Sitoskeleton membantu sel prokariotik membelah dan membantu sel mempertahankan bentuknya yang bulat dan montok. Seperti halnya pada sel eukariotik, sitoskeleton sitoskeleton adalah kerangka di mana partikel-partikel di dalam sel, termasuk protein, ribosom, dan cincin kecil DNA yang disebut plasmid, bergerak (Kumar, 2021).

f. Fimbriae (pili)

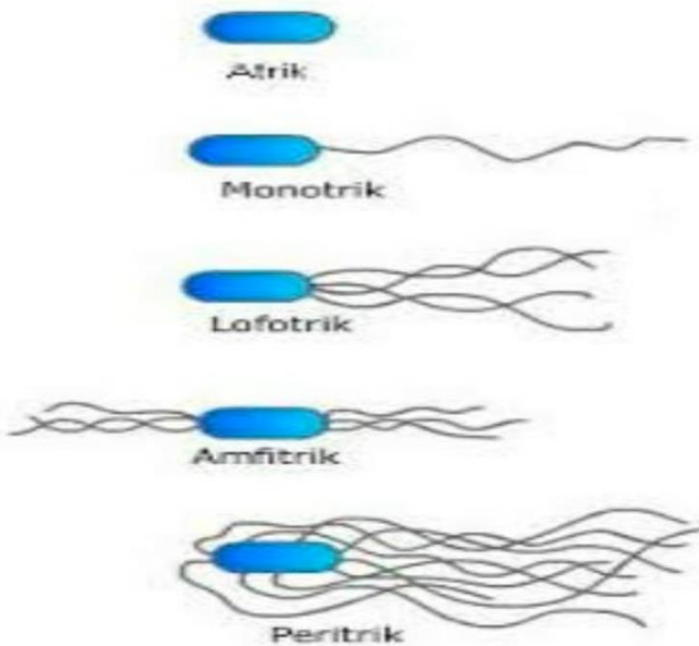
Struktur seperti rambut pada permukaan sel yang menempel pada sel bakteri lainnya. Pili yang lebih pendek yang disebut fimbriae membantu bakteri menempel pada permukaan. Fimbriae bertanggung jawab atas perlekatan bakteri ke reseptor spesifik sel manusia (Kumar, 2021).

g. Flagela

Tonjolan panjang seperti cambuk yang membantu pergerakan sel. Flagela adalah organel untuk mobilitas seluler. Flagel bakteri membentang dari sitoplasma melalui membran sel dan keluar melalui dinding sel. Mereka panjang dan pelengkap seperti benang tebal, bersifat protein. Paling sering ditemukan pada bakteri sel tetapi juga ditemukan dalam sel hewan. Ini adalah untaian protein yang lewat melalui permukaan luar tubuh sel baik secara tunggal maupun bergerombol. Energi yang disediakan oleh membran plasma memutar flagel dengan cara berputar yang unik 'sendi' dan ini pada gilirannya menggerakkan bakteri melalui dunia cairnya. Prokariotik flagela sangat berbeda dari struktur serupa yang digunakan oleh sel eukariotik (Moon, 2019).



Gambar 2.10. Flagel pada Bakteri (Chylen and Jamilatur, 2020)



Gambar 2.11. Berbagai Bentuk Flagel pada Bakteri(Chylen and Jamilatur, 2020).

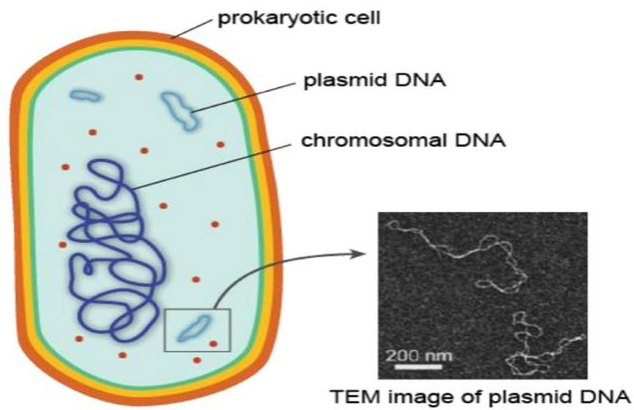
h. Ribosom

Struktur sel yang bertanggung jawab untuk produksi protein. Prokariotik ribosom lebih kecil dan memiliki bentuk dan komposisi yang sedikit berbeda dari itu ditemukan dalam sel eukariotik. Ribosom bakteri, misalnya, memiliki sekitar setengah dari jumlah RNA ribosom (rRNA) dan sepertiga lebih sedikit protein ribosom daripada yang dimiliki ribosom eukariotik. Terlepas dari perbedaan ini, fungsi ribosom prokariotik hampir identik dengan versi eukariotik. Sama seperti di sel eukariotik, ribosom prokariotik membangun protein dengan menerjemahkan pesan yang dikirim dari DNA (Tobin, 2011).

i. Plasmid

Pembawa gen, struktur DNA melingkar yang tidak terlibat dalam reproduksi (Tobin, 2011).

j. Daerah Nukleoid Area sitoplasma yang mengandung satu molekul DNA bakteri molekul. Semua sel prokariotik mengandung sejumlah besar materi genetik dalam bentuk DNA dan RNA. Karena sel prokariotik, menurut definisi, tidak memiliki nukleus, untai melingkar besar tunggal DNA yang mengandung sebagian besar gen yang dibutuhkan untuk pertumbuhan, kelangsungan hidup, dan reproduksi sel ditemukan di dalam sitoplasma. DNA cenderung terlihat seperti benang yang berantakan di tengah-tengah sel :



Gambar 2.12. Gambar mikrofotograf elektron transmisi (Kumar, 2021)

2.3 Reproduksi dan Pertumbuhan Bakteri

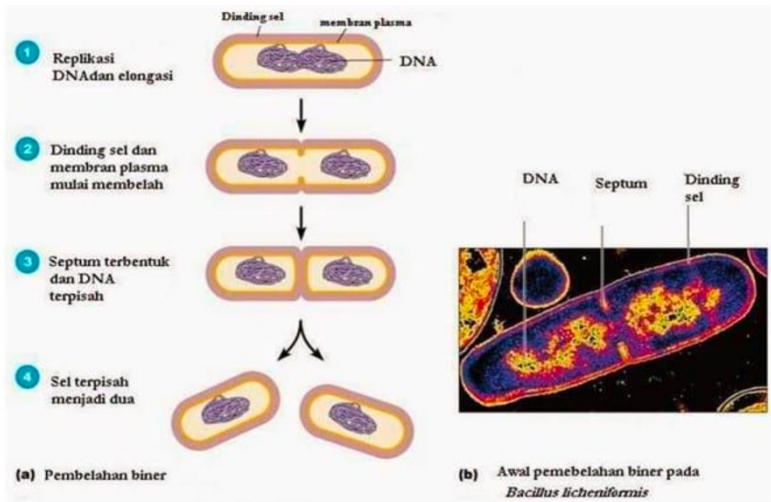
2.3.1 Reproduksi Sel Bakteri

Semua makhluk hidup mulai yang berukuran mikro sampai ukuran makro melakukan perkembangan biakan (reproduksi). Tujuan dari reproduksi adalah untuk memperbanyak jumlahnya dengan menghasilkan generasi selanjutnya. Reproduksi pada mikroorganisme dilakukan melalui dua cara, yaitu secara aseksual dan seksual.

1. Reproduksi Aseksual

Reproduksi aseksual pada bakteri dapat dibagi menjadi tiga bidang: pertunasan, fragmentasi, dan pembelahan biner. Pada umumnya bakteri berkembang biak secara ganda, namun bila kondisi lingkungan tidak mendukung, bakteri berkembang biak dengan cara pertumbuhan tunas (*budding*) dan fragmentasi.

- a. Melalui pembelahan biner, ketika sebuah sel membelah, menghasilkan dua sel anak yang secara genetik identik dengan sel induk. Pembelahan biner terdiri dari tiga fase:
 - 1) Sitoplasma dipisahkan oleh septa yang memanjang secara vertikal.
 - 2) Septa tumbuh, diikuti pembentukan dinding lateral.
 - 3) Pemisahan dua sel anak yang identik (Parija, 2012).



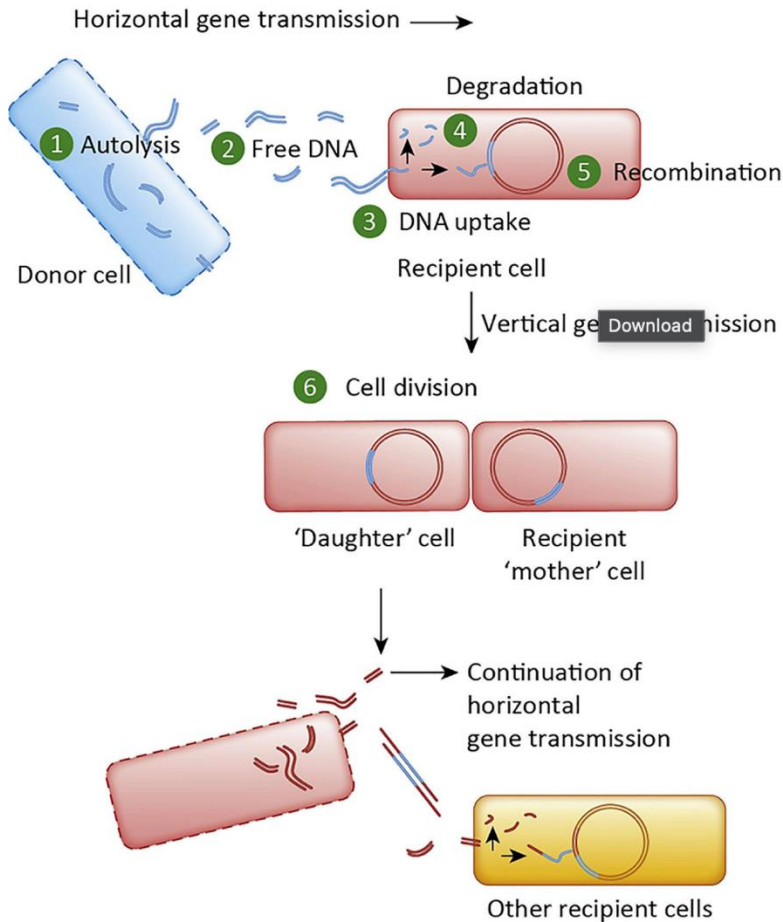
Gambar 2.13. Pembelahan Biner pada Bakteri (Chylen and Jamilatur, 2020)

- b. Pertumbuhan tunas (budding), yaitu proses pembentukan tunas. Ini dimulai dengan mengembangkan dan menumbuhkan tonjolan kecil di salah satu ujung sel. Tunas ini mereplikasi genom, dan tunas tersebut tumbuh menjadi sel anak. Namun ketika ukuran tunas menjadi hampir sama dengan tunas induknya, maka tunas tersebut terpisah dari sel induknya dan menjadi bakteri yang baru (Parija, 2012).
- c. Fragmentasi, yaitu proses reproduksi dimana bakteri muncul dari bagian tubuh (fragmen) induknya. Bakteri induk memisahkan selnya, dan bagian yang terpisah menjadi bakteri baru dan tumbuh menjadi bakteri dewasa (Kumar, 2021).

2. Reproduksi Aseksual

Reproduksi seksual pada bakteri berbeda dengan eukariota, yang terjadi melalui peleburan gamet jantan dan betina. Pada bakteri, reproduksi seksual terjadi melalui pertukaran materi genetik, yang disebut rekombinasi genetik. Sel yang memberikan materi genetik disebut sel donor, sedangkan sel yang menerima materi genetik disebut sel penerima. Reproduksi seksual dapat terjadi melalui beberapa cara:

- a. Transformasi, yaitu Proses perpindahan materi genetik berupa DNA dari satu sel bakteri ke sel bakteri lainnya. Dalam proses ini, DNA dari sel bakteri donor menggantikan sebagian dari sel bakteri penerima, namun hal ini tidak terjadi melalui kontak langsung. Transfer materi genetik menggunakan plasmid. Rekombinasi terjadi ketika plasmid dari satu bakteri menyerang bakteri lain.
- b. Transduksi, yaitu proses pemindahan materi genetik dari sel bakteri yang satu ke sel bakteri yang lain dengan menggunakan virus yang memakan bakteri tersebut (bakteriofag). Virus yang paling cocok untuk proses transduksi ini adalah virus fag beriklim sedang. Pasalnya, virus ini mampu melakukan replikasi secara litik dan lisogenik. Tahapan penularannya adalah:
 - 1) Bakteri terinfeksi oleh virus fag, sehingga virus mengandung DNA dari bakteri tersebut.
 - 2) Virus fag menginfeksi bakteri lain. Hal ini menciptakan bakteri baru dengan gen rekombinan yang sesuai dengan gen rekombinan dari virus yang diinfeksi.
 - 3) Bakteri rekombinan terbentuk (Vos, Buckling and Kuijper, 2019).



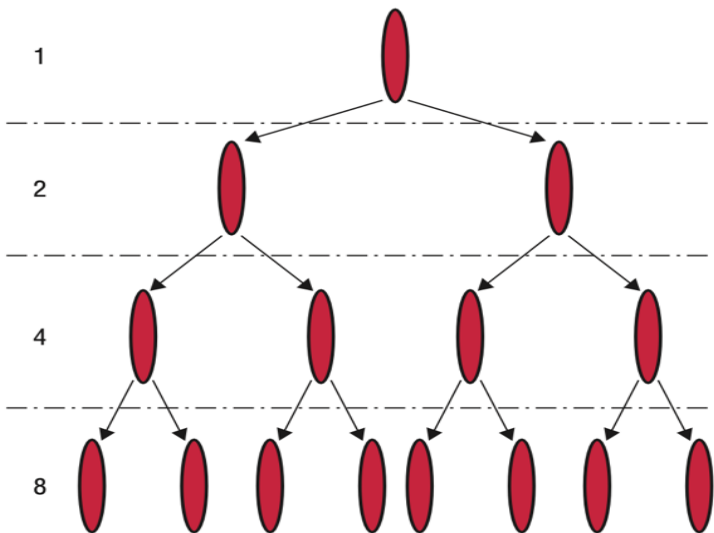
Gambar 2.14. Skema Sederhana Pelepasan DNA oleh Sel Donor dan Penyerapan DNA melalui Transformasi oleh Sel Penerima yang Menghasilkan Transfer Gen Horizontal (Vos, Buckling and Kuijper, 2019).

- c. Konjugasi, yaitu proses pemindahan materi genetik secara langsung dari bakteri yang satu ke bakteri lainnya melalui saluran konjugasi. Ini menghubungkan dua sel satu sama lain dan membentuk kontak langsung. Dengan mentransfer DNA dari sel bakteri donor ke sel bakteri penerima melalui ujung pili. Ujung fimbriae menempel

pada sel penerima, dan DNA ditransfer melalui ujung fimbriae (Chylen and Jamilatur, 2020).

2.3.2 Pertumbuhan Bakteri

Pertumbuhan bakteri dapat didefinisikan sebagai peningkatan yang teratur dari semua komponen kimiawi sel. Penggandaan sel adalah rangkaian pertumbuhan yang mengarah pada peningkatan jumlah bakteri yang membentuk suatu populasi atau kultur. Sebagian besar bakteri membelah diri melalui pembelahan biner di mana bakteri mengalami pembelahan sel untuk menghasilkan dua sel anak yang identik dengan sel induknya. Pertumbuhan bakteri dapat disamakan dengan jumlah sel: satu bakteri membelah menjadi dua, keduanya menghasilkan empat, lalu delapan, dan seterusnya. Oleh karena itu, laju pertumbuhan bakteri diukur dengan mengukur perubahan jumlah bakteri per satuan waktu (Parija, 2012).



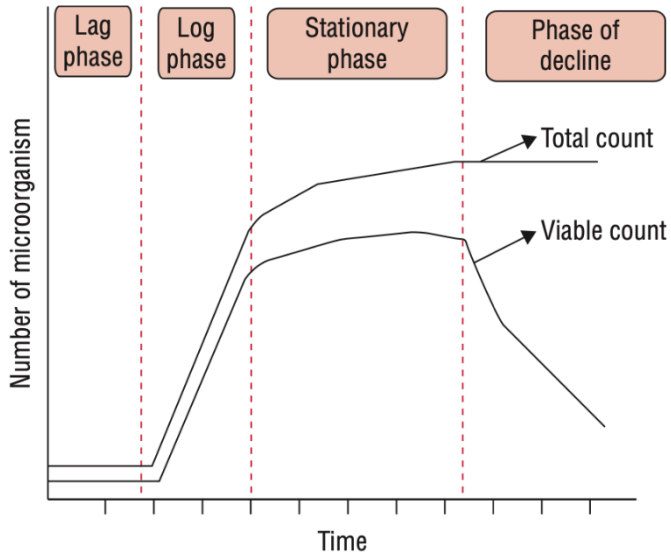
Gambar 2.15. Diagram skematik yang menunjukkan fisi biner bakteri (Parija, 2012).

2.3.3 Kurva Pertumbuhan Bakteri

Ketika kultur kaldu diinokulasi dengan inokulum bakteri kecil, ukuran populasi bakteri meningkat dan menunjukkan pola klasial. Kurva pertumbuhan bakteri menunjukkan empat fase yang berbeda berikut ini:

1. Fase lag: Setelah kaldu kultur cair diinokulasi, penggandaan bakteri tidak langsung dimulai. Dibutuhkan beberapa waktu untuk berkembang biak. Waktu antara inokulasi dan awal penggandaan dikenal sebagai fase lag. Pada fase ini, bakteri yang diinokulasi menjadi terbiasa dengan lingkungan, mengaktifkan berbagai enzim, dan menyesuaikan diri dengan suhu lingkungan dan kondisi atmosfer. Selama fase ini, terjadi peningkatan ukuran bakteri tetapi tidak ada peningkatan yang berarti dalam jumlah sel bakteri. Sel-sel aktif secara metabolik. Durasi fase lag bervariasi tergantung pada spesies bakteri, sifat media kultur, suhu inkubasi, dll. Dapat bervariasi dari 1 jam hingga beberapa hari (Parija, 2012).
2. Fase log: Fase ini ditandai dengan pertumbuhan sel eksponensial yang cepat (yaitu, 1 hingga 2 hingga 4 hingga 8 dan seterusnya). Populasi bakteri berlipat ganda selama setiap generasi. Bakteri berkembang biak dengan kecepatan maksimum. Sel-sel bakteri berukuran kecil dan bernoda seragam. Mikroba sensitif terhadap kondisi yang tidak menguntungkan, seperti antibiotik dan agen antimikroba lainnya (Parija, 2012).
3. Fase stasioner: Setelah fase log, pertumbuhan bakteri hampir berhenti sepenuhnya karena kekurangan nutrisi penting, kekurangan oksigen air, perubahan pH media, dll. Dan akumulasi limbah metabolisme beracun mereka sendiri. Laju kematian bakteri melebihi laju replikasi bakteri. Endospora mulai terbentuk selama tahap ini. Bakteri menjadi variabel Gram dan menunjukkan pewarnaan yang tidak teratur. Banyak bakteri mulai memproduksi eksotoksin (Parija, 2012).
4. Fase penurunan: Selama fase ini, populasi bakteri menurun karena kematian sel. Fase penurunan dimulai karena (a)

akumulasi produk beracun dan enzim autolitik dan (b) kehabisan nutrisi. Bentuk-bentuk involusi umum terjadi pada tahap ini.



Gambar 2.16. Kurva pertumbuhan bakteri (Parija, 2012)

2.3.4 Pengendalian Pertumbuhan Bakteri

Mikroorganisme tidak hanya bermanfaat, tetapi juga dapat merugikan manusia berupa penyakit dan racun. Pengelolaan mikroba dilakukan agar pemanfaatan mikroorganisme dapat dilakukan secara lebih optimal untuk kepentingan manusia. Tujuan pengendalian pertumbuhan mikroba adalah untuk mencegah penyebaran infeksi dan penyakit, mencegah kerusakan material akibat mikroorganisme, menekan pertumbuhan bakteri, dan mencegah kontaminasi bakteri yang tidak diinginkan pada media pertumbuhan bakteri. Secara umum, ada dua prinsip untuk mencegah pertumbuhan mikroba. Artinya: Membunuh mikroorganisme dan menghambat pertumbuhan mikroorganisme.

Pengendalian mikroba dapat dilakukan dengan:

1. **Cleaning dan Sanitasi**
Mengurangi jumlah populasi bakteri di suatu lokasi. Jika pembersihan dan higienitas tetap terjaga, mikroorganisme tidak akan tumbuh bahkan mungkin mati karena sumber makanan tidak tersedia.
2. **Sterilisasi** adalah proses menghilangkan seluruh mikroorganisme patogen hingga steril secara fisik dan kimia.
3. **Disinfeksi** adalah proses pemusnahan secara fisik dan kimia sebagian besar atau seluruh mikroorganisme patogen, kecuali spora bakteri, yang terdapat pada permukaan benda mati (non-biologis seperti pakaian, lantai, dinding, dll).
4. **Pengawet Senyawa kimia** yang digunakan dalam tubuh yang menghambat atau memperlambat pertumbuhan mikroorganisme. Bakteri dapat dikendalikan secara kimia atau fisik (Serwecińska, 2020).

2.4 Nutrisi dan Kultivasi Sel Bakteri

2.4.1 Nutrisi untuk Pertumbuhan Sel Bakteri

Proses kultivasi (inokulasi) bakteri di laboratorium memerlukan perhatian terhadap nutrisi dan faktor lain yang diinginkan oleh bakteri tertentu. Nutrisi dan faktor pertumbuhan mendukung pertumbuhan bakteri dan memungkinkan pertumbuhan sel bakteri secara optimal. Selain nutrisi yang perlu ada dalam media pertumbuhan bakteri, faktor pertumbuhan lainnya juga harus diperhatikan. Oleh karena itu, ketika membiakkan sel bakteri di laboratorium, perhatian harus diberikan pada aspek nutrisi dan faktor pertumbuhan yang spesifik untuk kelompok bakteri tertentu. Agar dapat bertahan hidup di alam, bakteri harus mampu bereproduksi dengan sukses. Prasyarat untuk pertumbuhan sel bakteri adalah adanya nutrisi yang diperlukan. Nutrisi yang dibutuhkan oleh sel bakteri harus ada dalam jumlah yang cukup dalam media pertumbuhan (Bonnet et al., 2020).

2.4.2 Media Pertumbuhan Bakteri

Bakteri membutuhkan substrat yang disebut media untuk tumbuh dan berkembang biak. Bakteri memerlukan persyaratan media tertentu untuk dapat bertahan dan berkembang dengan baik di dalam media. Media mengandung semua nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dan reproduksi bakteri. Medium memiliki osmolaritas dan pH yang sesuai untuk bakteri. Media harus steril. Media pertumbuhan bakteri mengandung berbagai nutrisi dan faktor yang memungkinkan pertumbuhan sel bakteri dengan baik. Media pertumbuhan ini bertujuan untuk mencegah tumbuhnya mikroorganisme lain seperti jamur pada media tersebut. Dengan cara ini, Anda bisa mendapatkan sel bakteri campuran atau hanya jenis bakteri tertentu yang dapat tumbuh di media tersebut (Bonnet *et al.*, 2020).

Dalam menyiapkan media alami seperti susu skim sebagai medianya, cukup dengan menuangkannya ke dalam wadah yang sesuai seperti tabung reaksi atau botol dan mensterilkannya sebelum digunakan. Kaldu atau agar-agar dibuat dengan melarutkan semua bahan yang diperlukan atau, lebih sederhananya, dengan menambahkan air ke dalam produk komersial dalam bentuk media bubuk, yang telah mengandung semua nutrisi yang diperlukan. Hampir semua media ini tersedia secara komersial dalam bentuk bubuk, beberapa siap digunakan dalam cawan petri, tabung, atau botol.

Persiapan media bakteri selain media alami dilakukan pada langkah berikut:

1. Larutkan setiap komponen atau media yang telah didehidrasi sempurna dalam air suling dengan volume yang sesuai.
2. Nilai pH (derajat keasaman dan kebasaan) media cair ditentukan dan disesuaikan (dengan penambahan larutan basa atau asam) hingga nilai optimal bagi pertumbuhan bakteri yang akan dibiakkan. Nilai pH diukur menggunakan indikator pH atau pH meter.
3. Sebelum sterilisasi, masukkan media ke dalam wadah yang sesuai seperti labu atau botol dan tutup dengan kapas atau tutup plastik atau logam.

4. Media biasanya disterilkan dengan menggunakan autoklaf. Proses ini menggunakan panas di bawah tekanan uap (Bonnet *et al.*, 2020).

2.4.3 Bentuk Media

Bentuk medium ditentukan oleh ada tidaknya zat pepadatan seperti agar atau gelatin. Ada tiga jenis media tergantung pada bentuknya: media padat, media cair, dan media semi padat. Media Padat (Media Padat); Media padat yang dibuat dengan mencampurkan agar-agar sebagai kompresor dan memadatkannya dalam bentuk agar-agar miring dalam gelas kimia (piring) atau tabung. Media padat dibuat dengan menambahkan bahan pepadatan seperti agar ke dalam media. Contoh media padat adalah nutrisi agar (NA). Media padat biasanya digunakan untuk memeriksa penampakan dan koloni bakteri. Selain itu, media padat juga digunakan untuk mengisolasi bakteri sehingga diperoleh koloni individu (memperoleh kultur murni) (Karah *et al.*, 2020).

Media cair (media kaldu). Media yang terdiri dari nutrisi cair. Media ini tidak mengandung bahan pepadatan seperti agar. Oleh karena itu, media ini selalu berbentuk cair pada suhu kamar. Contoh media cair adalah kaldu nutrisi. Media cair digunakan untuk membiakkan sejumlah besar mikroorganisme, studi fermentasi, dan berbagai jenis pengujian. Media ini tidak cocok untuk mengisolasi bakteri untuk memperoleh kultur murni dan tidak dapat digunakan untuk menguji koloni bakteri. Media semi padat (media semi padat). Media yang dibuat dengan menambahkan bahan pepadatan seperti agar, yang mengandung kurang dari setengah nutrisi. Oleh karena itu, viskositas media ini lebih rendah dibandingkan media padat. Media semi padat digunakan untuk menguji apakah terdapat motilitas (pergerakan) sel bakteri dan untuk menguji apakah terdapat kapasitas fermentasi bakteri (Saidah *et al.*, 2019).

Media pertumbuhan bakteri dibedakan menjadi media umum, media sederhana, media diperkaya, media pupuk, media diferensiasi, media selektif, media khusus, dan media serba guna berdasarkan sifat dan kegunaannya. Media Umum; Suatu media

yang umumnya digunakan untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan satu atau lebih kelompok mikroorganisme (bakteri). Contoh media ini adalah agar kaldu nutrisi (Saidah *et al.*, 2019).

Media pengaya; Suatu medium dimana satu jenis bakteri diberi kesempatan untuk tumbuh lebih cepat dibandingkan jenis bakteri lain yang ada pada medium yang sama. Misalnya kaldu selenite atau trisate untuk memisahkan *Salmonella typhi* dari mikroorganisme lain dalam tinja (Chylen and Jamilatur, 2020).

Pupuk (diperkaya); Suatu media yang mengandung bahan yang hanya dapat menyuburkan bakteri tertentu, dan bahan tambahan tersebut dapat menekan pertumbuhan bakteri lain.

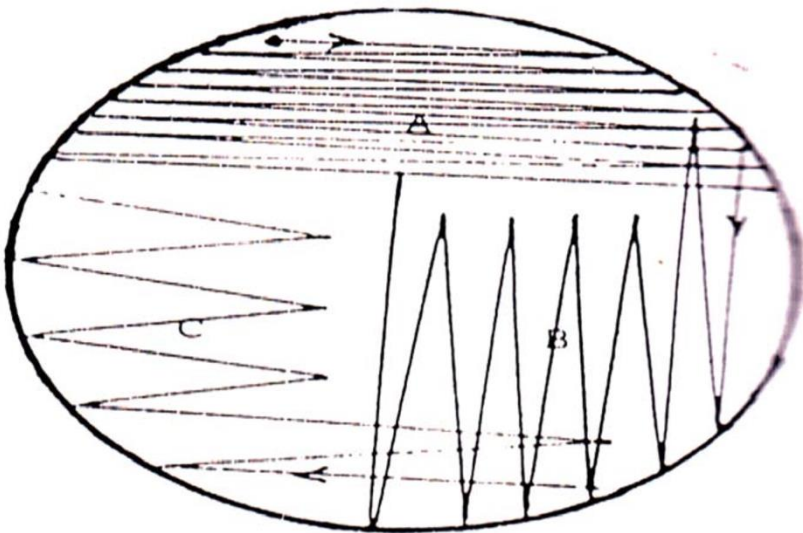
Media perbandingan (perbedaan); Suatu media yang digunakan untuk menumbuhkan bakteri tertentu dan menentukan sifat-sifatnya. Media pembanding; digunakan untuk membedakan dua kelompok bakteri tertentu berdasarkan karakteristik metabolisme kedua kelompok bakteri tersebut. Misalnya saja penggunaan media kultur untuk mengukur kemampuan fermentasi laktosa bakteri (Chylen and Jamilatur, 2020).

Media selektif; media dimana hanya satu atau jenis bakteri tertentu yang dapat tumbuh, sedangkan jenis bakteri lainnya ditekan atau dibunuh. Media ini mengandung bahan kimia tertentu yang dapat menghambat pertumbuhan satu atau lebih kelompok bakteri tanpa menghambat pertumbuhan mikroorganisme yang diinginkan. Misalnya media agar SS (*Salmonella-Shigella*) membudidayakan *Salmonella enterica* dan *Mycobacterium rubella*, namun media ini dapat menghambat atau membunuh bakteri lain yang tidak diinginkan (Saidah *et al.*, 2019).

Media khusus; Media yang ditambahkan bahan-bahan untuk pertumbuhan bakteri tertentu. Misalnya saja media yang kaya akan darah domba, kelinci, atau kuda. Mengukur kemampuan bakteri untuk menjalani hemolisis. Media serbaguna; Sebuah media yang dapat mendukung pertumbuhan sebagian besar bakteri. Misalnya sup bergizi (Chylen and Jamilatur, 2020).

2.4.4 Metode Kultivasi Bakteri

Jumlah bakteri di alam sangat banyak. Bakteri terjadi secara alami di udara, tanah, dan air. Banyak jenis bakteri yang hidup di alam. Oleh karena itu, jika bakteri ditumbuhkan dalam media yang memungkinkan tumbuhnya semua jenis bakteri, maka akan diperoleh kultur campuran (bakteri yang terdiri dari spesies berbeda). Saat membudidayakan (transplantasi) bakteri di laboratorium, metode kultur khusus digunakan untuk memperoleh kultur murni. Metode kultur yang dapat digunakan untuk memperoleh kultur murni adalah metode strip dan metode pour plate. Pada metode penggoresan, sel bakteri digores secara melingkar pada media padat dalam cawan Petri, atau secara diagonal pada media padat dalam tabung. Metode tuang terlebih dahulu mengencerkan sampel yang mengandung bakteri. Dalam metode penuangan, setelah sampel diencerkan, sejumlah tertentu diambil dengan pipet dan dipindahkan ke cawan petri. Selanjutnya tambahkan media padat dan kocok hingga media dan sampel tercampur rata (Lee, 2021).



Gambar 2.17. Cara menyebarkan bakteri dengan metode goresan (Chylen and Jamilatur, 2020)

2.4.5 Gambaran Koloni Kuman

Koloni adalah kumpulan sel-sel individu hasil pembelahan sel germinal pada medium padat atau semi padat. Bentuk koloninya berbeda-beda: bulat, tidak beraturan, seperti jari, atau seperti rambut. Permukaan koloni juga bervariasi. Artinya, halus, kasar, berbutir halus atau kasar, nodular, mengkilat, dll. Ukuran koloni berkisar antara 2 hingga 3 mm. Ini adalah koloni yang sangat kecil berukuran 0,5 hingga 1 mm. Tonjolan koloni bakteri bervariasi mulai dari agak cembung, cembung, menyebar, meninggi pada bidang, meninggi di tengah, dan berbintik-bintik cembung (Lee, 2021).



Gambar 2.18. Penonjolan Koloni (Chylen and Jamilatur, 2020)

2.5 Genetika Bakteri

2.5.1 Kromosom

Secara fungsional, kromosom dibagi menjadi beberapa segmen. Setiap segmen menentukan urutan asam amino, yang membentuk struktur polipeptida. Protein ini adalah enzim dan elemen membran sitoplasma. Semua struktur lainnya berfungsi sebagai penentu sifat suatu organisme. Segmen kromosom asam deoksiribonukleat (DNA) yang menentukan struktur protein tertentu disebut gen. DNA adalah komponen dasar utama gen, yang membawa informasi genetik yang ditranskripsi ke asam ribonukleat dan kemudian diterjemahkan sebagai polipeptida tertentu. Struktur dasar molekul DNA pertama kali dideskripsikan oleh Watson dan Crick, yang kemudian dianugerahi Hadiah Nobel Kedokteran. Molekul DNA terdiri dari dua untai nukleotida komplementer yang dililitkan menjadi satu

dalam bentuk heliks ganda. Heliks ganda memiliki diameter 2 nm. Setiap putaran penuh heliks ganda mengandung 10 pasangan nukleotida dan memiliki panjang 3,4 nm (Widanarni, Dewi and Dinamella, 2013).

2.5.2 Struktur Asam Amino

Setiap untai DNA memiliki tulang punggung deoksiribosa (gula) dan residu gugus fosfat yang tersusun secara bergantian. DNA memiliki tulang punggung gula-fosfat yang disubstitusi dengan purin dan pirimidin serta guanin), dan dua pirimidin (timin dan sitosin). Kedua untai komplementer disatukan oleh ikatan hidrogen antara basa nitrogen pada untai yang berlawanan. Ikatan hidrogen mengikuti cara pengikatan tertentu di mana ikatan hidrogen hanya terbentuk antara guanin dan sitosin dan antara adenin dan timin. Guanin dan sitosin membentuk pasangan basa komplementer dan adenin serta timin membentuk pasangan basa lainnya. Oleh karena itu, sebuah molekul DNA mengandung unit adenin sebanyak timin dan guanin sebanyak sitosin. Sebagai contoh, ketika susunan basa di sepanjang satu untai adalah AGCTAG, susunan pada untai lainnya adalah TCGATC. Rasio adenin dan timin terhadap guanin dan sitosin adalah konstan untuk setiap spesies, tetapi sangat bervariasi dari satu spesies bakteri ke spesies lainnya (Minchin and Lodge, 2019).

Selama replikasi, molekul DNA bereplikasi, pertama dengan melepaskan diri di satu ujung untuk membentuk garpu dan kemudian dengan pemisahan untaian di ujung yang lain. Setiap untai kemudian bertindak sebagai templat untuk sintesis untai komplementer yang kemudian membentuk heliks ganda. Transfer informasi genetik dari DNA ke RNA disebut transkripsi. Di sisi lain, proses penerjemahan kodon dari DNA yang dibawa oleh RNA disebut translasi (Minchin and Lodge, 2019).

Ini adalah segmen DNA yang membawa kodon yang menentukan polipeptida tertentu. Molekul DNA terdiri dari sejumlah besar gen, yang masing-masing mengandung ratusan ribu nukleotida. DNA kromosom bakteri biasanya tersusun dalam bentuk melingkar dan jika diluruskan, ukurannya sekitar 1000 μ .

Panjang DNA biasanya dinyatakan dalam satuan kilo basa (1 kbp = 1000 pasang basa, atau bp). Ukuran DNA bakteri biasanya 4000 kbp dan genom manusia sekitar 3 juta kbp.

Pada dasarnya, struktur RNA mirip dengan struktur DNA kecuali untuk dua perbedaan utama:

1. Pada DNA, gulanya adalah D-2-deoksiribosa; pada RNA, gulanya adalah D-ribosa.
2. RNA mengandung basa nitrogen urasil, bukan timin yang ada dalam DNA.
3. Berdasarkan struktur dan fungsinya, RNA dapat dibedakan menjadi tiga jenis:
4. RNA pembawa pesan (mRNA),
5. RNA ribosom (rRNA),
6. RNA transfer (tRNA).

Molekul RNA memiliki ukuran yang beragam, mulai dari tRNA yang kecil (yang mengandung kurang dari 100 basa) hingga mRNA (yang dapat membawa pesan genetik hingga beberapa ribu basa). Ribonukleotida bakteri mengandung tiga jenis rRNA dengan ukuran masing-masing 120, 1540, dan 2900 basa dan sejumlah protein. Molekul rRNA yang sesuai dalam ribosom eukariotik agak lebih besar (Childs-Disney *et al.*, 2022).

Beberapa molekul RNA telah terbukti berfungsi sebagai enzim (ribozim). Sebagai contoh, RNA 23S dalam subunit ribosom 50S mengkatalisis pembentukan ikatan peptida selama sintesis protein. Beberapa molekul RNA kecil (sRNA) berfungsi sebagai pengatur baik (a) dengan mengikat di dekat ujung 5' mRNA, mencegah ribosom menerjemahkan pesan tersebut, atau (b) dengan memasang basa secara langsung dengan untai DNA di dekat promotor, mencegah transkripsi (Childs-Disney *et al.*, 2022).

2.5.3 Variasi Genotif dan Fenotif

Fenotipe, cara suatu organisme menunjukkan karakteristik genetiknya dalam kondisi lingkungannya. Perubahan fenotipik mempunyai ciri-ciri sebagai berikut:

1. Perubahan yang disebabkan oleh keadaan lingkungan hidup bersifat sementara.
2. Perubahan yang terjadi dapat berbalik arah begitu suasana lingkungan kembali normal.

Bakteri memiliki banyak informasi genetik. Ekspresi informasi genetik dipengaruhi oleh lingkungan. Hal ini dapat terjadi misalnya pada proses metabolisme bakteri anaerob yang selalu dipengaruhi oleh keberadaan oksigen (keberadaan oksigen menentukan jenis enzim apa yang berperan dalam metabolisme). Perubahan fenotipik dapat diamati sebagai berbagai perubahan morfologi sel bakteri pada kondisi lingkungan yang berbeda. Genotipe, jumlah determinan yang diturunkan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Perubahan genotip (variasi genotip) diakibatkan oleh mutasi dan perpindahan materi genetik dari satu embrio ke embrio lainnya. Ciri-ciri genotipe ditentukan oleh informasi genetik yang terkandung dalam kromosom. Kromosom mengandung gen bakteri. Gen adalah unit fungsional yang diwariskan dan menentukan pembentukan polipeptida spesifik dan berbagai jenis RNA (Childs-Disney *et al.*, 2022).

2.5.4 Mutasi

Mutasi adalah variasi acak, tidak terarah, dan dapat diwariskan yang terlihat pada DNA sel. Hal ini disebabkan oleh perubahan urutan basa DNA karena penambahan, penghapusan, atau substitusi satu atau beberapa basa dalam urutan nukleotida DNA. Hal ini dapat melibatkan salah satu gen yang ada dalam kromosom bakteri. Mutasi menghasilkan penyisipan asam amino yang berbeda ke dalam protein, yang mengakibatkan munculnya fenotipe yang berubah (Quiroz *et al.*, 2023).

Mutasi adalah peristiwa alami yang terjadi pada sel yang membelah. Frekuensi mutasi berkisar antara 10^{-2} hingga 10^{-10} per bakteri per pembelahan. Mutasi ini terjadi secara spontan atau diperkuat oleh mutagen yang berbeda. Mutasi terdiri dari tiga jenis: (a) substitusi basa, (b) mutasi pergeseran basa, dan (c)

mutasi karena transposon atau urutan penyisipan (Quiroz *et al.*, 2023).

1. Mutasi karena substitusi basa

Jenis mutasi ini terjadi ketika satu basa dalam urutan nukleotida disisipkan menggantikan basa lainnya. Hal ini terjadi selama replikasi DNA baik karena kesalahan dalam fungsi DNA polimerase atau karena mutagen yang mengubah ikatan hidrogen dari basa yang digunakan sebagai templat sedemikian rupa sehingga basa yang salah disisipkan. Mutasi substitusi basa dapat terdiri dari dua jenis: mutasi missense dan mutasi nonsense

- a. Mutasi missense: Mutasi ini adalah mutasi yang menghasilkan substitusi basa pada kodon yang menentukan asam amino yang berbeda untuk disisipkan.
- b. Mutasi yang tidak masuk akal: Ini adalah jenis mutasi lain di mana substitusi basa menghasilkan kodon terminal yang menghentikan sintesis protein sebelum waktunya. Seluruh fungsi protein dihancurkan selama proses mutasi omong kosong.

2. Mutasi pergeseran bingkai

Ini adalah jenis mutasi kedua. Hal ini terjadi ketika satu atau lebih pasangan basa ditambahkan atau dihapus dalam DNA. Oleh karena itu, hal ini menyebabkan pergeseran kerangka pembacaan ribosom yang menghasilkan penggabungan asam amino yang salah di bagian hilir mutasi. Hasil mutasi pergeseran bingkai berakhir dengan produksi protein yang tidak aktif.

3. Mutasi karena transposon atau urutan penyisipan

Ini adalah jenis mutasi ketiga yang terjadi ketika transposon atau urutan penyisipan diintegrasikan ke dalam DNA. Potongan-potongan DNA yang baru disisipkan ini menyebabkan perubahan besar pada gen yang disisipi dan juga menyebabkan perubahan pada gen yang berdekatan.

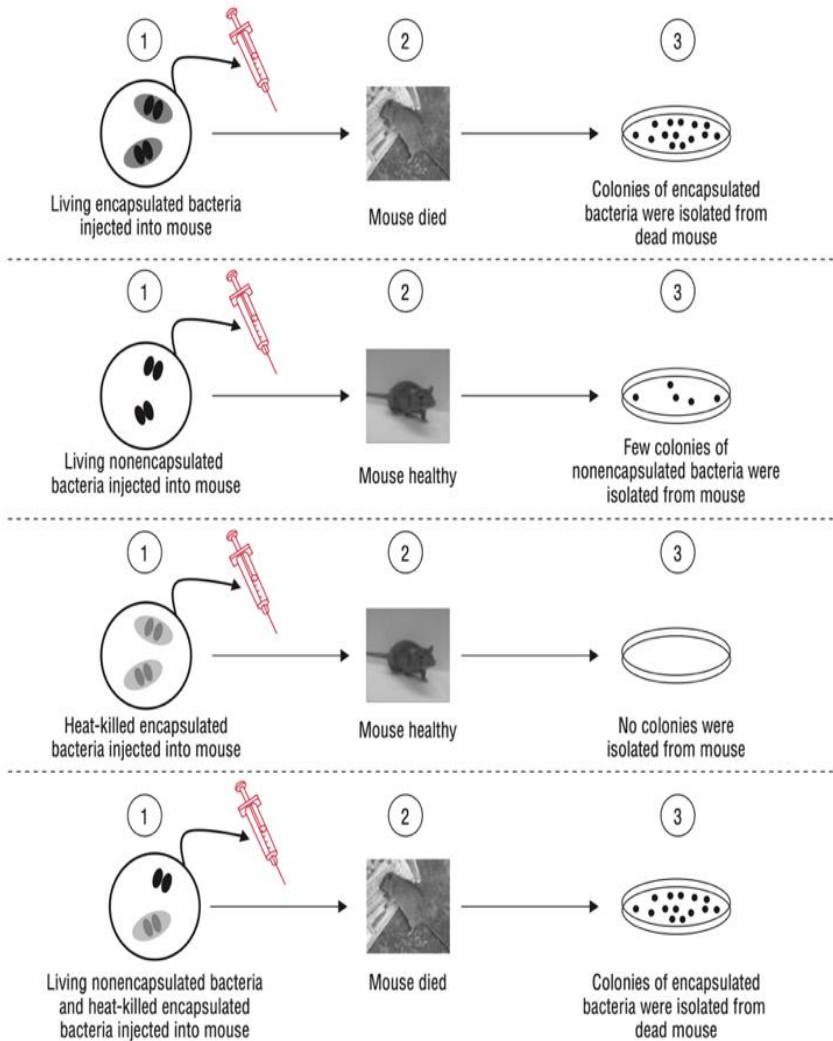
4. Efek dari Mutasi

Mutasi pada bakteri menyebabkan banyak perubahan pada berbagai sifatnya. Mutasi mengubah kerentanan terhadap obat, struktur anti-genik, dan virulensi bakteri mutan. Mutasi juga mengubah kerentanan bakteri terhadap bakteriofag, mengubah morfologi koloni dan produksi pigmen, serta memengaruhi kemampuannya untuk menghasilkan kapsul atau flagela. Perkembangan resistensi obat akibat mutasi pada bakteri merupakan masalah kesehatan yang utama.

2.5.5 Pemindahan Materi Genetik

1. Transformasi

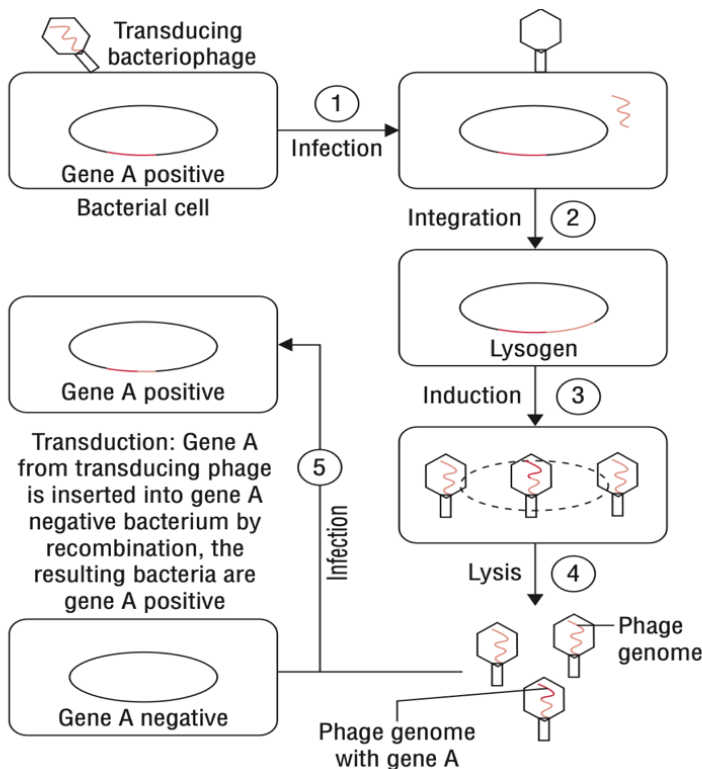
Transformasi adalah proses pemindahan DNA itu sendiri dari satu bakteri ke bakteri lainnya. Hal ini dapat terjadi baik di alam maupun di laboratorium. Di alam, DNA dilepaskan dari bakteri melalui lisis, yang dapat diambil oleh bakteri penerima yang harus kompeten. Proses alamiah pemindahan materi genetik ini tampaknya tidak berperan dalam penyakit. Dalam kondisi laboratorium, DNA dapat diekstraksi dari satu jenis bakteri dan dimasukkan ke dalam bakteri yang berbeda secara genetik. Dinding sel bakteri *in vitro* dibuat lebih mudah ditembus untuk penyerapan DNA dengan menggunakan zat-zat, seperti kalsium klorida (Parija, 2012).



Gambar 2.19. Diagram skematik yang menunjukkan transmisi DNA melalui transformasi (Parija, 2012).

2. Transduksi

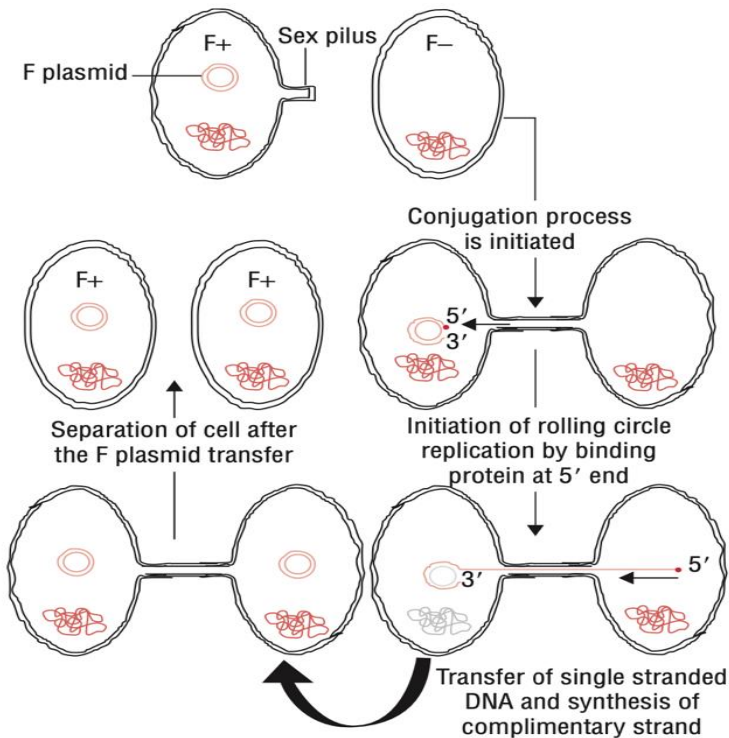
Pemindahan sebagian DNA dari satu bakteri ke bakteri lain yang dimediasi oleh bakteriofag dikenal sebagai transduksi. Selama replikasi virus di dalam sel, sepotong DNA bakteri dimasukkan ke dalam bakteriofag dan dibawa ke dalam bakteri penerima pada saat infeksi. DNA fag di dalam sel bakteri penerima berintegrasi ke dalam DNA sel selama proses yang disebut konversi lisogenik. Proses konversi lisogenik memberikan sifat baru pada sel bakteri; misalnya, dengan konversi lisogenik, bakteri yang tidak patogen dapat menjadi patogen (Mengiste *et al.*, 2023).



Gambar 2.20. Diagram skematik yang menunjukkan transmisi materi genetik melalui transduksi yang dimediasi bakteriofag (Parija, 2012)

3. Konjugasi

Konjugasi adalah proses pemindahan DNA dari bakteri donor ke bakteri penerima selama perkawinan dua sel bakteri. Dalam konjugasi, kontak langsung antara bakteri donor dan penerima menyebabkan pembentukan jembatan sitoplasma di antara keduanya dan pemindahan sebagian atau seluruh genom donor ke penerima. Konjugasi terjadi antara dua spesies yang berkerabat dekat dan sebagian besar terjadi pada bakteri Gram negatif. Konjugasi juga terjadi pada bakteri Gram positif (Mengiste *et al.*, 2023).



Gambar 2.21. Diagram skematik yang menunjukkan transmisi materi genetik melalui konjugasi (Parija, 2012)

Kemampuan donor bakteri ditentukan oleh plasmid konjugasi spesifik yang disebut plasmid kesuburan (F) atau plasmid seks. Plasmid F mengontrol proses perkawinan bakteri.

Pilus adalah protein terpenting yang membentuk pilus seks atau tabung konjugasi. Pilus seks menghasilkan jembatan antara sel-sel yang berkonjugasi pada bakteri Gram negatif. Perkawinan terjadi antara bakteri jantan donor yang membawa faktor F (F) dan bakteri betina penerima yang tidak mengandung faktor F (F). Ini dimulai ketika pilus bakteri F menempel pada reseptor di permukaan bakteri betina (F). Sel-sel kemudian dibawa ke dalam kontak langsung oleh tautan di pilus. Hal ini diikuti oleh pembelahan enzimatik DNA faktor F di mana satu untai DNA bakteri ditransfer ke dalam sel penerima melalui jembatan konjugasi. Sintesis untai komplementer untuk membentuk plasmid faktor-F untai ganda dalam sel donor dan penerima melengkapi proses konjugasi. Sel penerima menjadi F jantan yang mampu mentransmisikan plasmid ke sel F lainnya (Parija, 2012).

DAFTAR PUSTAKA

- Ade Pangestu, N. *et al.* (2020) 'Classification and Counting of Mycobacterium Tuberculosis from Sputum Microscopic Image using Fuzzy Logic', in *IES 2020 - International Electronics Symposium: The Role of Autonomous and Intelligent Systems for Human Life and Comfort*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 520–526. Available at: <https://doi.org/10.1109/IES50839.2020.9231925>.
- Bonnet, M. *et al.* (2020) 'Bacterial culture through selective and non-selective conditions: the evolution of culture media in clinical microbiology', *New Microbes and New Infections*. Elsevier Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nmni.2019.100622>.
- Childs-Disney, J.L. *et al.* (2022) 'Targeting RNA structures with small molecules', *Nature Reviews Drug Discovery*. Nature Research, pp. 736–762. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41573-022-00521-4>.
- Chylen, S.R. and Jamilatur, R. (2020) *BUKU AJAR MATA KULIAH BAKTERIOLOGI DASAR*. UMSIDA PRESS.
- Cornilleau, C. *et al.* (2023) 'Peptidoglycan remodeling in response to cell wall acting antibiotics in *Bacillus subtilis*'. Available at: <https://doi.org/10.1101/2023.01.23.525174>.
- Jørgen Christensen, J. *et al.* (2005) 'Ribosomal DNA sequencing: experiences from use in the Danish National Reference Laboratory for Identification of Bacteria New diagnostic tools for identification of bacteria are continually being introduced. These', *APMIS*, 113, pp. 621–629. Available at: www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST.
- Jufri, R.F. (2020) 'Microbial Isolation', *Journal La Lifesci*, 1(1), pp. 18–23.
- Kalkan, K.T. and Eşrefoğlu, M. (2020) 'The Cell Membrane: A Historical Narration', *Bezmi'alem Science*, 8(1), pp. 81–88. Available at: <https://doi.org/10.14235/bas.galenos.2019.3131>.

- Karah, N. *et al.* (2020) 'Guideline for urine culture and biochemical identification of bacterial urinary pathogens in low-resource settings', *Diagnostics*, 10(10). Available at: <https://doi.org/10.3390/diagnostics10100832>.
- Kayser *et al.* (2005) *Medical Microbiology*.
- Kumar, R. (2021) 'Evaluation of Prokaryotic and Eukaryotic Cell', *Asian Journal of Pharmaceutical Research*, pp. 202–205. Available at: <https://doi.org/10.52711/2231-5691.2021.00036>.
- Lavelle, K., Sinderen, D. van and Mahony, J. (2021) 'Cell wall polysaccharides of Gram positive ovococcoid bacteria and their role as bacteriophage receptors', *Computational and Structural Biotechnology Journal*. Elsevier B.V., pp. 4018–4031. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.07.011>.
- Lee, A. (2021) *MB352 General Microbiology Laboratory*. Available at: <https://LibreTexts.org>.
- Lestari, I.D.A.M.D. and Hendrayana, M.A. (2017) *Identifikasi dan Diagnosis Infeksi Bakteri Salmonella typhi*. Universitas Udayana.
- Levin, P.A. and Angert, E.R. (2015) 'Small but mighty: Cell size and bacteria', *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 7(7), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a019216>.
- Mengiste, A.A. *et al.* (2023) 'Expanded MutaT7 toolkit efficiently and simultaneously accesses all possible transition mutations in bacteria', *Nucleic Acids Research*, 51(6), p. E31. Available at: <https://doi.org/10.1093/nar/gkad003>.
- Minchin, S. and Lodge, J. (2019) 'Understanding biochemistry: Structure and function of nucleic acids', *Essays in Biochemistry*. Portland Press Ltd, pp. 433–456. Available at: <https://doi.org/10.1042/EBC20180038>.
- Moon, M.S. (2019) 'Essential basic bacteriology in managing musculoartculoskeletal infection: Bacterial anatomy, their behavior, host phagocytic activity, immune system, nutrition, and antibiotics', *Asian Spine Journal*. Korean

- Society of Spine Surgery, pp. 343–356. Available at: <https://doi.org/10.31616/ASJ.2017.0239>.
- Morinaga, K. *et al.* (2020) 'Peculiarities of biofilm formation by *Paracoccus denitrificans*', *Applied Microbiology and Biotechnology*. Springer, pp. 2427–2433. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10400-w>.
- Nurtanio, I. *et al.* (2022) 'Multi Classification of Bacterial Microscopic Images using Inception V3', *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 14(1), pp. 80–90. Available at: <https://doi.org/10.33096/ilkom.v14i1.1120.80-90>.
- Parija, S.C. (2012) *Microbiology and Immunology*. Elsevier.
- Quiroz, D. *et al.* (2023) 'Annual Review of Plant Biology Causes of Mutation Rate Variability in Plant Genomes', *Annu. Rev. Plant Biol.* 2023, 74, pp. 751–775. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070522>.
- Radkov, A.D. *et al.* (2018) 'Imaging Bacterial Cell Wall Biosynthesis', *Annual Review of Biochemistry*. Annual Reviews Inc., pp. 991–1014. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-062917-012921>.
- El Rayes, J., Rodríguez-Alonso, R. and Collet, J.F. (2021) 'Lipoproteins in Gram-negative bacteria: new insights into their biogenesis, subcellular targeting and functional roles', *Current Opinion in Microbiology*. Elsevier Ltd, pp. 25–34. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2021.02.003>.
- Saidah, S.N. *et al.* (2019) 'The Characteristics Yeast Isolated From Commercial Kefir Grain', *Hasanuddin J. Anim. Sci*, 1(1), pp. 26–36.
- Saier, M.H. (2005) 'Beneficial bacteria and bioremediation', *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, pp. 63–64. Available at: <https://doi.org/10.1159/000088836>.
- Sanchez-Rosario, Y. and Johnson, M.D.L. (2021) 'Media Matters, Examining Historical and Modern *Streptococcus pneumoniae* Growth Media and the Experiments They Affect', *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*.

- Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.613623>.
- Serwecińska, L. (2020) 'Antimicrobials and antibiotic-resistant bacteria: A risk to the environment and to public health', *Water (Switzerland)*, 12(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/w12123313>.
- Silhavy, T.J., Kahne, D. and Walker, S. (2010) 'The bacterial cell envelope.', *Cold Spring Harbor perspectives in biology*. Available at: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000414>.
- Sionek, B. *et al.* (2023) 'Beneficial Bacteria Isolated from Food in Relation to the Next Generation of Probiotics', *Microorganisms*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071714>.
- Smithers, L., Olatunji, S. and Caffrey, M. (2021) 'Bacterial Lipoprotein Posttranslational Modifications. New Insights and Opportunities for Antibiotic and Vaccine Development', *Frontiers in Microbiology*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.788445>.
- Sopialena (2018) *PENGENDALIAN HAYATI dengan Memberdayakan Potensi Mikroba*. Mulawarman University Press.
- Suyono, Y. and Salahudin, F. (2011) 'Identification and Characterization bacteria Pseudomonas on Metal Contaminated Soil indicated', *Jurnal BIOPROPAL INDUSTRI* [Preprint], (01).
- Tadesse, A. and Alem, M. (2006) *LECTURE NOTES Degree and Diploma Programs For Environmental Health Students Medical Bacteriology*.
- Tobin, C. (2011) *Removal and Replacement of Ribosomal Proteins: Effects on Bacterial Fitness and Ribosome Function*.
- Üçüncü, G., Karakaya, F. and Yilmaz, M. (2022) 'Making Yogurt: A Practical Study to Develop an Understanding of Useful Bacteria', *Journal of Science Learning*, 5(2), pp. 321–333. Available at: <https://doi.org/10.17509/jsl.v5i2.40540>.

- Vos, M., Buckling, A. and Kuijper, B. (2019) 'Sexual Selection in Bacteria?', *Trends in Microbiology*. Elsevier Ltd, pp. 972–981. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.07.009>.
- Widanarni, Dewi, N. and Dinamella, W. (2013) 'Analysis of bacterial genetic diversity in biofloc by using ARDRA 16S-rRNA gene', *Jurnal Akuakultur Indonesia* , 12(2), pp. 1–8.

BAB 3

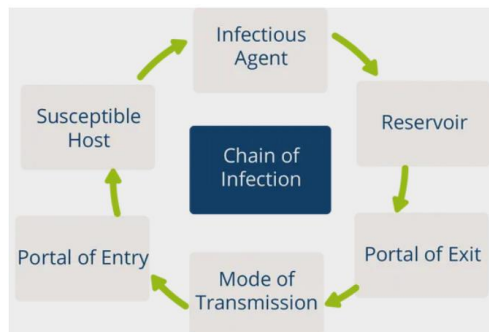
KONSEP DASAR PENCEGAHAN DAN PENGENDALIAN INFEKSI

Oleh Hasria Alang

3.1 Pendahuluan

Mikroba adalah makhluk yang sifatnya kosmopolit, artinya dapat hidup disemua tempat atau mempunyai kisaran hidup yang tersebar luas. Keberadaan mikroba pada suatu agen atau habitat dikarenakan adanya nutrisi serta lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroba tersebut, seperti suhu, air, oksigen dan atau pH. Kehadiran mikroba yang tidak diinginkan akan menyebabkan infeksi.

Pencegahan dan Pengendalian Infeksi (PPI) adalah suatu usaha untuk menghambat, mematikan atau mengurangi jumlah dan aktivitas mikroba. Bagian ini merupakan point penting dalam bekerja dengan mikroorganisme agar tidak terjadinya penyebaran infeksi, mencegah kerusakan akibat adanya infeksi dan membasmi mikroba yang telah terlanjur menginfeksi inang. Pencegahan infeksi dapat dilakukan dengan sterilisasi, desinfeksi ataupun dengan pemberian antimikroba. Jalur infeksi mikroba seperti terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Jalur infeksi

Sterilisasi adalah proses mengeliminasi semua agen kontaminan atau bentuk kehidupan pada suatu media/permukaan, baik bentuk vegetatif maupun reproduktif (spora) dan virus. Desinfeksi adalah proses menghilangkan atau membunuh agen penyebab infeksi bentuk vegetatif dari sebagian besar organisme yang patogen, tetapi tidak untuk membunuh semua mikroba termasuk spora. Agen yang dapat mematikan atau menghilangkan infeksi disebut desinfektan. Antimikroba adalah senyawa yang dapat membunuh atau menghambat pertumbuhan suatu mikroba. Agen yang dapat membunuh mikroba disebut mikrobisida (germisida), sedangkan yang hanya menghambat pertumbuhan mikroba disebut mikrobiostatik. Jenis-jenis mikrobisida yaitu:

1. Bacterisida: senyawa atau bahan kimia yang dapat membunuh bakteri
2. Fungisida: senyawa atau bahan kimia yang dapat membunuh fungi
3. Virusida: senyawa atau bahan kimia yang dapat membunuh virus
4. Algasida: senyawa atau bahan kimia yang dapat membunuh
5. Sporisida: senyawa atau bahan kimia yang dapat menghilangkan spora

3.2 Sterilisasi

3.2.1 Sterilisasi fisik mikroba

Metode fisik seringkali digunakan untuk menghilangkan kontaminasi (dekontaminasi), penghilangan infeksi (desinfeksi). Pengendalian fisik dilakukan melalui.

1. Sterilisasi panas

Semua mikroba memiliki suhu maksimum untuk pertumbuhannya, apabila diberikan perlakuan diatas suhu tersebut, maka populasi mikroba akan berkurang. Pada suhu yang tinggi, hampir semua makromolekul mikroba mengalami kerusakan sehingga fungsi metabolisme akan terganggu, proses ini disebut denaturasi, sedangkan pada suhu dingin mikroba tidak mengalami kematian, namun

tidak pula berkembang, tetapi hanya menonaktifkan metabolismenya. Sehingga sterilisasi panas lebih dibutuhkan daripada sterilisasi suhu dingin. Oleh karena itu, diperlukan penentuan waktu dan suhu yang tepat untuk menghilangkan agen kontamian atau pun sterilisasi. Sterilisasi panas dilaboratorium dilakukan dengan cara sterilisasi panas kering, sterilisasi panas basah dan pasteurisasi. Sterilisasi panas dilakukan dengan cara pembakaran/pemijaran pada bunsen dan dengan cara uap panas menggunakan oven, sedangkan sterilisasi panas basah dilakukan menggunakan autoclave (Gambar 3.2). Autoclave adalah sterilisasi dengan menggunakan uap panas bertekanan, yang akan membunuh mikroba yang ada di dalamnya. Pasteurisasi adalah proses sterilisasi dengan cara pemanasan menggunakan suhu dibawah 100 °C, dan umumnya digunakan untuk produk makanan misalnya susu.



Gambar 3.2. Sterilisasi panas uap bertekanan (*Autoclave*) dan panas kering (pemijaran dan oven)

1. Radiasi

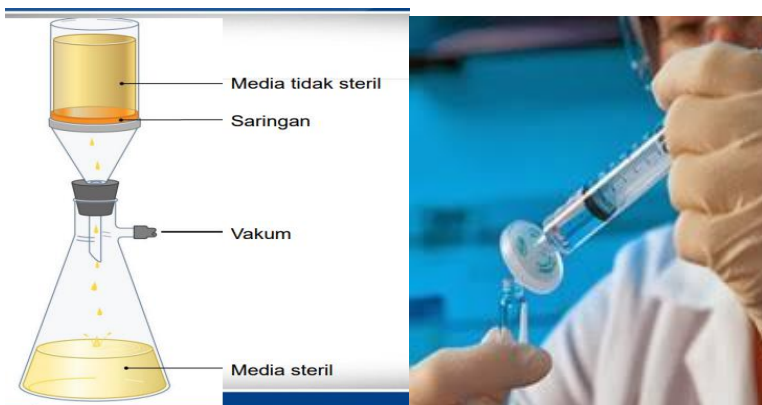
Radiasi merupakan panas elektromagnetika yang dapat mengurangi atau menghilangkan populasi mikroba. Baik panas maupun radiasi hanya digunakan untuk sterilisasi cairan yang tahan terhadap panas (Gambar 3.3).



Gambar 3.3. Sterilisasi dengan radiasi

2. Filtrasi

Filtrasi digunakan untuk dekontaminasi atau desinfeksi cairan yang sensitif terhadap panas. Filter pada filtrasi adalah merupakan benda berpori yang berukuran tertentu, sehingga dapat menahan mikroba, namun mampu melewatkan cairan atau gas (Gambar 3.4).



Gambar 3.4. Filter membrane

3.2.2 Sterilisasi Kimiawi Mikroba

Pengendalian kimiawi mikroba dilakukan dengan cara pemberian desinfektan cair seperti alkohol, betadine, klorin ataupun survaktan (Gambar 3.5). Pengendalian ini dilakukan pada permukaan benda mati.



Gambar 3.5. Sterilisasi kimiawi

3.3 Pemberian Antimikroba

Pengendalian mikroba juga dapat dilakukan dengan cara pemberian antimikroba, baik sintetis maupun alami, yang mampu menghambat ataupun membunuh pertumbuhan mikroba. Pengendalian infeksi ini ada yang bersifat statik (menghambat) ataupun membunuh (berakhiran sidal). Pemakaian antimikroba digunakan untuk makhluk hidup. Antimikroba terdiri dari:

1. Antiseptik, adalah senyawa antimikroba yang tidak berbahaya untuk kulit dan membran mukosa, tetapi namun tidak dapat di intake dalam tubuh
2. Desinfektan, adalah senyawa yang dapat membunuh mikroba (tetapi tidak membunuh spora), tidak aman untuk aplikasi pada makhluk hidup/jaringan dan hanya digunakan aman untuk benda-benda mati/perkakas seperti meja, bangku, lantai dll
3. Konservasi, adalah senyawa yang bersifat statik yang akan menghambat pertumbuhan mikroba, umumnya pada produk makanan dan minuman dan
4. Antibiotik, adalah senyawa antimikroba yang dihasilkan oleh mikroorganisme yang dapat membunuh atau menghambat pertumbuhan mikroba patogen secara selektif.

3.3.1 Pengendalian pertumbuhan

Agen antimikroba untuk mengendalikan pertumbuhan mikroba dapat bersifat toksisitas selektif ataupun nonselektif. Agen yang bersifat selektif dapat mengobati infeksi karena dapat membunuh mikroba secara *invivo*, tetapi tidak menyebabkan kerusakan inang. Pemberian antimikroba akan memberikan efek mikrosida (mengikat target sel, namun tidak menyebabkan lisis), dan mikrobiostatik (menghambat sintesis protein dengan melakukan pengikatan pada ribosom) serta bakteriolisis.

3.3.2 Penggunaan antimikroba kimia secara eksternal

Pengendalian ini terbagi menjadi dua yaitu produk antimikroba untuk mengendalikan mikroba yang non patogen manusia dan produk antimikroba untuk mencegah mikroba yang patogen manusia.

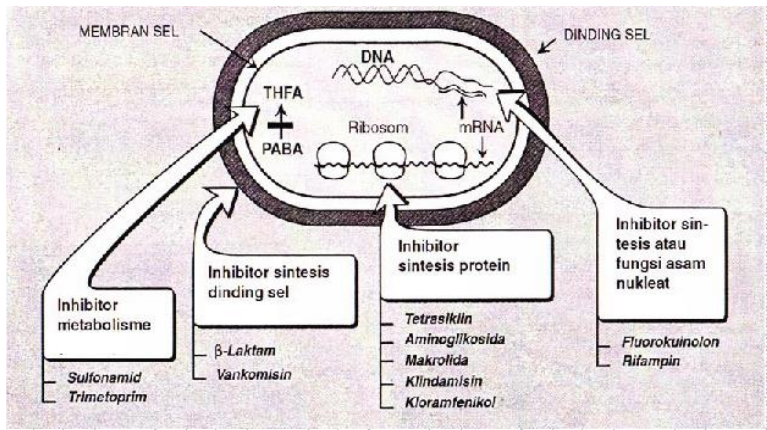
3.3.3 Agen antimikroba in vivo

Agen antimikroba yang sintetik ataupun alami dapat digunakan untuk pengobatan infeksi mikroba secara *in vivo*.

1. Obat antimikroba sintetik

Obat antimikroba dapat bekerja dengan berbagai cara (Gambar 3.6), diantaranya:

- a. Menghambat sintesis dinding sel bakteri, contoh golongan penisilin, sefalosporin, vancomycin
- b. Mengganggu sintesis protein, contohnya golongan makrolida, tetrasiklin, klindamisin, dan kloramfenikol
- c. Mengubah permeabilitas membran sel dan memiliki efek bakteriostatik dengan cara menghilangkan permeabilitas membran oleh karena hilangnya substansi seluler sehingga menyebabkan sel menjadi lisis, contohnya polimiksin, nistatin
- d. Menghambat sintesa folat, contohnya obat-obatan seperti sulfonamida dan trimethoprim
- e. Mengganggu sintesis DNA



Gambar 3.6. Mekanisme kerja antibiotik

2. Antibiotik alami

Banyak antibiotik yang merupakan bioaktif alami dan ditemukan di alam, karena dihasilkan oleh jamur ataupun bakteriyang dapat melawan mikroba lainnya, baik dengan cara menghambat pertumbuhan ataupun dengan cara mematikan pertumbuhan mikroba target. Sensitivitas mikroba terhadap antibiotik sangat bervariasi, meskipun sifat antibiotik tersebut adalah spektrum luas, namun kemampuannya sebagai antimikroba terhadap bakteri berbeda-beda, baik gram positif maupun gram negatif. Antibiotik yang mempunyai sifat spektrum sempit digunakan untuk mengendalikan mikroba yang tidak sensitif terhadap antibiotik tertentu, contohnya vankomisin. Vankomisin adalah golongan antibiotik yang berspektrum sempit dan sangat sensitif (bersifat bakterisidal) terhadap gram positif yang telah resisten terhadap *Staphylococcus*, *Bacillus* dan *Clostridium*.

Ada beberapa hal yang dapat memengaruhi kerja antimikroba, diantaranya:

1. Konsentrasi dan jenis bahan kimia.

Semakin tinggi konsentrasi antimikroba, maka aktivitasnya sebagai mikroba akan semakin cepat. Namun, tiap antimikroba memiliki batasan konsentrasi yang aman.

Sebagai contoh pemakaian alkohol 70% lebih baik dibandingkan alkohol 100% meskipun konsentrasinya lebih besar. Hal ini dikarenakan alkohol 100% akan lebih cepat menguap daripada konsentrasi rendah, sehingga tidak mencapai sitoplasma.

2. Intensitas dan sifat agen fisiknya.

Contoh: intensitas radiasi yang tinggi, akan semakin cepat terbunuhnya mikroba.

3. Wakt/durasi.

Mikroba yang terpapar oleh antimikroba, tidak secara langsung akan mengalami kematian secara serempak, sehingga semakin lama durasi kontak mikroba dengan antimikroba, maka akan semakin banyak mikroba yang terbunuh.

4. Suhu.

Peningkatan suhu akan menyebabkan semakin banyak mikroba yang terbunuh.

5. Jumlah Mikroorganisme.

Jumlah mikroba sangat berpengaruh besar dalam proses menghilangkannya, semakin besar populasi mikroba, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk membunuh mikroba tersebut.

6. Jenis Mikroorganisme.

Setiap mikroba memiliki kepekaan yang berbeda terhadap agen antimikroba. Pada mikroba, spora bakteri merupakan bagian paling resisten terhadap antimikroba dibandingkan sel vegetatif.

7. Sifat media pertumbuhan mikroba baik secara fisika maupun kimia.

3.3.4 Antibiotik dari Prokaryotik

Beberapa antibiotik yang sensitif terhadap bakteri, juga dihasilkan oleh bakteri jenis lain, contoh bakteriosin, aminoglikosida, makrolida dan tetrasiklin. Aminoglikosida adalah antibiotik yang dapat menghambat pertumbuhan gram positif bakteri. Aminoglikosida bekerja dengan cara menghambat proses pembentukan sintesis protein pada subunit 30S. Contoh

golongan amiglikolisida yaitu Streptomisin. Antibiotik golongan makrolida adalah antibiotik yang juga dapat menghambat sintesis protein pada subunit 50S. Contoh makrolida yaitu Eritromisin, yang dihasilkan oleh *S. Erythreus*. Eritromisin merupakan antibiotik untuk terapi legionelosis, dan sering digunakan pada pasien yang alergi golongan penisillin atau beta laktam. Tetrasiklin, adalah antibiotik yang mempunyai spektrum luas dan dihasilkan oleh *Streptomyces*.

Selain antibiotik, prokaryotik terkadang juga menghasilkan antimikroba yang sifatnya dapat menekan pertumbuhan mikroba lain yang *closed related* atau berkerabat, disebut bakteriosin. Antimikroba ini sifatnya sebagai preservatif atau pengawet dan sering digunakan pada bahan makanan. Bakteri yang umumnya menghasilkan bakteriosin adalah golongan bakteri asam laktat.

3.3.5 Pengendalian Virus dan Eukariotik Patogen

Obat untuk menangani virus maupun eukaryotik seperti cendawan juga dapat memengaruhi sel inang. Oleh sebab itu, toksisitas selektif terhadap patogen eukaryotik merupakan hal yang sulit sehingga membutuhkan kemoterapi. Selain itu, upaya pengendalian virus dapat dilakukan melalui pengendalian replikasi virus, yaitu dengan pemberian interferon.

1. Virus

Upaya penanganan infeksi bakteri dengan menggunakan agn antibakteri telah dapat dilakukan, sedangkan pengendalian antivirus terhadap virus belum dapat dilakukan. Hal ini dikarenakan virus adalah partikel yang memanfaatkan inang seperti eukarotik untuk bermetabolisme. Obat untuk menangani infeksi virus seperti kemoterapi sebagian besar toksik terhadap inang.

2. Antifungi

Sama halnya seperti virus, pemberian kemoterapi oleh infeksi cendawan juga dapat mengganggu lintasan metabolisme sel inang. Oleh sebab itu, umumnya obat antifungi seringkali diberikan dengan cara topikal atau permukaan.

3.3.6 Resistensi obat antimikroba dan pencarian obat baru

Resistensi terhadap antimikroba merupakan masalah besar karena berkaitan dengan patogenisitas bakteri patogen yang akhirnya akan berpengaruh terhadap pelayanan kesehatan.

1. Resistensi obat antimikroba

Resistensi terhadap antimikroba adalah karakter yang diperoleh oleh mikroba untuk menetralkan agen kemoterapeutik yang bersifat racun. Kasus resistensi tidaklah melibatkan inang, tetapi hanya berkaitan dengan mikroba penginfeksi. Antibiotik merupakan senyawa yang dihasilkan oleh mikroba, sehingga mikroba yang menghasilkan antibiotik tersebut akan membentuk mekanisme resistensi agar dapat merusak atau menetralkan antibiotik itu sendiri.

2. Pencarian obat antimikroba baru

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa pemakaian antibiotik dalam jangka waktu yang lama, dapat menyebabkan terjadinya resistensi antibiotik. Oleh sebab itu, diperlukan eksplorasi obat baru yang analog (baik struktur maupun fungsinya) dengan antibiotik sebelumnya. Pemakaian antibiotik baru diharapkan dapat lebih potensial dibandingkan antibiotik yang lama. Selain itu, dikarenakan resistensi berkembang pada pengenalan struktur, maka obat antibiotik baru belum dikenali oleh faktor resistensi.

DAFTAR PUSTAKA

- Arwiyanto, T. 2014. Biological control of plant disease caused by bacteria. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 18(1), 1-12.
- Cairo, J., Gherman, I., Day, A., & Cook, P. E. 2022. *Bacillus cytotoxicus*—A potentially virulent food-associated microbe. *Journal of Applied Microbiology*, 132(1), 31–40. <https://doi.org/10.1111/JAM.15214>
- Jordan, K., Dalmasso, M., Zentek, J., Mader, A., Bruggeman, G., Wallace, J., De Medici, D., Fiore, A., Prukner-Radovic, E., Lukac, M., Axelsson, L., Holck, A., Ingmer, H., & Malakauskas, M. 2014. Microbes versus microbes: control of pathogens in the food chain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(15), 3079–3089. <https://doi.org/10.1002/JSFA.6735>
- Nopitasari, W., Anggraini, M., & Advinda, L. 2021. Pengendalian Cemaran Mikroba Pada Susu. In *Prosiding Seminar Nasional Biologi* (Vol. 1, No. 2, pp. 907-917).
- Pratiwi, R. H. 2017. Mekanisme pertahanan bakteri patogen terhadap antibiotik. *Jurnal pro-life*, 4(3), 418-429.
- WHO. 2022. 'Report by the Director-General', in *European Centre for Disease Prevention and Control*, pp. 1–7. Available at: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB150/B150_12-en.pdf.

BAB 4

PARASIT PADA KASUS KEBIDANAN

Oleh Rafika

4.1 Pendahuluan

Permasalahan kesehatan ibu dan anak di Indonesia masih memerlukan perhatian yang serius. Sebab, persoalan ini berdampak besar terhadap pembangunan bidang kesehatan dan peningkatan kualitas sumber daya manusia (Melani and Nurwahyuni, 2022). Indikator tingkat kesehatan masyarakat dapat dilihat angka mortalitas ibu dan bayi. Semakin tinggi angka mortalitas ibu dan anak di suatu negara, maka semakin dipastikan status kesehatan negara tersebut buruk (Kemenkes RI, 2018). Selain kematian ibu dan bayi, permasalahan kesehatan terjadi pada kelompok sasaran anak-anak, remaja, pasangan usia subur dan lansia. Salah satu faktor penyebab permasalahan kesehatan tersebut adalah penyakit infeksi.

Penyakit infeksi disebabkan oleh patogen parasit, masih menjadi masalah kesehatan global di Indonesia. Penyakit ini tergolong penyakit tropis terabaikan, yaitu kelompok penyakit yang masih banyak ditemui di masyarakat namun keberadaannya sering diabaikan (Annisa, Dalilah and Anwar, 2018). Studi tersebut menemukan 42,83% yakni anak usia 12 - 59 bulan meninggal karena infeksi parasit (Melani and Nurwahyuni, 2022). Menurut WHO, peta jalan penyakit tropis terabaikan tahun 2021 agar dapat mengeleminasi filariasis pada tahun 2030. Saat ini, 1,3 miliar orang lebih dari 83 negara di dunia berisiko terkena filariasis atau penyakit kaki gajah, dengan 60% kasus terjadi di Asia Tenggara. Di Indonesia, terdapat 236 kabupaten/kota yang endemis filariasis. Total kasus filariasis kronis yang dilaporkan pada tahun 2021 sebanyak 9.354 kasus. Jumlah ini tampak mengalami penurunan dibandingkan data tahun sebelumnya karena dilaporkan adanya beberapa kematian dan perubahan diagnosis setelah verifikasi data kasus klinis kronis yang

dilaporkan pada tahun sebelumnya (Kementerian Kesehatan RI, 2022).

Patogen parasit merupakan binatang membutuhkan organisme lain sebagai habitat hidupnya. Parasit ini mengambil nutrisi dari inang tersebut dan tidak memberikan manfaat pada inangnya. Parasit bisa mengakibatkan berbagai penyakit pada inangnya. Beberapa hasil penelitian melaporkan bahwa infeksi parasit dapat menyebabkan penyakit pada kasus kebidanan terdiri dari penyakit kecacingan, filariasis, amoebiasis, trikomoniasis, malaria dan toxoplasmosis. Parasit melakukan infeksi berbagai cara penularan melalui mulut makanan dan minuman yang terkontaminasi telur atau larva parasit, kontak langsung dengan individu yang terinfeksi, atau melalui gigitan serangga vector (Rafika, 2020).

Parasit yang hidup pada manusia atau berhubungan pada kasus kebidanan terdiri dari hewan *Helminth* dan Protozoa. *Helminth* memiliki filum *Nemathelminthes* dan kelas Nematoda. Parasit protozoa terdiri dari kelas Rhizopoda, Mastigophora, Ciliata, Sporozoa.

4.2 Nematoda

Nematoda memiliki morfologi cacing dewasa berbentuk bulat atau selubung memanjang atau penamaan lain cacing gilik. Cacing ini memiliki jenis kelamin terpisah terdiri dari cacing jantan dan cacing betina. Berdasarkan ukuran, cacing betina lebih besar dibandingkan cacing jantan. Struktur kulit luar memiliki kutikula licin terkadang ada garis, tanpa segmen dan berwarna. Cacing ini mempunyai rongga tubuh dan anus, namun tidak terdapat sistem peredaran darah dan jantung.

Nematoda memperoleh makanan dengan berbagai cara. Cara memperoleh makanan antara lain dengan melukai dan kemudian mengisap darah yang keluar (misal cacing tambang, *Strongyloides stercoralis*), mengabsorpsi jaringan rusak termasuk darah (*Trichuris trichiura*), menyerap isi usus yang berupa sari makanan (*Ascaris lumbricoides*), atau mengabsorpsi cairan tubuh (filaria dan larva nematoda) (Dosen Teknologi Laboratorium Medik, 2020).

Nematoda berdasarkan habitat dalam tubuh manusia terbagi dua kelompok yaitu nematoda usus dan nematoda jaringan.. Nematoda usus terdapat dua kelompok yaitu cacing *Soil Transmittes Helmiths (STH)* dan *Non Soil Transmittes Helmiths (Non-STH)*.

4.2.1 Nematoda Usus

Nematoda usus merupakan spesies cacing yang hidup menjadi dewasa di dalam usus manusia.. Infeksi cacing perlu diperhatikan karena pada kelompok individu seperti ibu hamil, ibu menyusui, dan anak-anak. Patogen infeksi ini dapat menyebabkan kekurangan gizi, anemia, dan bahkan dapat berujung fatal (Lalangpuling, Pinontoan and Masa, 2022). Nematoda usus *Soil Transmittes Helmiths (STH)* merupakan cacing yang memiliki perantaraan penularan melalui lingkungan tanah sebagai media perkembangan bentuk telur menjadi telur infektif berisi larva atau perkembangan larva non infektif menjadi larva infektif . Cacing ini mempunyai prevalensi tinggi sering menginfeksi anak-anak dan juga ibu hamil. Contoh cacing ini antara lain *Ascaris lumbricoides* dan *Trichuris trichiura*. Sedangkan nematoda usus *Non Soil Transmittes Helmiths (Non-STH)* merupakan cacing tidak membutuhkan lingkungan tanah pada daur hidupnya. Cacing ini banyak juga menginfeksi anak-anak termasuk orang dewasa, contoh *Enterobius vermicularis* . Nematoda usus yang menginfeksi manusia. Yaitu :

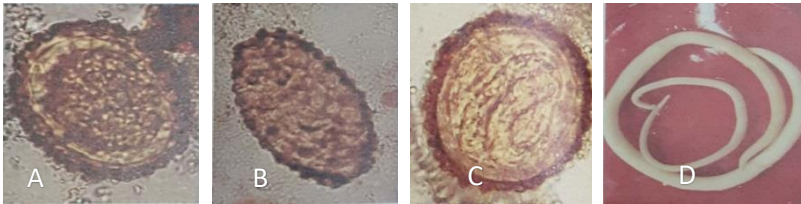
1. *Ascaris lumbricoides*

Askariasis adalah nama penyakit yang ditularkan oleh cacing *Ascaris lumbricoides*. Distribusi geografi bersifat kosmopolitan, terutama pada daerah tropis . Cacing *Ascaris lumbricoides* atau biasa disebut pula cacing gelang. Cacing dewasa mempunyai morfologi tubuh berbentuk silindris. Cacing jantan berukuran sebesar panjang 150-200 mm x lebar 2-4 mm, sedangkan cacing betina sebesar panjang 200-350 mm x lebar 4-6 mm. Cacing ini memiliki warna badan coklat kekuningan dan kulit halus. Cacing jantan memiliki ekor berbentuk melengkung ke arah bagian perut dan terdapat 2 spekulum ukuran panjang 2 mm, sedangkan cacing betina mempunyai ekor lurus. Alat kopulasi berupa

pada cacing betina betina terletak sekitar sepertiga dari bagian depan tubuhnya .

Morfologi telur *A. lumbricoides* bentuk oval sampai lonjong, dinding luar kortika atau bergerigi. Dinding sel terdiri dari lapisan luar *albuminoid* berwarna coklat dan lapisan dalam tebal, halus, tidak berwarna hingga kuning pucat ditutupi dengan hialin. Telurnya mengandung massa granular bulat dengan rongga udara di kutub berbentuk bulan sabit. Ada empat jenis telur yaitu: *fertil corticated* (dibuahi, berkortika); *fertil decorticated* (dibuahi, tanpa kortika); *unfertil corticated* (tidak dibuahi, berkortika); *unfertil decorticated* (tidak dibuahi, tanpa kortika).

Morfologi telur dan cacing *Ascaris lumbricoides* terlihat pada gambar berikut ini.



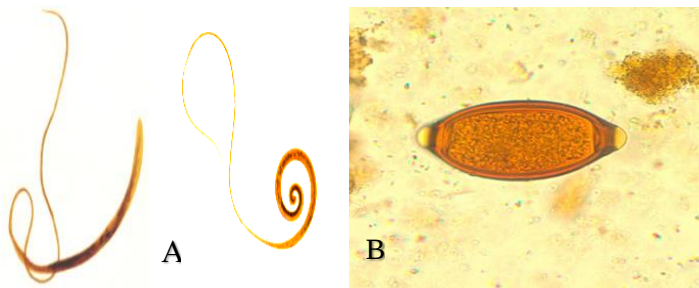
Gambar 4.1. Morfologi *Ascaris lumbricoides* A. telur fertile (dibuahi, berkortika), B. telur unfertil (tidak dibuahi, berkortika), C. telur berisi embrio atau telur infeksi, D. cacing dewasa (Prasetyo, 2003)

Siklus hidup cacing ini berawal telur bersama tinja dikeluarkan di tanah dan memerlukan pematangan di tanah lembab selama 20-24 hari pada suhu 25°-30°C. Parasit dewasa menetap di usus halus, cacing betina menghasilkan sekitar 200.000 telur per hari. Telur yang subur membutuhkan pematangan 18 hari hingga beberapa minggu di lingkungan lembab dan hangat. Setelah telur infeksiif masuk ke dalam mulut, kemudian larva menetas, dan menuju usus. Larva menyerang mukosa usus, dan melalui perjalanan ke jantung, paru-paru melalui sistem sirkulasi dalam 1-7 hari. Larva matang di paru-paru selama 10-14 hari, kembali ke saluran pencernaan, dan menjadi cacing dewasa dalam 2-3

bulan. Cacing dewasa dapat hidup antara 1 dan 2 tahun, menyelesaikan siklus hidup kompleksnya dalam tubuh hospes manusia (Rafika, 2020).

2. *Trichuris trichiura*

Cacing ini memiliki bentuk seperti cambuk, biasa disebut sebagai cacing cambuk. Penyakit yang disebabkan oleh cacing ini disebut trikuriasis (Rafika, 2020). Morfologi cacing dewasa biasanya menyerupai cambuk, dengan $3/5$ panjang tubuh bagian depan setipis cambuk dan $2/5$ bagian belakang lebih tebal seperti gagang cambuk. Panjang cacing jantan kurang lebih 4 cm dan panjang cacing betina kurang lebih 5 cm. Ekor cacing jantan melengkung ke arah perut dengan spikulum bulat yang berselubung. Badan ekor cacing betina berbentuk bulat, tumpul seperti koma (Sofia, 2018).



Gambar 4.2. Cacing dewasa (A) dan Telur cacing (B)
Trichuris trichiura (Rafika, 2020)

Bentuk telur dari cacing ini seperti tempayan atau tong dengan 2 tutup berbentuk operculum pada ujung, dan berukuran kurang lebih 50 x 22 mikron, kemudian telur akan menjadi matang masak di tanah dan infeksi (mengandung larva) setelah berumur 3 – 6 minggu. Tanah yang baik untuk perkembangan cacing ini, yaitu hangat dan basah.

Siklus hidup cacing ini adalah telur cacing dikeluarkan bersama tinja penderita dan menjadi infeksi setelah berkembang menjadi embrio cacing (stadium 2) dalam tanah

selama 3-5 minggu. Setelah tertelan melalui kontaminasi tanah, telur menetas dalam usus halus, mengeluarkan larva, dan matang menjadi cacing dewasa yang menetap di kolon. Cacing betina mulai bertelur 60-70 hari setelah infeksi, menghasilkan 3.000-20.000 telur per hari dalam sekum. Jangka hidup cacing dewasa sekitar 1 tahun, hidup di sekum dan kolon asenden dengan cara menancapkan bagian anteriornya ke dalam mukosa. Kontaminasi terjadi melalui tangan, makanan, atau vektor mekanik seperti lalat rumah.

3. *Enterobius vermicularis*

Cacing *Enterobius vermicularis* atau *Oxyuris vermicularis* disebut juga cacing kremi. Penyakit cacing ini disebut *Enterobiasis* atau *Oksiuriasis*. Habitat utama cacing ini adalah usus besar dan usus halus. Parasit ini mirip jarum berbentuk seperti kelapa parut, berukuran kecil, berwarna putih. Cacing jantan berukuran 2 sampai 5 mm, ekor berbentuk melingkar seperti tanda tanya dan ada spikulum. Panjang cacing betina berukuran 13 mm x 0,4 mm. Cacing betina mempunyai ekor yang panjang dan runcing. Cacing betina gravid dengan uterus membesar terisi telur. Cacing betina biasanya bertelur 11.000 hingga 15.000 telur pada malam hari dan berpindah ke daerah perianal untuk bertelur dengan cara mengontraksikan rahim dan vagina. Bagian kepala cacing ini terdapat sayap (*cervical alae*) di sekitar leher. Mulutnya tidak berlubang dan memiliki tiga bibir. *Bulbous esophagus* berbentuk ganda dan transparan.

Telur *Enterobius vermicularis* berbentuk lonjong, tetapi tampak asimetris (satu sisi cembung, sisi lainnya rata) dan ukuran telur 50 hingga 60 mikron. Dinding telur transparan dan cukup tebal, kulit halus tipis dan tampak seperti garis ganda. Telurnya mengandung massa granular berbentuk kecil teratur, atau telur berisi larva. Telur transparan tidak berwarna dan telur berbentuk infeksius termasuk telur berembrio berisi larva.



Gambar 4.3. Telur dan Cacing dewasa *Enterobius vermicularis*
<https://www.cdc.gov/dpdx/enterobiasis/>

Telur cacing ini mengalami pematangan dalam waktu 6 jam setelah dikeluarkan dari tubuh cacing dewasa. Telur tahan terhadap desinfektan dan udara dingin. Dalam kondisi lembab, telur mampu bertahan hingga 13 hari. Daur hidup parasit ini diawali dengan telur keluar di sekitar anus pada malam hari. Infeksi sendiri terjadi ketika telur berpindah dari tangan ke mulut setelah digaruk di sekitar anus. Penularan dari orang ke orang terjadi melalui bahan tidur yang terkontaminasi seperti selimut dan sarung bantal. Infeksi usus juga bisa terjadi karena lingkungan terkontaminasi telur serangga (misalnya karpet). Telur berukuran kecil dapat terbang di udara dan menginfeksi saluran pernapasan. Setelah telur yang terinfeksi tertelan, larva menetas dari telur di usus kecil, dan cacing dewasa menetap di usus besar. Jangka waktu mulai dari menelan sel telur yang terinfeksi hingga menjadi cacing dewasa betina bertelur adalah sekitar satu bulan. Cacing betina memiliki masa hidup sekitar 2 bulan. Kemudian cacing betina gravid berisi telur dan cacing ini berpindah ke bagian rectum pada malam hari dan cacing bertelur di kulit sekitar anus. Dalam kondisi optimal, telur berkembang menjadi larva dalam waktu 4-6 jam (telur tersebut menular). Infeksi balik atau larva baru yang kembali dari kulit anus ke rektum mungkin terjadi, namun frekuensinya sebagian besar tidak diketahui (Rafika, 2020).

Aspek klinik infeksi nematoda usus dapat menyebabkan dampak serius pada kesehatan, termasuk penurunan nafsu makan, gangguan penyerapan nutrisi, dan kerusakan mukosa usus. Pada anak-anak, infeksi ini dapat menyebabkan malnutrisi dan reaksi toksik, menyerupai gejala demam tifoid dengan tanda alergi. Cacing dewasa dapat menyebabkan konsekuensi mekanis seperti obstruksi usus dan migrasi ke organ lain, menghambat pernapasan, serta menimbulkan masalah seperti appendisitis, abses hati, obstruksi saluran empedu, dan pankreatitis akut (Sapada and Asmalinda, 2020). Selain itu, cacing dewasa juga dapat menyebabkan kerusakan mekanik pada mukosa kolon, memasukkan kepalanya ke dalam mukosa usus, menyebabkan perdarahan dan anemia. Infeksi yang berat dapat menunjukkan gejala diare, sindrom disentri, penurunan berat badan, dan prolapsus rektum pada anak-anak. (Rafika, 2020).

4.2.2 Nematoda Jaringan

Nematoda jaringan hidup sebagai parasit di dalam darah dan jaringan manusia, penyebab penyakit filariasis. Nematoda berhubungan dengan kasus kebidanan terdiri atas *Wuchereria bancrofti*, *Brugia malayi*, *Brugia timori*. Penyakit kaki gajah, umumnya terjadi di daerah tropis dan subtropics. Penyakit ini ditularkan melalui gigitan berbagai jenis nyamuk, termasuk *Culex*, *Aedes*, *Mansonia* dan *Anopheles* (Fitriyana, Sukendra and Windraswara, 2018). Ibu hamil termasuk kelompok berisiko tinggi tertular filariasis melalui gigitan nyamuk. Penelitian menunjukkan bahwa ibu hamil lebih disukai oleh nyamuk karena mengeluarkan 21% lebih banyak CO₂ dan memiliki suhu tubuh yang lebih tinggi. Pemberian obat *Diethyl Carbamazine Citrate* (DEC) pada ibu hamil di daerah endemis tidak disarankan karena berpotensi menyebabkan efek samping pada janin (Arfarisy, 2017).

1. *Wuchereria bancrofti*

Cacing dewasa hidup di dalam saluran dan kelenjar limfe. Cacing betina berukuran 80-100 x 0,24-0,3 mm dan jantan berukuran kira-kira 40 x 0,1 mm dan ekornya melengkung ke arah ventral, dengan 2 spikula dan memiliki

3 papil. Bentuk badan halus seperti benang dan warnanya putih susu. Cacing betina mengeluarkan mikrofilaria.

Morfologi mikrofilaria yang bersarung memiliki panjang 200 – 300 x 7 – 8 mikron. Mikrofilaria memiliki sarung (sheathed) kurang mengambil zat warna Giemsa. Lekukan badan halus, panjang kepala (cephalic space) sama dengan lebar kepala (1:1) kecil. Inti badan tersusun teratur dan kasar, ujung ekor tidak mempunyai inti tambahan (caudal nuclei) dengan ujung runcing.



Gambar 4.3. *Wucheria bancrofti* (Rafika, 2020)

Cacing filaria memerlukan waktu yang sangat lama untuk tumbuh dan berkembang. Proses pertumbuhan mikrofilaria di dalam nyamuk memakan waktu sekitar 2 minggu. Setelah terisap oleh nyamuk, mikrofilaria melepaskan sarungnya di lambung, menembus dinding lambung, dan menetap di antara otot-otot toraks. Mereka mengalami tiga stadium larva, masing-masing dengan pertukaran kulit. Larva stadium 3 sangat aktif, bermigrasi dari rongga abdomen ke kepala dan alat tusuk nyamuk. Saat nyamuk yang terinfeksi menggigit manusia, larva stadium 3 aktif masuk ke dalam tubuh hospes melalui luka tusukan dan menetap di saluran limfe setempat. Di dalam tubuh hospes, larva mengalami dua kali pergantian kulit, tumbuh menjadi larva stadium 4, dan akhirnya menjadi cacing dewasa.

Meskipun waktu pertumbuhannya belum pasti pada manusia, diperkirakan membutuhkan sekitar 7 bulan.

2. *Brugia malayi* dan *Brugia timori*

Cacing dewasa *Brugia malayi* dalam tubuh manusia terdapat dalam saluran dan kelenjar limfe. Cacing ini berbentuk seperti benang, bersarung dengan Giemsa berwarna jelas, lekukan badan tidak teratur dan terpilin. Ukuran cacing betina dewasa 55 x 0,16 mm dan jantan dewasa 22 x 0,09 mm. Sedangkan *Brugia timori*, cacing betina berukuran (21-39 mm x 0,1 mm dan jantan dewasa 13-23 mm x 0,08 mm, ekor melingkar dengan papil 3-4 papil. Di belakang anus ada 1 papil, ujung ekor 4-6 papil kecil dan 2 spikula dengan panjang tidak sama.



Gambar 4.5. *Brugia malayi* dan *Brugia timori* (Rafika, 2020)

Siklus hidup berawal vector nyamuk *Mansonia* dan *Anopheles* yang membawa *B. malayi* dan *B. timori*. Nyamuk yang terinfeksi menyuntikkan larva stadium tiga (L3) ke dalam kulit manusia saat mengisap darah, larva ini berkembang menjadi cacing dewasa di kelenjar limfatik. Cacing dewasa menghasilkan mikrofilaria yang berpindah ke sirkulasi darah perifer. Nyamuk mengonsumsi mikrofilaria saat mengisap darah, dan setelah masuk ke tubuh nyamuk, mikrofilaria melalui perjalanan kompleks ke otot toraks. Di sana, mikrofilaria berkembang menjadi larva stadium 1 (L-1), lalu menjadi larva stadium 2 (L3). Larva ini kemudian bermigrasi ke kepala nyamuk dan dapat menyebabkan infeksi saat nyamuk menggigit orang lain.

Aspek klinis Filariasis merupakan penyakit yang membebani penderitanya baik secara fisik maupun mental. Dampak fisiknya berupa cacat yang mengganggu penampilan dan aktivitas fisik, menurunkan produktivitas karena kesulitan bergerak akibat pembesaran tungkai dan skrotum. Penyakit ini bersifat kronis, dan tanpa pengobatan, dapat menyebabkan cacat permanen berupa pembesaran kaki, alat kelamin pada perempuan dan laki-laki. Filariasis yang disebabkan oleh *Wuchereria bancrofti* menyerang lengan, tungkai, payudara, buah zakar, atau vulva. Stadium akut ditandai dengan serangan demam dan peradangan saluran limfe yang berulang kali (Syuhada, Nurjazuli and Wahyuningsih, 2012). Sebaliknya, pada filariasis jenis *Brugia malayi*, Limfadenitis pada *Brugia malayi* dapat menjalar ke bawah (limfangitis retrograd) dan dapat berkembang menjadi ulkus, meninggalkan jaringan parut yang khas. Elefantiasis pada *Brugiasis malayi* hanya mempengaruhi tungkai bawah di bawah lutut dan kadang-kadang pada lengan bawah di bawah siku (Agustini and Indrawati, 2020).

4.3 Protozoa

Infeksi parasit protozoa dapat terjadi pada semua umur, mengakibatkan gangguan reproduksi, gangguan pencernaan dan gangguan fungsi tubuh. Protozoa yang berhubungan dengan kesehatan kasus kebidanan mencakup *Entamoeba histolytica*, *Plasmodium sp.*, *Toxoplasma gondi* dan *Trichomonas vaginalis*.

1. *Plasmodium sp.*

Plasmodium sp. merupakan parasit penyebab penyakit Malaria. Penyakit ini kebanyakan daerah tropis. Spesies *Pasmodium sp.* antara lain *Plasmodium falciparum*, *Plasmodium vivax*, *Plasmodium malariae*, *Plasmodium ovale*, dan *Plasmodium knowlesi*. Penyakit ini ditularkan melalui vektor gigitan nyamuk betina disebut *Anopheles sp.* Prevalensi kasus malaria diperkirakan 219 juta orang di seluruh dunia, dan kasus kematian 660.000 setiap tahun. Infeksi parasit ini bisa terkena siapa saja, tidak memandang usia atau jenis kelamin, termasuk ibu hamil. Malaria ada ibu

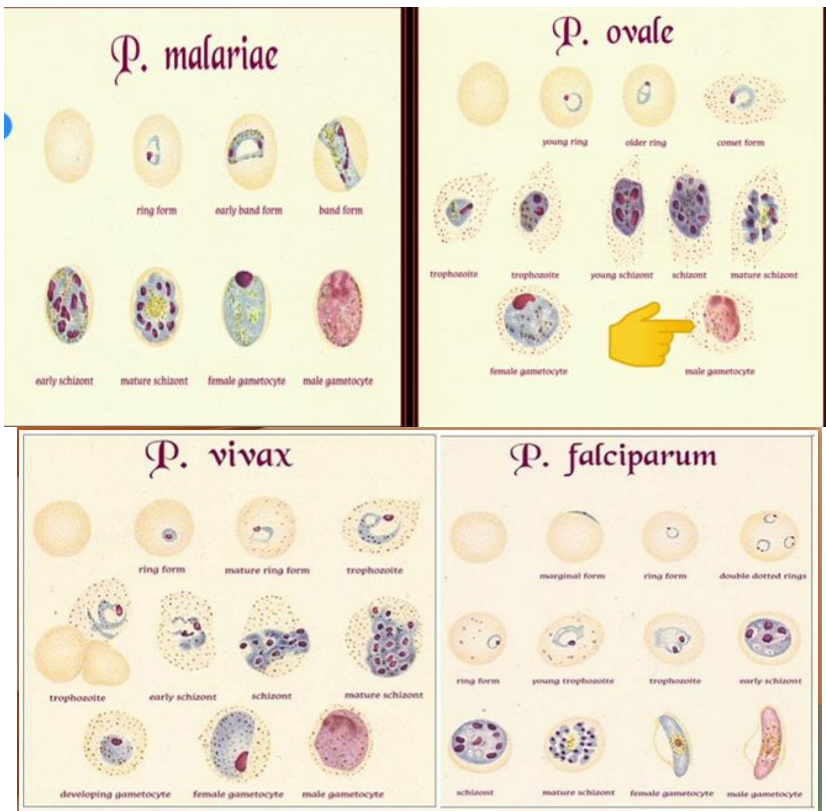
hamil bisa terjadi karena ibu hamil memiliki daya tahan tubuh menurun saat hamil, dapat menyebabkan beragam kondisi tidak sehat pada ibu hamil dan janinnya. Selain itu dapat pula menyebabkan demam, anemia, hipoglikemia, edema paru akut, gagal ginjal, bahkan kematian. Janin yang terinfeksi malaria dalam kandungan ibu dapat berisiko mengalami keguguran, lahir mati, lahir prematur, berat badan lahir rendah, dan kematian janin. Kondisi patologis ini ditimbulkan sangat bergantung pada kondisi imun ibu selama kehamilan, paritas, dan usia (Rusjdi, 2012).

Morfologi parasit *Plasmodium sp.* memiliki perbedaan pada setiap spesies. Namun secara umum parasit ini memiliki inti atau kromatin bulat berwarna merah dan sitoplasma berbentuk cincin sampai tidak beraturan, dominan berwarna biru. Dalam perkembangannya di dalam tubuh manusia, parasit melalui tiga stadium utama terdiri dari trofozoit, skizon, dan gametosit. Stadium trofozoit terbagi stadium trofozoit muda dan trofozoit dewasa, sering disebut sebagai stadium cincin. Umumnya terbentuk dalam berbagai ukuran pada setiap spesies. Pigmen dalam sitoplasmanya bervariasi dari kuning pucat hingga coklat kehitaman atau hitam. Stadium skizon menunjukkan inti membelah sehingga terbentuk merozoit secara aseksual tanpa melibatkan sel kelamin jantan dan betina. Stadium perkembangan berikutnya adalah stadium gametosit adalah stadium seksual yang berkembang lebih lanjut dengan bentuk bulat dan ada juga mirip pisang atau ginjal pada setiap spesies. Stadium ini warna sitoplasma digunakan untuk membedakan sel kelamin jantan (mikrogametosit) dan betina (makrogametosit) serta gambaran inti sel.

Siklus hidup *Plasmodium sp.*, gametosit dalam pembuluh darah yang ikut terserap oleh gigitan nyamuk akan berembang menjadi mikrogametosit dan makrogametosit dalam tubuh nyamuk. Gametosit terjadi fertilisasi menghasilkan zigot yang akan berkembang menjadi ookinet, selanjutnya menjadi ookista yang mengandung sporozoit. Ookista pecah sehingga sporozoit keluar dan menuju kelenjar

liur nyamuk. Sporozoit ikut dikeluarkan pada saat nyamuk menggigit manusia.

Di dalam tubuh manusia, bentuk trofozoit merupakan salah satu bentuk yang dapat diamati pada sel eritrosit penderita malaria. Bentuk trofozoit berkembang menjadi schizont, dan menjadi bentuk gametosit jantan dan betina. Pada saat orang tersebut digigit oleh nyamuk, bentuk gametosit akan ikut terisap, dan masuk ke dalam tubuh nyamuk. Gametosit jantan dan betina mengalami kopulasi dan menghasilkan zigot, yang disebut ookinet. Ookinet akan menghasilkan sporozoit yang tersebar pada seluruh tubuh nyamuk. Penyebaran penyakit malaria akan berulang melalui gigitan nyamuk yang mengandung sporozit (Prawansa and Dewi, 2018).



Gambar 4.6. Morfologi spesies *Plasmodium*

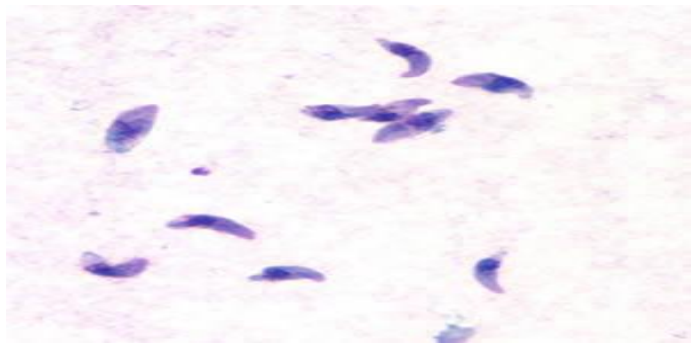
<https://www.kibrispdr.org/detail-1/gambar-plasmodium-vivax.html>

Manifestasi klinis malaria pada kehamilan sering menyebabkan komplikasi serius di daerah endemis. Infeksi malaria pada ibu hamil dapat mengakibatkan anemia yang parah dan melibatkan komplikasi pada janin, termasuk berat badan lahir rendah, retardasi pertumbuhan intrauterin, lahir mati, dan abortus. Terjadinya anemia pada ibu hamil yang terinfeksi malaria diperparah oleh cytoadherence sel darah merah terinfeksi di endotel plasenta. Selain itu, *cytoadherence* menyebabkan kerusakan pada pembuluh darah kapiler dan pembentukan sekuestrasi dan rosetting, menyebabkan edema dan hipoksia. Sekuestrasi eritrosit terinfeksi *Plasmodium* dalam intervillous plasenta menghambat suplai nutrisi dan oksigen ke janin, menyebabkan berat badan lahir rendah, retardasi pertumbuhan intrauterin, dan lahir mati. Tingginya kadar IL-10 dalam plasenta juga terkait dengan bayi lahir prematur. Aborsi spontan dikaitkan dengan tingginya kadar sitokin Th1 seperti TNF- α , yang dapat menyebabkan nekrosis pada janin dan meningkatkan risiko kontraksi rahim, mengakibatkan aborsi. IFN- γ juga dapat menginduksi dan mengaktifkan sel natural killer yang ditemukan pada perempuan yang mengalami aborsi (Hutagalung, 2022); (Rahmah, 2017).

2. *Toxoplasma gondi*

Toxoplasmosis merupakan penyakit infeksi yang disebabkan oleh protozoa *Toxoplasma gondii* yang tersebar luas di seluruh dunia. Diperkirakan sepertiga populasi penduduk dunia baik laki-laki maupun wanita pernah terinfeksi *T. gondii* dan tidak menunjukkan gejala terinfeksi. Toxoplasmosis pada awal kehamilan sekitar 15% menyebabkan abortus, kelahiran dini sebesar 62% pada trimester ketiga. Di Indonesia, prevalensi toxoplasmosis di beberapa daerah pada tahun 2014 bervariasi antara 2-51% berkisar antara 43 (88%) kasus (Harahap and Hasibuan, 2021).

Parasit ini menginfeksi pada manusia berasal dari sumber penulara berupa hewan seperti anjing, kucing, dan burung, babi dan kambing. Bentuk parasit ini terlokalisasi di vakuola jaringan sitoplasma di dalam sel. Dan bentuk trofozoitnya menyerupai bulan sabit. Panjang 3,5-6 mikron, lebar 1,5-3 mikron. Salah satu ujungnya lebih tumpul dibandingkan ujung lainnya. Pada pewarnaan Giemsa, sitoplasma berwarna biru dengan inti bulat atau oval kemerahan di dekat ujung tumpul.



Gambar 4.7. Tachyzoites *Toxoplasma gondii*
<https://www.cdc.gov/dpdx/toxoplasmosis/index.html>

Parasit ini memiliki tiga siklus hidup perkembangan, yaitu zoite, kista, dan ookista, dengan sporozoit, kistozit, dan endozit sebagai bentuk infeksiusnya. Cara infeksiusnya tidak melalui vektor tetapi mulut, transplantasi, transfusi, atau dengan kista. Tahapan Gametosit Enteroiptelial merupakan fase kunci dalam siklus hidupnya. Dimulai dari kista yang menginfeksi sel eritrosit kucing, menghasilkan makrogametosit dan mikrogametosit yang membentuk zygot menjadi ookista. Ookista dikeluarkan bersama feses kucing, mengalami meiosis, dan menghasilkan trofozoit infeksius yang tahan lama. Reproduksi aseksual dimulai ketika feses kucing dengan ookista ditelan oleh hospes kedua seperti tikus, menyebabkan infeksi akut dengan diferensiasi sporozoit menjadi takizoit. Selama infeksi kronik, takizoit berubah menjadi bradizoit, beradaptasi di lingkungan internal hospes.

Infeksi laten terjadi saat bradizoit berada di jaringan, terutama otot dan otak, dan kista sulit dimusnahkan karena berada di dalam sel hospes. Toksoplasmosis manifestasi klinis terutama bayi dan anak-anak dapat berupa subakut ensefalomielitis dan khoriooretinitis, sedangkan pada orang dewasa dan tua berupa deman akut (Prawansa and Dewi, 2018).

Aspek klinis Toksoplasmosis seringkali menimbulkan dampak serius pada bayi dan janin ibu hamil. Sekitar 35% ibu hamil di Indonesia terkena toksoplasmosis pada tahun 2007, meningkat menjadi 47% pada 2008. Infeksi kongenital mencapai sekitar 40% pada wanita hamil. Jika *Toxoplasma gondii* menyerang janin melalui plasenta, bisa menyebabkan plasentitis dan kerusakan pada mata serta otak. Infeksi pada trimester pertama dapat menghasilkan 17% janin yang lahir dengan cacat serius. Infeksi pada trimester ketiga tanpa pengobatan dapat menyebabkan 62% janin terinfeksi, seringkali tanpa gejala lahir, tetapi menyebabkan masalah perkembangan. Toksoplasmosis kongenital pada bayi dapat menimbulkan berbagai komplikasi, termasuk gangguan penglihatan, pendengaran, pertumbuhan, dan kecerdasan. Lebih dari 80% bayi yang terinfeksi intrauterin dapat mengalami dampak jangka panjang seperti gangguan penglihatan, pendengaran, perkembangan, dan IQ yang rendah saat masa anak-anak (Afrianti, 2023).

3. *Trichomonas vaginalis*

Trichomonas vaginalis, parasit penyebab trikomoniasis vaginalis, menyerang organ genitourinaria. Meskipun ada tiga spesies dalam genus *Trichomonas*, hanya *T. vaginalis* yang bersifat patogen. Infeksi lebih umum pada wanita (25%), terutama yang kebersihannya buruk, namun hanya 1/7 yang menunjukkan gejala.

Morfologi *T. vaginalis* memiliki bentuk seperti buah pir dengan empat flagel menonjol dari depan ke belakang dan flagel kelima, aksostil. Aksostil melekat pada jaringan hospes, menyebabkan iritasi dan peradangan. Ukuran sekitar 20

mikrometer, terlihat dengan pergerakan jungkir balik dan tersentak di sediaan basah secret vagian. Bersifat anaerobik, *T. vaginalis* hidup baik tanpa oksigen pada pH 6.0. Reproduksi *T. vaginalis* melalui pembelahan biner tanpa membentuk kista. Infeksi trichomonas dapat meningkatkan penyebaran infeksi HIV dan menimbulkan respon imun selular dengan inflamasi pada epitel vagina, serviks wanita, dan uretra pria.



Gambar 4.8. Trofozoit *Trichomonas vaginalis*
<https://www.cdc.gov/dpdx/trichomoniasis/index>

Siklus hidup *Trichomonas vaginalis* dimulai saat parasit berbentuk trofozoit, yang menyerupai buah pir dengan empat flagel menonjol dan aksostil di bagian belakang, melekat pada jaringan hospes. Trofozoit berkembang biak melalui pembelahan biner tanpa membentuk kista. Siklus hidupnya bersifat monomorfik, yang berarti hanya terdapat dalam bentuk trofozoit tanpa fase kista. Parasit ini bersifat anaerobik dan dapat hidup baik tanpa oksigen pada lingkungan dengan pH sekitar 6. *Trichomonas vaginalis* menginfeksi manusia melalui kontak seksual dan menetap di saluran reproduksi manusia, terutama pada wanita. Selama infeksi, trofozoit dapat menyebabkan iritasi dan peradangan pada epitel vagina dan serviks wanita, serta uretra pada pria (Prawansa and Dewi, 2018).

Aspek klinis Trichomoniasis menimbulkan peradangan lokal karena respons sistem kekebalan tubuh terhadap penempelan parasit pada jaringan mukosa. Manifestasi klinis

trichomoniasis melibatkan gejala seperti sulit buang air kecil (disuria), rasa gatal, dan keluarnya cairan vagina berwarna kuning atau hijau yang berbusa. Penyakit ini terkait dengan risiko persalinan prematur dan masalah kesehatan perinatal lainnya, seperti ketuban pecah dini dan bayi dengan berat badan lebih kecil dari normal untuk usia kehamilan yang bersangkutan (Satria and Susilawati, 2021).

Pada wanita, penyakit trikomoniasis menyebabkan peradangan terutama di vagina, menyebabkan kelainan klinis berupa keluarnya cairan vagina yang tebal, berbau tidak sedap, berwarna kuning, yang mungkin disertai nyeri perut dan disuria. Trikomoniasis pada wanita hamil dapat menyebabkan komplikasi dalam kehamilan, seperti pecahnya membran janin (kelahiran prematur), persalinan prematur, dan bayi dengan berat badan rendah (Achdiat *et al.*, 2019).

DAFTAR PUSTAKA

- Achdiat, P. A. *et al.* (2019) 'Prevalence of Trichomoniasis in Asymptomatic Pregnant Women Population in Bandung, West Java, Indonesia', *Indones J Trop Infect Dis*, 7(4), p. 57.
- Afrianti, D. (2023) 'The Incidence of Toxoplasmosis Disease on Pregnant Women Raise Cats and Not Raise Cats in Tlogosari Wetan Health Center Semarang City', *Jaringan Laboratorium Medis*, 5(1), pp. 49–52.
- Agustini, A. and Indrawati, F. (2020) 'Program Pemberian Obat Pencegahan Massal (POPM) Filariasis', *HIGEIA (Journal of Public Health Research and Development)*, 4(3), pp. 423–434.
- Annisa, S., Dalilah, D. and Anwar, C. (2018) 'Hubungan Infeksi Cacing Soil Transmitted Helminths (STH) dengan Status Gizi pada Siswa Sekolah Dasar Negeri 200 Kelurahan Kemasrindo Kecamatan Kertapati Kota Palembang', *Majalah Kedokteran Sriwijaya*, 50(2), pp. 92–104.
- Arfarisy, N. (2017) 'Potensi penularan filariasis pada ibu hamil di kecamatan muara pawan kabupaten ketapang provinsi kalimantan barat', *Jurnal Kesehatan Lingkungan Vol*, 9(2), pp. 217–222.
- Dosen Teknologi Laboratorium Medik (2020) *2020. Parasitologi Teknologi Laboratorium Medik*. Jakarta: EGC.
- Fitriyana, F., Sukendra, D. M. and Windraswara, R. (2018) 'Distribusi Spasial vektor potensial filariasis dan habitatnya di daerah endemis', *HIGEIA (Journal of Public Health Research and Development)*, 2(2), pp. 320–330.
- Harahap, M. and Hasibuan, D. A. (2021) 'Gambaran Pengetahuan Ibu Tentang Penyakit Toxoplasmosis Pada Ibu Hamil Di Desa Aek Raru Kecamatan Simangambat Kabupaten Padanglawas Utara Tahun 2021', *Jurnal Kebidanan Matorkis*, 3(1), pp. 17–23.
- Hutagalung, D. K. (2022) 'Potensi Daun Sirih Dan Daun Kelor Terhadap Mortalitas Larva Nyamuk Untuk Pencegahan Malaria Pada Ibu Hamil', *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 1(11), pp. 1543–1548.

- Kemenkes RI (2018) *Profil Kesehatan Indonesia Tahun 2017*.
- Kementerian Kesehatan RI (2022) 'Direktorat Pencegahan dan Pengendalian Penyakit Menular Kementerian Kesehatan', *the Acceptance of Islamic Hotel Concept in Malaysia: a Conceptual Paper*, 3(July), pp. 1–119. Available at: <http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article>.
- Lalangpuling, I. E., Pinontoan, S. P. M. and Masa, J. V. S. (2022) 'Gambaran Phbs Dan Identifikasi Telur Cacing Enterobius Vermicularis Pada Balita Di Desa Wori Kecamatan Wori Kabupaten Minahasa Utara', in *E-PROSIDING Seminar Nasional 2022* ISBN: 978.623. 93457.1. 6, pp. 544–557.
- Melani, N. and Nurwahyuni, A. (2022) 'Analisis Faktor Yang Berhubungan Dengan Demand Atas Pemanfaatan Penolong Persalinan Di Provinsi Banten: Analisis Data Susenas 2019', *Jurnal Inovasi Penelitian*, 2(10), pp. 3175–3184.
- Prasetyo, H. (2003) *Atlas Berwarna Helmintologi Kedokteran*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Prawansa, A. and Dewi, N. U. (2018) *Buku Ajar Parasitologi II*. Makassar: Pusat Pengembangan Pendidikan dan Kurikulum Poltekkes Kemenkes Makassar.
- Rafika (2020) *Buku Ajar Parasitologi I*. 1st edn. Edited by Rafika. Makassar: Pusat Pengembangan Pendidikan dan Kurikulum Poltekkes Kemenkes Makassar.
- Rahmah, Z. (2017) 'Malaria Pada Kehamilan Dan Konsekuensinya Pada Ibu Dan Janin', *Journal of Islamic Medicine*, 1(1), pp. 30–43.
- Rusjdi, S. R. (2012) 'Malaria pada masa kehamilan', *Majalah Kedokteran Andalas*, 36(2), pp. 173–178.
- Sapada, I. E. and Asmalinda, W. (2020) 'Jurnal Aisyah: Jurnal', *Jurnal Aisyah: Jurnal Ilmu Kesehatan*, 5(2), p. 206.
- Satria, Y. A. A. and Susilawati, T. N. (2021) 'Genital Tract Infection during Pregnancy and its Association with Preterm Delivery', *Indonesian Journal of Tropical and Infectious Disease*, 9(1), pp. 46–57.

- Sofia, R. (2018) 'Perbandingan Akurasi Pemeriksaan Metode Direct Slide Dengan Metode Kato-Katz Pada Infeksi Kecacingan', *AVERROUS: Jurnal Kedokteran dan Kesehatan Malikussaleh*, 3(1), pp. 99–111.
- Syuhada, Y., Nurjazuli, N. and Wahyuningsih, N. E. (2012) 'Studi kondisi lingkungan rumah dan perilaku masyarakat sebagai faktor risiko kejadian filariasis di Kecamatan Buaran dan Tirto Kabupaten Pekalongan', *Jurnal kesehatan lingkungan Indonesia*, 11(1), pp. 95–101.

BAB 5

DASAR VIROLOGI DAN MIKOLOGI

Oleh Sukma Restuning Pratiwi

5.1 Dasar Virologi

5.1.1 Pendahuluan

Penelitian terkait dengan benda-benda kecil telah dimulai sejak penemuan mikroskop oleh Antony Van Leeuwenhoek (1632-1723). Perkembangan alat ini kemudian memicu serangkaian penemuan penting di bidang biologi, salah satunya dalam penemuan virus. Virus merupakan organisme mikroskopis yang tersebar di berbagai ekosistem bumi dengan jumlah yang sangat besar serta memiliki peran penting dalam kehidupan di planet ini. Kata "virus" berasal dari Bahasa Latin "*virion*" yang berarti racun, dan untuk pertama kalinya digunakan dalam Bahasa Inggris pada tahun 1392. Meskipun definisi "agen penyebab infeksi penyakit" pertama kali dipakai pada tahun 1728, virus baru ditemukan oleh Dmitry Iwanovsky pada tahun 1892. Virus disebut sebagai makhluk hidup karena memiliki asam nukleat dan mampu bereproduksi saat berada pada sel inang (sebagai parasit obligat), namun juga dianggap sebagai makhluk tidak hidup karena kemampuannya untuk dikristalkan (Smith and Ritchie, 1980). Berikut adalah hasil penelitian dari para ahli seperti yang diuraikan dalam karya (Campbell *et al.*, 2008)

1. Adolf Mayer menemukan bahwa ia dapat mentransmisikan penyakit tersebut dari satu tanaman ke tanaman lain dengan mengoleskan getah yang diekstraksi dari daun yang sakit ke tanaman yang sehat. Meskipun ia tidak berhasil menemukan mikroba penginfeksi dalam getah tersebut, Mayer menyimpulkan bahwa penyakit mosaik tembakau disebabkan oleh bakteri yang sangat kecil sehingga tidak dapat terlihat dengan mikroskop.

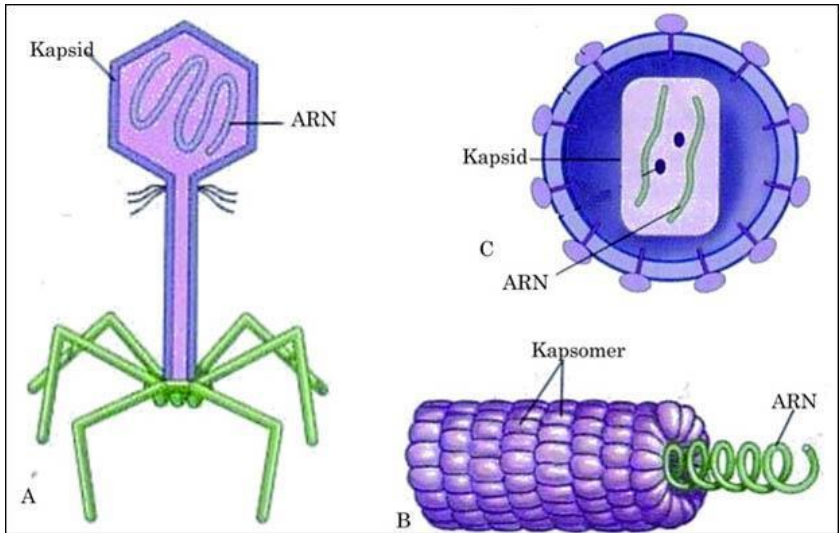
2. Dimitri Ivanowsky menyaring getah dari daun tembakau yang terinfeksi menggunakan filter yang dirancang untuk menahan bakteri. Meskipun telah disaring, getah masih menyebabkan penyakit mosaik.
3. Beijerinck menunjukkan bahwa agen penyakit mosaik tidak dapat dibiakkan pada medium nutrisi di dalam tabung reaksi atau cawan Petri, berbeda dengan bakteri yang biasa digunakan dalam laboratorium. Ia merupakan ilmuwan pertama yang mengemukakan konsep virus.
4. Wendell Stanley berhasil mengkristalkan partikel penyebab infeksi yang kini dikenal sebagai virus mosaik tembakau (TMV). Setelah itu, TMV dan berbagai jenis virus lain dapat terlihat secara jelas berkat bantuan mikroskop elektron.

5.1.2 Struktur Virus

Virus merupakan mikroorganisme yang hanya dapat terlihat menggunakan mikroskop elektron karena ukurannya sangat kecil, sekitar 20 nanometer. Strukturnya yang terbilang lebih sederhana dibandingkan mikroorganisme uniseluler lainnya, memungkinkan virus hanya mengandung satu jenis asam nukleat saja baik itu DNA maupun RNA. Virus kadangkala juga disebut sebagai makhluk peralihan antara makhluk tak hidup dan makhluk hidup dikarenakan sifat virus itu sendiri yang memungkinkan untuk dikristalkan. Selain itu virus juga tidak memiliki organel sel seperti ribosom, mitokondria, atau organel lainnya sehingga virus sepenuhnya bergantung pada inang selulernya untuk produksi energi dan sintesis protein.

Virus terdiri dari satu molekul asam nukleat yang dikelilingi oleh selubung protein yang disebut kapsid. Kapsid dan asam nukleat yang tertutup bersama-sama akan membentuk nukleokapsid. Sementara pada beberapa virus yang lebih kompleks, kapsidnya dikelilingi oleh selubung lipoprotein. Kapsid terdiri dari unit morfologi yang disebut kapsomer yang disatukan oleh ikatan non kovalen. Keseluruhan struktur virus mulai dari genom, kapsid, dan selubung akan membentuk partikel virus yang kemudian disebut sebagai virion. Bagian luar dari virion terdiri dari protein-protein yang berinteraksi dengan protein

tertentu pada permukaan sel tempat virus melakukan replikasi dengan menginfeksi sel inang (Wagner *et al.*, 2008).



Gambar 5.1. Struktur Virus

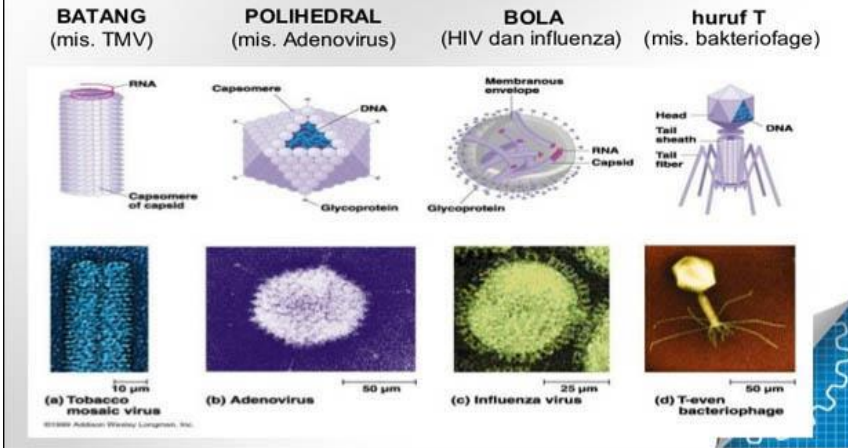
Sumber: <http://www.ebiologi.net/2016/03/struktur-tubuh-macam-macam-bentukvirus.html>

5.1.3 Morfologi Virus

Meskipun memiliki struktur tubuh yang sama, virus dapat memiliki beragam bentuk yang sangat bervariasi. Setidaknya ada lima macam bentuk tubuh virus yang telah diidentifikasi oleh para ilmuwan. Berikut adalah berbagai macam bentuk tubuh virus lengkap dengan contohnya (Dwi and Kurniati, 2018):

1. Bentuk tubuh bulat dimiliki oleh virus penyebab penyakit AIDS, ebola, dan influenza.
2. Bentuk tubuh oval dimiliki oleh virus penyebab penyakit rabies.
3. Bentuk tubuh batang dimiliki oleh virus TMV (*Tobacco Mosaic Virus*).
4. Bentuk tubuh polihedral dimiliki oleh virus Adenovirus yang menyebabkan demam.
5. Bentuk tubuh huruf T ditemukan pada bacteriophage, virus yang menyerang bakteri *E. coli*.

Ragam Bentuk Virus



Gambar 5.2. Bentuk Virus

Sumber :<http://www.ebiologi.net/2016/03/struktur-tubuh-macam-macam-bentukvirus.html>

Virus DNA memiliki asam nukleat DNA, sementara virus RNA memiliki asam nukleat RNA. Baik DNA maupun RNA virus dapat memiliki struktur rantai ganda atau tunggal. Virus dilapisi oleh lapisan pelindung yang disebut kapsid, terbentuk dari banyak subunit protein yang disebut kapsomer. Kapsid virus dapat memiliki bentuk batang, polihedral, atau struktur yang lebih kompleks. Kapsid yang paling kompleks banyak ditemukan pada virus yang menginfeksi bakteri, dikenal sebagai bakteriofag atau fag. Beberapa fag pertama yang dipelajari, seperti tujuh macam fag yang menginfeksi *E. coli*, diberi nama tipe 1 (T1), tipe 2 (T2), dan seterusnya sesuai urutan penemuan. Beberapa fag seperti T2, T4, dan T6 memiliki struktur yang mirip, dengan kepala icosahedral yang melindungi DNA. Di bagian kepala, terdapat seutas potongan ekor protein yang dilengkapi dengan serat-serat yang digunakan fag untuk melekat pada bakteri (Campbell *et al.*, 2008).

5.1.4 Reproduksi Virus

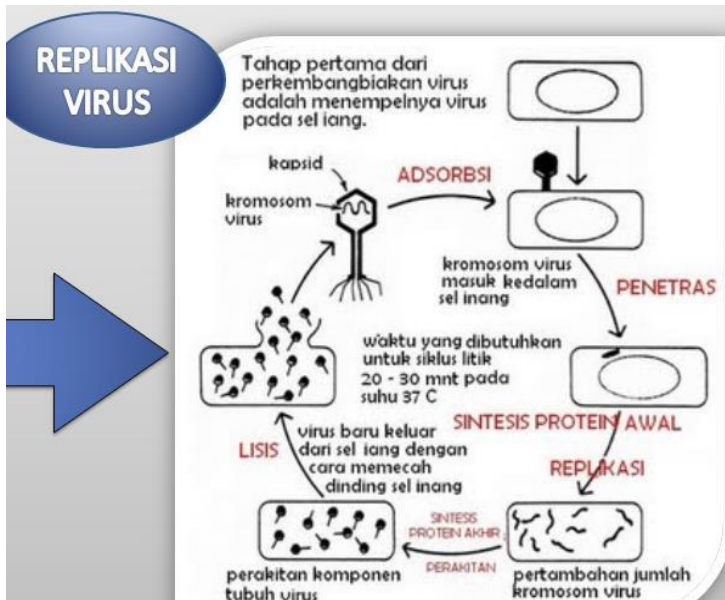
Virus adalah entitas biologis yang memerlukan sel inang untuk bereproduksi, sehingga disebut sebagai parasit obligat. Sel inang dapat berupa sel bakteri (dalam kasus bakteriofage/fag), sel hewan, atau sel tumbuhan.

1. Siklus Lisis

Siklus lisis adalah tahapan di mana virus menginfeksi sel inang, berkembang biak di dalamnya, dan pada akhirnya menghancurkan sel untuk melepaskan virus yang baru terbentuk. Proses ini umumnya terjadi pada virus yang menginfeksi bakteri, dikenal sebagai bakteriofag atau fag. Adapun tahapan siklus lisis adalah sebagai berikut.

- a. Pengikatan atau Penempelan (*Attachment/Adsorption*): Virus menempel pada sel inang menggunakan struktur protein khusus pada permukaan sel.
- b. Penetrasi (*Penetration*): Virus memasukkan materi genetiknya ke dalam sel inang dan melepaskan komponen virus ke dalam sel.
- c. Replikasi dan Pembentukan (*Replication and Assembly*): Materi genetik virus mereplikasi dan menghasilkan komponen baru menggunakan mesin sel inang.
- d. Lisis (*Lysis*): Setelah replikasi selesai, virus-virus baru merusak dinding sel inang, menyebabkan sel hancur, dan membebaskan virus ke lingkungan sekitar untuk menginfeksi sel lainnya.

Siklus lisis adalah bagian penting dalam pemahaman proses infeksi virus terhadap sel inangnya dan memiliki aplikasi dalam pengembangan terapi antivirus serta penggunaan virus dalam berbagai bidang bioteknologi.



Gambar 5.3. Siklus Lisis

Sumber online textbook of bacteriology, Todar Kenneth

2. Siklus Lisogenik

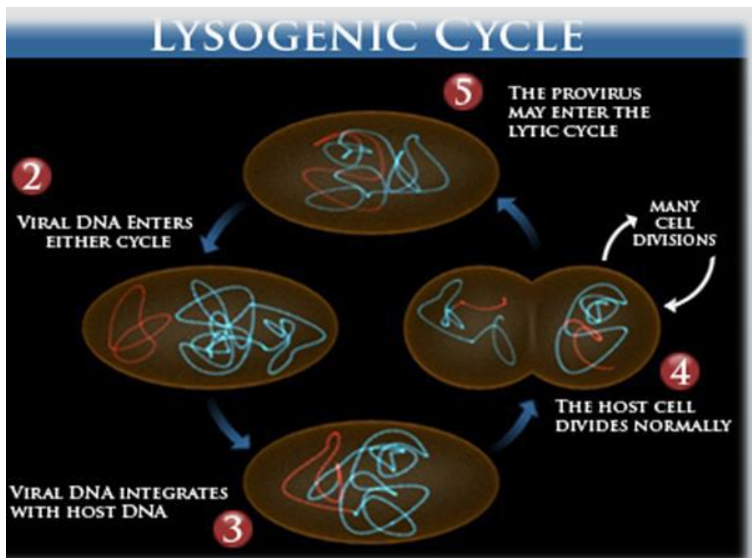
Siklus lisogenik pada virus merupakan fase dalam siklus kehidupan virus dimana materi genetik virus dimasukkan ke dalam genom sel inang. Berbeda dengan siklus lisis, di mana virus menginfeksi, mereplikasi diri, dan kemudian menghancurkan sel inang untuk melepaskan virus baru, siklus lisogenik melibatkan penyatuan materi genetik virus ke dalam genom inang dan membiarkan virus "dormansi" untuk jangka waktu yang tidak terbatas. Adapun tahapan siklus lisogenik adalah sebagai berikut.

- Penetrasi dan Integrasi:** Virus memasukkan materi genetiknya ke dalam sel inang, tetapi tidak segera mereplikasi diri. Sebaliknya, materi genetik virus disatukan dengan genom sel inang melalui proses yang disebut integrasi.
- Dormansi dan Represi:** Materi genetik virus yang telah terintegrasi ke dalam genom inang biasanya tidak aktif. Virus menggunakan strategi "dormansi" di mana gen-gen

virus tidak menghasilkan protein virus baru dan proses replikasi virus ditahan.

- c. Aktivasi (Induksi): Faktor-faktor tertentu, seperti stres lingkungan atau perubahan kondisi sel inang, dapat mengaktifkan gen-gen virus yang terdiam. Hal ini dapat memicu peralihan dari siklus lisogenik ke siklus lisis.
- d. Ekspresi Gen dan Replikasi: Setelah teraktivasi, gen-gen virus menjadi aktif lagi, memproduksi komponen virus, dan melanjutkan proses replikasi. Hal ini dapat menghasilkan virus baru dan memicu lisis sel inang.

Siklus lisogenik memberikan manfaat adaptasi jangka panjang bagi virus karena memungkinkan mereka untuk tetap laten, menyatu dengan genom inang, dan menghindari sistem pertahanan sel inang. Selama periode ini, virus bisa berada dalam kondisi tersembunyi dan tidak terdeteksi dalam genom sel inang, tetapi tetap memiliki potensi untuk kembali aktif dan memicu siklus lisis di masa mendatang.



Gambar 5.4. Siklus Lisogenik

Sumber online textbook of bacteriology, Todar Kenneth

5.1.5 Penyakit Virus pada Hewan

Beberapa penyakit yang diakibatkan oleh virus dan menyerang hewan adalah sebagai berikut.

1. *Avian Influenza* (Flu Burung)

Penyakit menular pada burung disebabkan oleh virus AI jenis H5N1. Virus ini termasuk dalam famili Orthomyxoviridae, memiliki genom berupa RNA tunggal, ber polaritas negatif, dan berbentuk bulat atau filamen. Virus ini dapat menjangkiti berbagai jenis hewan, termasuk manusia, dan berpotensi menyebabkan pandemi. Selain itu virus ini mampu bertahan dalam kurun waktu dan suhu tertentu. Diketahui virus ini tetap infeksi dalam feses dalam kurun waktu 30 hingga 35 hari pada temperatur 4°C dan dalam kurun waktu 7 hari pada kurun waktu 20°C (Hewajuli and Dharmayanti, 2008; IOE, 2013).

2. Rabies

Penyakit ini ditularkan melalui gigitan hewan yang terinfeksi virus rabies. Virus ini memasuki jaringan otot inang melalui luka gigitan dan menyebabkan infeksi. Virus menyebar ke sistem saraf, termasuk sumsum tulang belakang, otak, dan saliva. Infeksi rabies pada hewan atau manusia seringkali berakibat fatal (Singh and Růžek, 2013).

3. *Bluetongue* (BT)

Penyakit ini disebabkan oleh virus arbo yang menyebar melalui serangga *Culicoides* spp. Bluetongue menyerang ternak ruminansia dan bisa menimbulkan gejala demam, hiperemia pada selaput lendir, oedem pada bibir dan mata, serta keguguran pada domba bunting (Housawi *et al.*, 2004; Sendow and Bahri, 2005).

4. *Newcastle Disease* (ND)

Penyakit ini menyerang unggas, khususnya pada ayam, dan memiliki tingkat penularan yang tinggi. Gejalanya meliputi kelainan pada saluran pernapasan, pencernaan, dan sistem saraf pusat. Gejala penyakit bisa bervariasi tergantung pada jenis virus, usia inang, dan faktor lingkungan (Ashraf and Shah, 2014).

5. *Japanese Encephalitis* (JE)

Penyakit zoonosis yang menyebar melalui gigitan nyamuk vektor, terutama *Culex tritaeniorhynchus*. Virus ini bisa menjangkiti berbagai hewan seperti babi, ternak, unggas, dan manusia. Virus JE memiliki siklus hidup melalui nyamuk dan menjadi reservoir pada hewan tertentu seperti babi (Weissenböck *et al.*, 2010; Priastomo and *et al.*, 2021). Setiap penyakit memiliki karakteristik, gejala, dan mekanisme penularan yang berbeda. Memahami sifat khusus setiap penyakit tersebut penting dalam upaya pencegahan penyebarannya dan pengambilan tindakan yang tepat untuk melindungi hewan dan manusia dari risiko infeksi penyakit-penyakit tersebut.

5.1.6 Penyakit Virus pada Tumbuhan

Sama halnya dengan hewan, tumbuhan juga bisa terinfeksi oleh patogen virus. Setiap virus memiliki ciri khas dan metode penularan yang berbeda, serta dampak yang beragam pada tumbuhan yang terinfeksi. Beberapa penyakit pada tumbuhan yang disebabkan oleh virus adalah sebagai berikut (Scholthof *et al.*, 2011)

1. Mosaic

Mosaic merupakan penyakit pada tumbuhan yang ditandai dengan pola mozaik atau bercak-bercak yang tidak teratur pada daun yang terinfeksi. Daun tanaman yang terinfeksi bisa menampilkan pola mozaik atau bercak yang tidak teratur. Umumnya penyakit ini menyebar melalui serangga atau melalui bibit yang terinfeksi. Adapun cara menangani penyakit ini adalah dengan menggunakan bibit bebas virus, mengontrol serangga vektor, dan menjauhkan kontak antara tanaman yang terinfeksi dengan yang sehat. Beberapa virus penyebab penyakit mosaic diantaranya adalah sebagai berikut.

No.	Virus	Penyakit
1.	<i>Tobacco mosaic virus</i> (TMV)	Merusak tanaman tembakau sehingga proses fotosintesis dan transportasi menjadi terganggu. Cirinya timbul bercak hijau muda atau kuning pada daun.
2.	<i>Cucumber mosaic virus</i> (CMV)	Menyebabkan nekrosis yang mematikan pada tomat dan menyebabkan klorosis pada tembakau, tomat dan lada.
3.	<i>Cauliflower mosaic virus</i> (CaMV)	Menyerang famili Brassicaceae dan berdampak pada sejumlah inang termasuk tanaman seperti brokoli, kubis, kembang kol, dan lobak. Virus ini dapat menyebabkan kelainan bentuk daun, produksi lebih kecil, dan pertumbuhan terhambat. Hal ini dapat menyebabkan kematian tanaman dan penurunan produksi tanaman
4.	<i>Brome mosaic virus</i> (BMV)	Umumnya menginfeksi tumbuhan seperti buncis, kedelai, dan famili rerumputan. Gejala tumbuhan yang terinfeksi virus ini yaitu terdapat pola mosaik kekuningan di helai daun-daunnya. Virus ini kemudian akan membuat bagian-bagian daun lain mengerut dan melepuh.

2. *Leaf Curl*

Leaf Curl merupakan penyakit pada tumbuhan yang ditandai dengan gejala berupa daun yang melengkung ke atas atau ke bawah sehingga menyebabkan kerugian dalam produksi. Umumnya penyakit ini disebarluaskan oleh serangga seperti kutu daun. Penanganan penyakit ini yakni dengan menggunakan insektisida untuk mengendalikan vektor,

membersihkan gulma, dan mengelola sumber air untuk mengurangi keberadaan serangga vektor.

3. *Ring Spot*

Ring spot merupakan penyakit pada tumbuhan yang ditandai dengan munculnya bercak berbentuk cincin pada daun tanaman. Umumnya penyakit ini menular melalui benih yang terinfeksi, serangga, atau melalui kontak langsung antar tanaman. Upaya penanganan dapat dilakukan dengan memusnahkan tanaman yang terinfeksi, menjaga kebersihan area pertanaman, dan menggunakan benih yang bebas virus.

4. Tungro Virus

Virus Tungro Padi adalah virus yang menginfeksi tanaman padi, menyebabkan penyakit bernama "penyakit tungro". Penyakit ini merupakan salah satu ancaman utama bagi pertanian padi di berbagai wilayah, terutama di Asia Tenggara, yang dapat menyebabkan kerugian yang signifikan dalam produksi padi. Virus Tungro Padi adalah penyakit kompleks yang disebabkan oleh dua virus yang berbeda tetapi saling bergantung: *Rice tungro bacilliform virus* (RTBV) dan *Rice tungro spherical virus* (RTSV). Penyakit ini ditularkan oleh tungau wereng padi, terutama wereng coklat (*Nilaparvata lugens*) dan wereng hijau (*Nephotettix virescens*), yang bertindak sebagai vektor untuk menularkan virus tersebut dari tanaman yang terinfeksi ke tanaman sehat. Gejalanya dapat bervariasi pada tanaman padi yang terinfeksi, termasuk perubahan warna daun menjadi kuning, penurunan pertumbuhan tanaman, penurunan hasil panen, dan penurunan kualitas beras. Penyakit ini dapat menyebabkan kehilangan hasil yang signifikan dan mengancam ketahanan pangan di wilayah-wilayah yang bergantung pada pertanian padi. Pengendalian penyakit Tungro Padi melibatkan berbagai strategi seperti penggunaan varietas padi yang tahan terhadap virus, pengelolaan hama wereng vektor, dan praktik pertanian yang lebih baik. Penelitian dan upaya pencegahan terus dilakukan

untuk mengembangkan metode pengendalian yang lebih efektif guna melindungi tanaman padi dari serangan virus Tungro dan meminimalkan dampaknya terhadap hasil panen.

Di samping ketiga penyakit tersebut, ada banyak lagi penyakit pada tanaman yang disebabkan oleh virus. Penting untuk diingat bahwa pencegahan lebih efektif daripada pengobatan. Oleh karena itu, menerapkan praktik pertanian yang baik seperti rotasi tanaman, menjaga kebersihan, dan menggunakan varietas yang memiliki ketahanan terhadap penyakit dapat membantu mengurangi risiko infeksi virus pada tanaman.

5.2 Dasar Mikologi

5.2.1 Pendahuluan

Mikologi adalah disiplin ilmu biologi yang mendeskripsikan dan mempelajari sekelompok besar organisme dalam nama jamur atau yang lebih dikenal dengan sebutan fungi. Kelompok ini berisi sekitar 90.000 spesies, dan ribuan spesies dideskripsikan setiap tahunnya, diperkirakan terdapat lebih dari satu juta spesies jamur di dunia, sehingga menjadikan kerajaan jamur salah satu yang paling penting dalam pohon kehidupan. Jamur sangat bervariasi, karena mencakup organisme makroskopis (seperti jamur, truffle, dan puffball) dan organisme mikroskopis. Semuanya memiliki beberapa karakteristik umum. Mereka adalah eukariotik heterotrofik non-motil yang memiliki dinding sel di sekeliling sel, yang berbeda dengan dinding sel tumbuhan karena mengandung komponen berbeda (terutama kitin). Kebanyakan jamur dapat berkembang biak melalui reproduksi seksual dan aseksual (Zaragoza, 2017).

Meskipun kita tidak menyadarinya, jamur mempunyai pengaruh besar dalam kebiasaan kita sehari-hari, dan masyarakat serta cara hidup kita akan sangat berbeda jika tidak ada organisme ini. Jamur banyak ditemukan di lingkungan, dan mempunyai banyak efek dan kegunaan yang menguntungkan. Namun organisme ini juga merupakan

penyebab wabah dan penyakit yang mematikan, sehingga pengendaliannya wajib dilakukan di bidang pertanian dan biomedis (Zaragoza, 2017). Jamur memiliki peran penting dalam siklus kehidupan, menguraikan materi organik kompleks di alam menjadi unsur yang lebih sederhana yang dapat digunakan oleh organisme lainnya. Mereka dikenal sebagai organisme dekomposer, parasit, dan melakukan hubungan mutualisme. Jamur memperoleh nutrisi dengan menggunakan struktur berbentuk benang halus yang disebut hifa. Hifa ini digunakan untuk menyerap sumber makanan atau nutrisi dari lingkungan sekitarnya.

5.2.2 Karakteristik Umum Jamur

Jamur adalah organisme eukariotik yang memiliki dinding sel dan umumnya bersifat non motil. Karakteristik yang demikian sebenarnya memiliki kesamaan dengan karakteristik yang dimiliki oleh tumbuhan. Namun demikian, secara fundamental klasifikasi modern mengelompokkan mereka dalam kingdom tersendiri yang terpisah dari kingdom tumbuhan dikarenakan tidak memiliki klorofil. Karena ketiadaan klorofil membuat kelompok jamur tidak memiliki kemampuan untuk melakukan fotosintesis atau membuat makanannya sendiri sehingga ia digolongkan dalam organisme heterotrof yang bergantung pada organisme lain untuk mendapatkan nutrisi. Jamur dapat dibedakan berdasarkan ukuran tubuhnya. Ada jamur yang berukuran besar yang disebut jamur makroskopis, sehingga dapat dengan mudah terlihat dengan mata telanjang. Sebaliknya, ada pula jamur yang berukuran kecil yang disebut jamur mikroskopis, hanya dapat terlihat dengan menggunakan alat bantu mikroskop. Hal ini menandakan adanya variasi dalam ukuran tubuh jamur yang memungkinkan beberapa dapat terlihat secara langsung, sementara yang lain memerlukan bantuan alat seperti mikroskop untuk pengamatan lebih rinci (Darwis, 2011)

Jamur dapat muncul dalam bentuk khamir, kapang, atau kombinasi keduanya. Beberapa jamur mampu menyebabkan penyakit superfisial, kulit, subkutan, sistemik, atau alergi. Ragi

adalah jamur mikroskopis yang terdiri dari sel-sel soliter yang berkembang biak dengan cara bertunas. Sebaliknya, jamur terdapat pada filamen panjang yang disebut hifa, yang tumbuh melalui perluasan apikal. Hifa dapat bersekat jarang hingga bersepta teratur dan memiliki jumlah inti yang bervariasi. Terlepas dari bentuk atau ukurannya, semua jamur bersifat heterotrof dan mencerna makanannya secara eksternal dengan melepaskan enzim hidrolitik ke lingkungan sekitarnya (nutrisi serap). Ciri-ciri jamur lainnya adalah kemampuannya mensintesis lisin melalui jalur biosintetik asam L- α -adipat dan memiliki dinding sel kitin, membran plasma yang mengandung sterol ergosterol, 80S rRNA, dan mikrotubulus yang tersusun dari tubulin (Baron, no date).

5.2.3 Struktur dan Morfologi

1. Hifa dan Miselium

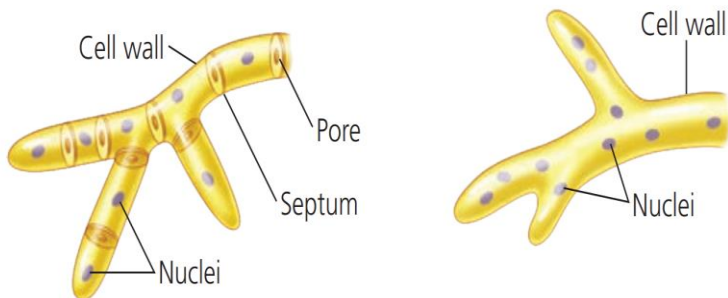
Hifa adalah struktur yang ditemukan pada jamur, terdiri dari serangkaian benang tipis yang menjalar dan tumbuh di dalam substrat tempat jamur tersebut hidup. Benang-benang hifa biasanya tidak terlihat dengan mata telanjang karena ukurannya yang sangat kecil, tetapi secara kolektif, mereka membentuk jaringan yang luas di dalam tanah, tanaman, atau medium tempat jamur tumbuh. Hifa memiliki peran penting dalam kehidupan jamur. Mereka berfungsi sebagai jaringan penghantar nutrisi, mengabsorpsi air dan nutrisi dari lingkungan sekitarnya, serta menyebarkan enzim pencernaan untuk memecah bahan organik yang kemudian diserap oleh jamur. Kumpulan hifa ini membentuk jaringan yang disebut miselium. Hifa juga membantu dalam reproduksi jamur, karena dapat berkembang dan membentuk struktur seperti miselium, sklerotium, atau struktur reproduktif lainnya.

Secara morfologis, hifa dapat bercabang-cabang dan membentuk jaringan yang kompleks, atau bisa juga tumbuh lurus dalam pola yang lebih sederhana tergantung pada spesies jamur dan lingkungan di mana mereka hidup. Hifa

juga memiliki kemampuan untuk berkembang biak secara asexual dengan pembentukan konidia atau secara seksual dengan penyatuan hifa dari individu jamur yang berbeda.

Berdasarkan bentuknya, ada tiga jenis hifa, yaitu:

- a. *Aseptate*: Ini adalah jenis hifa yang tidak memiliki sekat dan memiliki banyak inti dalam satu struktur tunggal (senositik).
- b. *Septate*: Hifa ini memiliki sekat yang membagi hifa menjadi sel-sel uninukleat (monositik hifa), yang berarti setiap sel hanya memiliki satu inti.
- c. *Septate* dengan sel-sel multinukleat: Jenis hifa ini juga memiliki sekat, namun di dalamnya terdapat beberapa inti (multi-nukleat) dalam satu sel yang sama.



Gambar 5.5. Bentuk Hifa

Sumber online textbook of Biology, Campbell 11th Edition
2011

2. Dinding Hifa

Dinding hifa merupakan lapisan luar yang menyelimuti dan melindungi hifa, serangkaian benang tipis yang membentuk jaringan utama pada jamur. Fungsi utama dinding hifa adalah memberikan dukungan struktural, perlindungan, serta berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Komposisi kimia dinding hifa termasuk kitin, glukukan, protein, dan senyawa lainnya, yang berperan penting dalam kekuatan struktural, perlindungan sel, dan interaksi dengan lingkungan. Dalam kehidupan jamur, dinding hifa memiliki peran penting, yakni

memberikan kekuatan struktural untuk pertumbuhan dan stabilitas hifa, serta melindungi sel jamur dari tekanan lingkungan dan serangan patogen. Dinding hifa juga memfasilitasi interaksi jamur dengan lingkungannya, seperti dalam mencerna nutrisi dari lingkungan sekitarnya. Perubahan pada dinding hifa dapat berdampak signifikan terhadap kemampuan jamur untuk bertahan hidup dan berkembang biak. Dalam bidang pertanian dan bioteknologi, pemahaman tentang struktur dan komposisi dinding hifa memainkan peran kunci dalam pengembangan metode pengendalian penyakit jamur dan produksi berbagai produk yang melibatkan jamur.

3. Membran hifa

Membran hifa merupakan lapisan yang melingkupi bagian dalam dari dinding sel pada hifa jamur. Berbeda dengan dinding sel luar, membran hifa terletak di dalam dinding sel, berperan sebagai membran semipermeabel yang menyelimuti sitoplasma dalam hifa. Fungsi utama membran hifa adalah mengatur pertukaran zat antara lingkungan luar dan sitoplasma dalam hifa. Ini memungkinkan transportasi zat-zat seperti nutrisi, air, dan limbah keluar masuk sel hifa. Membran hifa juga berperan dalam reaksi biokimia yang vital bagi kehidupan sel, termasuk proses respirasi, sintesis protein, dan metabolisme seluler. Karena itu, membran hifa penting untuk menjaga kehidupan seluler jamur. Perubahan pada membran hifa, seperti stres lingkungan, tekanan osmotik, atau paparan bahan kimia tertentu, dapat mempengaruhi fungsinya dan berdampak pada kesehatan serta kelangsungan hidup hifa jamur. Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur dan fungsi membran hifa menjadi penting dalam penelitian jamur dan penerapannya dalam berbagai bidang seperti pertanian, kedokteran, dan teknologi.

4. Kompartemen Lain pada Hifa

Hifa jamur terdiri dari beberapa bagian khusus yang memiliki peran penting dalam kehidupan seluler jamur. Bagian-bagian ini meliputi:

- a. Vakuola: Bagian dalam sel jamur yang berfungsi menyimpan air, nutrisi, senyawa kimia, dan zat lainnya serta menjaga tekanan osmotik dan stabilitas sel.
- b. Sitoplasma: Area di dalam sel yang mengandung berbagai organel seluler seperti mitokondria, ribosom, dan struktur lain yang terlibat dalam proses metabolisme dan fungsi seluler.
- c. Inti Sel: Pusat kontrol genetik yang mengatur proses reproduksi dan pertumbuhan seluler karena mengandung materi genetik seperti DNA.
- d. Eritroplasma: Bagian membran plasma yang kaya lipid yang mengatur permeabilitas membran sel jamur terhadap zat kimia dan respons terhadap lingkungan.
- e. Endosit: Proses endositosis sebagai mekanisme di mana sel jamur menyerap molekul-molekul dari lingkungan ke dalam sel melalui pembentukan vesikel membran.

Setiap bagian ini memiliki peran unik dalam mendukung fungsi dan kelangsungan hidup sel jamur. Mereka bekerja bersama untuk mendukung berbagai proses seluler, termasuk metabolisme, pertumbuhan, reproduksi, dan respons terhadap perubahan lingkungan pada hifa jamur.

5. Haustoria

Haustoria merupakan struktur istimewa pada beberapa jenis jamur dan tumbuhan parasit yang berperan dalam menyerap nutrisi dari jaringan tumbuhan inang. Struktur ini menyerupai akar kecil yang menembus serta melekat pada sel tumbuhan inang untuk mengambil air, nutrisi, dan unsur penting lain yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan jamur parasit. Melalui haustoria, jamur dapat terhubung dengan tumbuhan inangnya dan mengambil nutrisi secara langsung dari jaringan tumbuhan tersebut.

Fungsinya sangat signifikan dalam siklus hidup jamur parasit karena memberikan akses ke sumber nutrisi yang vital bagi kelangsungan hidup dan perkembangannya.

6. Spora

Spora merupakan ujung hifa yang menggelembung dan membentuk serupa wadah. Spora terbagi menjadi dalam dua golongan yakni spora seksual dan spora aseksual. Adapun pembagian spora seksual adalah sebagai berikut.

- a. Askospora, terdapat pada kelas Ascomycota dan terbentuk dalam kantung askus
- b. Basidiospora, terdapat pada kelas Basidiomycetes yang memiliki struktur serupa gada
- c. Zygospora, terdapat pada kelas Zygomycetes dan akan terbentuk apabila dua hifa secara seksual serasi
- d. Oospora terdapat pada kelas Oomycetes dan terbentuk dalam struktur khusus yang kemudian disebut sebagai oogonium

Sementara spora aseksual, terdiri atas konidiospora, sporangiospora, oidiospora, klamidospora, dan blastospora.

Tekanan serta pengaruh lingkungan saat perkembangan spora dapat menimbulkan adanya ornamentasi spora. Ornamentasi dinding spora merupakan ragam pola, tonjolan, atau struktur khusus yang terdapat pada permukaan spora jamur. Pola ornamentasi ini menjadi ciri unik yang membantu dalam identifikasi dan klasifikasi jamur, memainkan peran penting dalam studi mikrobiologi terkait identifikasi mikroorganisme. Beberapa ornamentasi dinding spora diantaranya adalah sebagai berikut.

1. *Echinate*, dengan duri-duri atau ujung yang runcing
2. *Verrucosa*, dengan kulit yang membulat kecil atau meruncing
3. *Reticulate*, dengan garis-garis beranastomosis membentuk jaringan permukaan
4. *Striate*, dengan garis, saluran panjang yang parallel satu sama lain

5. *Alveolate*, dengan lubang-lubang di bagian permukaan sehingga tampak berpori-pori.
6. *Punctate*, dengan tanda-tanda kecil di permukaan.

5.2.4 Reproduksi Jamur

Terdapat dua macam fase perkembangbiakan jamur yaitu fase vegetatif (aseksual) dan fase generatif (seksual) (Mujoko, Suryaminarsih and Wiyatin., 2021). Fase vegetatif atau aseksual terjadi tanpa melalui proses perkawinan yang dapat berlangsung dengan berbagai cara, seperti fragmentasi, membelah diri, tunas, spora kembara atau zoospore dan konidiospora. Sementara itu, dalam reproduksi generatif atau seksual, proses perkawinan antara sel-sel jamur membentuk spora yang memiliki variasi genetik yang lebih besar. Proses reproduksi jamur sangat beragam dan penting dalam memahami siklus hidup serta adaptasi jamur terhadap lingkungan.

5.2.5 Nutrisi dan Taksonomi

Jamur merupakan organisme heterotrof, yang berarti mereka bergantung pada zat organik dari organisme lain untuk keberlangsungan hidupnya. Jamur memiliki peran yang beragam dalam ekosistem. Sebagai saprofit, mereka berperan dalam mendaur ulang bahan organik yang telah mati, menjaga keseimbangan nutrisi dalam lingkungan. Sebagai parasit, jamur dapat menyebabkan penyakit pada organisme lain, mengambil nutrisi dari tubuh inangnya. Dalam simbiosis, seperti pada hubungan mikoriza, mereka membantu dalam pertukaran nutrisi antara tanaman dan lingkungannya. Sementara sebagai komensalisme, jamur hidup bersama organisme lain tanpa memberikan manfaat atau merugikan, tetapi tidak memberikan dampak yang signifikan. Semua peran ini memengaruhi dinamika lingkungan dan saling berkaitan dalam siklus kehidupan di alam.

Sebagaimana makhluk hidup lainnya, jamur juga membutuhkan nutrisi berupa senyawa organik dan non organik untuk keberlangsungan hidupnya. Beberapa senyawa organik dan non organik yang dibutuhkan misalnya karbohidrat, lipid, dan protein. Bahkan beberapa jamur memerlukan thiamin sebagai zat

organik tambahan. Sementara itu ion-ion anorganik esensial yang dibutuhkan yakni Na, P, Mg, dan S, serta faktor tumbuh seperti zat perangsang pertumbuhan, vitamin, dan hormon.

Sebagian besar energi yang digunakan oleh jamur diperoleh melalui proses respirasi aerob. Ini adalah proses di mana jamur menggunakan oksigen untuk mengubah senyawa organik menjadi energi yang dapat digunakan, seperti ATP, untuk mendukung berbagai fungsi seluler dan pertumbuhan. Meskipun ada kemampuan jamur untuk melakukan respirasi anaerobik dalam kondisi tertentu, respirasi aerobik tetap menjadi metode utama yang digunakan oleh mayoritas jamur untuk memperoleh energi (Suryani, Taupiqurrahman and Kulsum, 2020).

5.2.6 Klasifikasi Jamur

Klasifikasi fungi merupakan area penelitian yang dinamis dan terus mengalami revisi. Para ahli seringkali memiliki perbedaan dalam mengelompokkan fungi dan menentukan taksonominya. Meskipun terdapat variasi, klasifikasi umumnya didasarkan pada ciri-ciri spora seksual, seperti zygospora, askospora, basidiospora, serta karakteristik tubuh buah selama tahap-tahap seksual dalam daur hidupnya.

Fungi yang diketahui tingkat seksualnya disebut fungi sempurna, sementara banyak yang belum diketahui tingkat reproduksi seksualnya disebut fungi imperfecti. Dalam kasus terakhir, ciri-ciri seperti morfologi spora aseksual dan miselium menjadi dasar untuk klasifikasi. Fungi imperfek dikelompokkan dalam Divisi Deuteromycota hingga tingkat seksualnya ditemukan, dan setelah itu, mereka dapat dimasukkan ke dalam Divisi yang sesuai (Hafsan, 2011). Buku ini membahas empat Divisi fungi sempurna secara singkat, yaitu Zygomycota, Ascomycota, dan Basidiomycota, serta Divisi Deuteromycota atau fungi imperfekti.

1. Divisi Zygomycota

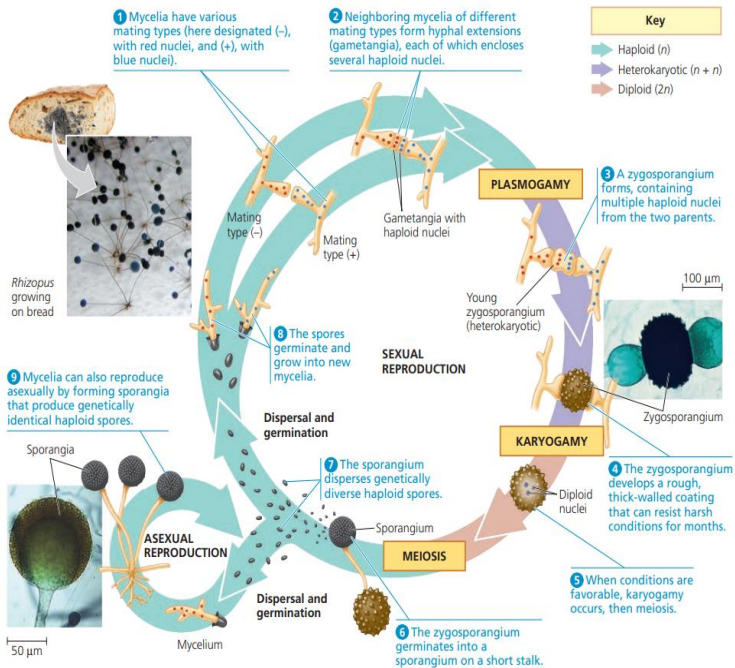
Divisi Zygomycota merupakan jamur yang memiliki ciri-ciri yaitu organisme multiseluler, berfilamen, tidak berflagel, dan memiliki houstoria (Spatafora, *et al.*, 2016). Struktur tubuh yang terdiri dari sporangium dan hifa-hifa

tidak bersekat dan senositik. Dinding sel dari Zygomycota tersusun atas zat kitin. Hifa pada Zygomycota dapat berdiferensiasi menjadi sporangium (spora vegetatif) yang dipengaruhi oleh sporangiofor. Bentuk dari organ reproduksi Zygomycota berdinding tebal dan berwarna gelap dan zygomycota tidak memiliki tubuh buah (yang tampak). Zygomycota bereproduksi secara seksual menggunakan organ bernama sporangiospora yang dimana merupakan derivat dari pembelahan internal sitoplasma sporangial, selanjutnya spora disebarkan melalui angin atau hewan dan akan tumbuh setelah pecahnya dinding sporangium (White *et al.*, 2006). Secara morfologi tubuh Zygomycota tersusun atas beberapa bagian yaitu hifa rhizoid, hifa stolon, sporangium, sporangiofor, kolumela. Adapun ciri-ciri khas yang dimiliki Zygomycota adalah hidup sebagai saprofit, miselium bercabang banyak, hifa tidak bersekat, dinding sel dari zat kitin, spora memiliki dinding (tidak memiliki zoospora), reproduksi secara seksual dengan peleburan dua hifa (hifa jantan memberikan sitoplasma ke dalam hifa betina), dan reproduksi aseksual dengan sporangium.

Divisi Zygomycota dapat hidup dengan menumpang dan menyerap nutrisi dari sisa makhluk hidup (saprofit) dan dapat bersimbiosis secara mutualisme (mikoriza) ataupun parasitisme. Zygomycota dapat dibedakan lagi kedalam sembilan ordo yaitu: Asellariales, Dimargaritales, Endogonales, Entomophthorales, Harpellales, Kickxellales, Mortierellales, Mucorales and Zoopagales. Pada setiap ordonya anggota Zygomycota memiliki struktur spora seksual dan aseksual yang berbeda-beda dan khas (White *et al.*, 2006). Reproduksi pada Zygomycota terjadi melalui dua mekanisme, yaitu seksual dan aseksual. Reproduksi seksual melibatkan penggabungan dua gametangia multinukleat yang serupa namun berbeda ukuran. Proses seksual ini, disebut konjugasi, dimulai dari hifa yang berbeda jenis, yaitu hifa jantan (+) dan hifa betina (-), keduanya haploid (n). Jika kedua hifa ini bertemu, melebur, dan membentuk zygospora dengan dinding tebal ($2n$), yang dapat bertahan dalam

kondisi lingkungan yang buruk selama periode dormansi sekitar 1-3 bulan. Ketika kondisi membaik, zigospora berkecambah dan berkembang menjadi hifa baru, membentuk sporangiofor yang berujung pada sporangium, menghasilkan spora dan mengawali proses reproduksi aseksual.

Pada fase reproduksi seksual, gametangia dibentuk sebagai pembesaran pada ujung cabang hifa. Setelah produksi gametangia, terjadi plasmogami, diikuti oleh pembentukan zigospora dengan dinding tebal dalam zigosporangium, baik pada spesies homotalik maupun heterotalik. Sementara itu, reproduksi aseksual pada Zygomycota umumnya bersifat non motil, dengan spora yang terbentuk dalam sporangia, sporangiola, atau merosporangia. Pembentukan spora juga dapat terjadi melalui klamidospora, arthrospore, dan sel ragi. Mode utama reproduksi aseksual pada Zygomycota adalah melalui sporangiospora. Dalam beberapa kasus, spora dibatasi dari sitoplasma melalui fusi vesikel pembelahan pada multispora sporangia, sporangiola, dan beberapa merosporangia (Mucorales). Pada merosporangia (Zoopagales), spora terbentuk melalui peleburan invaginasi plasmalemma. Sporangiospora yang terbentuk bersatu, multi nukleat, dan memiliki dinding yang halus, meskipun beberapa taksa memiliki duri eksternal, kutil, atau striasi. Reproduksi aseksual sederhana di Zygomycota melibatkan pelepasan sporangiospora setelah dinding sporangium larut. Sporangiospora ini berkecambah menjadi organisme baru dengan hifa somatik, dan ujung sporangiofor berkembang menjadi sporangium yang berisi banyak sporangiospora.



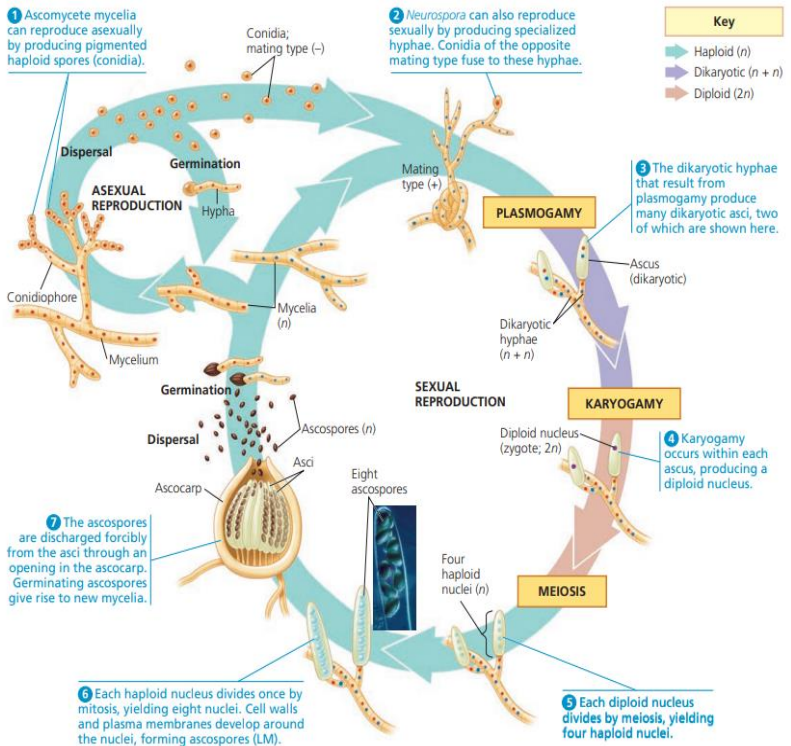
Gambar 5.6. Siklus hidup zygomycete *Rhizopus stolonifer*
 Sumber online textbook of Biology, Campbell 11th Edition 2011

2. Divisi Ascomycota

Divisi Ascomycota sejauh ini merupakan kelompok jamur terbesar, diperkirakan mencakup lebih dari 32.000 spesies yang dideskripsikan dalam 3400 marga. Diasumsikan bahwa mayoritas ascomycota belum ditemukan, dan jumlah total spesies mungkin lebih tinggi dengan faktor 10-20 atau bahkan lebih. Nama ini berasal dari kata Yunani “askos” (botol kulit, tas atau kantung kemih) dan “mykes” (jamur), jadi ascomycota adalah jamur kantung. Karakteristik Ascomycota yakni mempunyai askus (kantung) yang mengandung askospora, uniseluler/multiseluler, umumnya hifa bersekat, bercabang dan berinti banyak, ascus mengandung delapan askospora dan dapat membengkak, mengeluarkan spora dengan mekanisme penyemprotan., banyak ascomycota tumbuh sebagai endofit dalam asosiasi tanpa gejala dengan tanaman, ascomycota tumbuh di tanah,

biasa ditemukan di bagian tanaman di atas tanah, dan juga ditemukan di air tawar dan di laut. Kebanyakan ascomycota dikenali dari tubuh buahnya atau ascocarps. Contoh jamur dimorfik yang bagus adalah *Candida* (Webster and Weber, 2007).

Divisi Ascomycota melakukan reproduksi seksual dengan menghasilkan askospora, spora seksual yang terbentuk dalam struktur khusus disebut askus, sementara reproduksi aseksualnya melibatkan pembentukan konidia. Berbeda dengan Divisi sebelumnya, hifa fungi ini bersepta. Kelompok Ascomycota dianggap lebih maju dan kompleks daripada Zygomycota, mencakup ragi, berbagai jenis kapang, dan beberapa cendawan. Dari 15.000 spesies Ascomycota, sebagian besar hidup sebagai saprofit. Contohnya adalah *Penicillium*, yang dapat ditemukan sebagai kapang berwarna biru-hijau atau kadang-kadang kuning pada berbagai substrat dan dikenal sebagai penghasil antibiotik penisilin. Reproduksi aseksualnya melibatkan pembentukan konidia pada ujung konidiofor. Beberapa Ascomycota bersifat parasit, seperti *Piedraia hortai* penyebab infeksi rambut dan *Candida albicans* yang dapat menyebabkan kandidiasis pada manusia. *Candida albicans* dapat berperan sebagai saprofit atau parasit tergantung pada kondisi lingkungan dan keadaan kesehatan individu. Sementara itu ascomycota yang paling banyak digunakan dalam industri adalah *Saccharomyces cerevisiae* yang seringkali bertindak sebagai ragi. Reproduksi aseksual ragi melibatkan pembelahan biner melintang atau pembentukan tunas.

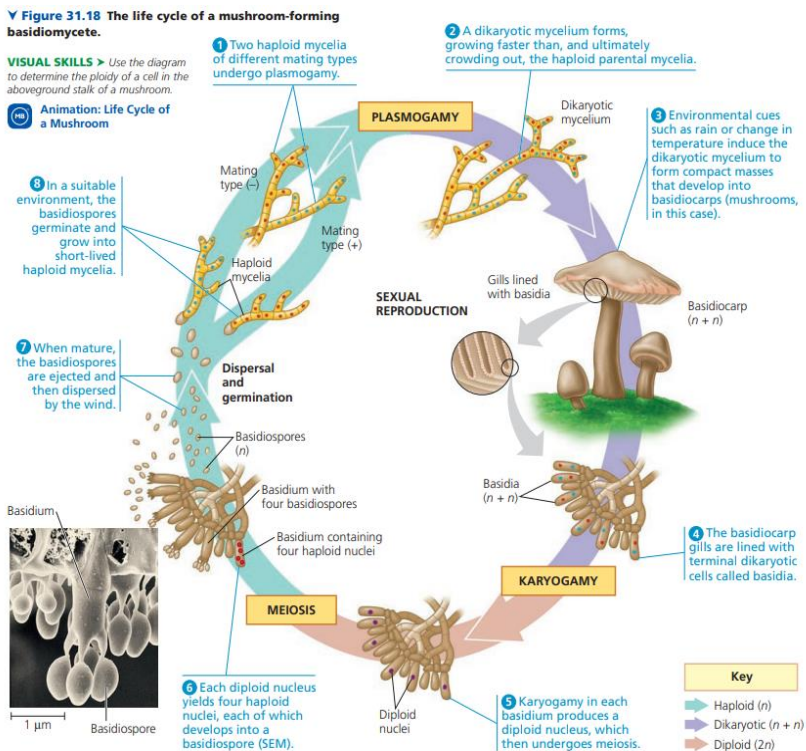


Gambar 5.7. Siklus hidup ascomycete *Neurospora crassa*
 Sumber online textbook of Biology, Campbell 11th Edition
 2011

3. Divisi Basidiomycota

Divisi Basidiomycota merupakan kelompok jamur yang memiliki karakteristik unik, termasuk pembentukan basidium sebagai struktur reproduksi khasnya. Kelompok ini meliputi berbagai jenis jamur, mulai dari jamur kuping hingga jamur kancing, yang memiliki peran penting dalam dekomposisi bahan organik dan membentuk hubungan simbiosis dengan berbagai tanaman. Basidiomycota dikenal dengan struktur sporanya yang disebut basidiospora, yang dihasilkan dari basidium dan sering terlihat dalam berbagai bentuk dan warna yang beragam. Kelompok jamur ini memiliki peran signifikan dalam ekosistem dan dapat ditemukan di berbagai habitat, memengaruhi siklus nutrisi

serta keseimbangan ekosistem. Beberapa fungi ini dapat dimakan, seperti jamur merang, jamur shitake, dan jamur tiram, sementara ada pula yang mengandung racun mematikan seperti *Amanita phalloides*, dikenal sebagai "Death Cap". Meskipun memiliki penampilan menarik dengan tudung berwarna hijau kecoklatan, jamur ini sangat berbahaya bila dimakan dikarenakan mengandung racun yang mematikan bagi manusia dan dapat menyebabkan kerusakan parah pada organ tubuh, terutama hati. Sayangnya, jamur ini sering disalah identifikasi sebagai jamur yang aman untuk dikonsumsi karena penampilannya yang menarik.



Gambar 5.8. Siklus hidup basidiomycete

Sumber online textbook of Biology, Campbell 11th Edition 2011

4. Divisi Deuteromycota

Deuteromycota, yang juga dikenal sebagai "jamur tidak sempurna," tidak memiliki atau memiliki reproduksi seksual yang belum diketahui. Reproduksi utamanya terjadi aseksual melalui konidia. Umumnya berselaput, kelompok ini hidup sebagai saprofit dan parasit. Contoh Deuteromycota mencakup Hyphomycetes. Kelompok fungi yang belum memiliki informasi mengenai tingkat reproduksi seksualnya dikelompokkan dalam kategori khusus yang disebut kelompok fungi imperfecti atau dikenal sebagai Deuteromycota. Apabila metode reproduksi seksualnya kemudian teridentifikasi, fungi tersebut akan dikeluarkan dari kelompok ini dan ditempatkan dalam Divisi yang sesuai berdasarkan karakteristik reproduksi seksual yang dimilikinya. Cara reproduksi aseksual dari kelompok ini melibatkan pembentukan konidium, mirip dengan Ascomycota.

Diperkirakan ada sekitar 1500 spesies fungi yang belum memiliki informasi mengenai tingkat reproduksi seksualnya sehingga termasuk dalam kelompok Deuteromycota. Beberapa fungi yang bersifat parasit pada manusia dan hewan kebanyakan termasuk dalam Divisi ini. Contohnya adalah *Histoplasma capsulatum*, penyebab koksidiomikosis, yang merupakan infeksi sistemik pada retikuloendotelium yang melibatkan jaringan limfatik, paru-paru, sistem saraf pusat, dan organ-organ lain dalam tubuh. Blastomikosis adalah infeksi pernapasan kronis yang dapat menyebar ke paru-paru, tulang, dan kulit. Fungi lain yang bersifat patogen pada manusia, seperti *Epidermophyton floccosum* yang menyebabkan kaki atlet, serta genus *Epidermophyton*, *Microsporum*, dan *Trichophyton* yang menjadi penyebab penyakit kurap, juga termasuk dalam Deuteromycota. Beberapa fungi dari kelompok ini juga bersifat parasit pada tumbuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashraf, A. and Shah, M. (2014) 'Newcastle Disease: Present Status and Future Challenges for Developing Countries', *African Journal of Microbiology Research*, 8(5), pp. 411–416. doi: <https://doi.org/10.5897/ajmr2013.6540>.
- Baron, S. (no date) *Medical Microbiology*. University of Texas Medical Branch at Galveston.: Galveston (TX).
- Campbell, N. A. R. *et al.* (2008) *Biology*. 11 Jilid I. Jakarta: Erlangga.
- Darwis, W. (2011) 'Inventarisasi Jamur Yang Dapat Dikonsumsi Dan Beracun Yang Terdapat Di Hutan Dan Sekitar Desa Tanjung Kemuning Kaur Bengkulu', *Konservasi Hayati*, 7 (2). pp.(2), pp. 1–8.
- Dwi, O. and Kurniati, I. (2018) *Bahan Ajar Teknik Laboratorium Medik (TLM)*. Jakarta: Pusat Pendidikan Sumber Daya Manusia Kesehatan.
- Hafsan (2011) *Mikrobiologi Umum*. Makassar: Alauddin University Press.
- Hewajuli, D. and Dharmayanti, N. L. P. (2008) 'Karakterisasi dan Identifikasi Virus Avian Influenza (AI)', *Wartazoa*, 18(2), pp. 86–100.
- Housawi, F. M. T. *et al.* (2004) 'Abortions, Stillbirths and Deformities in Sheep at The Al-Ahsa Oasis in Eastern Saudi Arabia: Isolation of A Bluetongue Serogroup Virus from The Affected Lambs', *OIE Revue Scientifique et Technique*, 23(3), pp. 913–920. doi: <https://doi.org/10.20506/rst.23.3.1540>.
- IOE (2013) 'Manual of Diagnostic Tests and Vaccines for Terrestrial Animals', *World Organisation for Animal Health*, 4, pp. 258–269.
- Mujoko, T. P., Suryaminarsih, P. and Wiyatin., S. (2021) *Pedoman Praktikum Mikologi Pertanian*. Jawa Timur: Universitas Pembangunan Nasional Veteran.
- Priastomo, Y. and et al (2021) *Virologi*. Jakarta: Yayasan Kita Menulis.

- Scholthof, K. B. G. *et al.* (2011) 'Top 10 plant viruses in molecular plant pathology', *Molecular plant pathology*, 12(9), pp. 938–954.
- Sendow, I. and Bahri, S. (2005) 'Penyakit Bluetongue pada Ruminansia, Distribusi dan Usaha Pencegahannya di Indonesia', *Jurnal Litbang Pertanian*, 24(2), pp. 56–62.
- Singh, S. K. and Růžek, D. (2013) *Neuroviral Infections*. USA: CRC Press.
- Smith, K. M. and Ritchie, D. A. (1980) *Introduction to Virology*. London: Chapman and Hall Ltd.
- Suryani, Y. O., Taupiqurrahman and Kulsum, Y. (2020) *Mikologi*. Sumatera Barat: PT. Freeline Cipta Granesia.
- Wagner, E. K. *et al.* (2008) *Basic Virology*. 3th editio. USA: Blackwell Publishing.
- Webster, J. and Weber, R. W. S. (2007) *Introduction to Fungi*. New York: Cambridge University Press.
- Weissenböck, H. *et al.* (2010) 'Zoonotic Mosquito-borne Flaviviruses: Worldwide Presence of Agents with Proven Pathogenicity and Potential Candidates of Future Emerging Diseases', *Veterinary Microbiology*, 140(3–4), pp. 271–280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2009.08.025>.
- White, M. *et al.* (2006) 'Phylogeny of the Zygomycota based on nuclear ribosomal sequence data', *Mycologia*, 98(6), pp. 872–873.
- Zaragoza (2017) *Reference Module in Life Sciences*. Instituto de Salud Carlos III, Madrid, Spain: Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.12378-7>.

BAB 6

NUTRISI DAN KULTUR ORGANISME

Oleh Esti Rizkiana Pratiwi

6.1 Pendahuluan

Mikroba dapat ditemukan hampir di setiap lingkungan di Bumi (udara, darat, dan perairan), termasuk lingkungan yang tidak ada kehidupan lain dapat bertahan disana (lingkungan ekstrem). Mikroba ditemukan hidup di banyak lingkungan karena ukurannya yang kecil, mudah tersebar, dan menempati sedikit ruang. Nutrisi dibutuhkan oleh mikroba untuk dapat tumbuh dan bertahan hidup melalui proses metabolisme. Meskipun nutrisi di lingkungan tersedia dalam jumlah sedikit, mikroba masih tetap dapat bertahan hidup sebab memiliki kapasitas adaptasi yang besar terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu nutrisi termasuk salah satu faktor yang mempengaruhi bagi pertumbuhan mikroba (Black, 2012).

Ketika mengisolasi mikroba dari lingkungan, kemudian ditransfer di Laboratorium, artinya kita seharusnya menyediakan kondisi lingkungan sesuai kondisi asalnya termasuk sumber nutrisi. Hal ini dilakukan agar dapat mengendalikan pertumbuhannya. Memahami dan mempelajari proses kultur mikroba sangat diperlukan sebab memuat analisis terkait pertumbuhan dan nutrisi apa saja yang diperlukan. Saat menumbuhkan mikroba dibutuhkan media kimiawi (sintetik) yang digunakan untuk menumbuhkan (mengkulturkan) dan memisahkan mikroba tertentu sehingga kita dapat mengevaluasi pertumbuhannya (Pommerville, 2011).

Pada Bab ini akan dibahas nutrisi apa saja yang dibutuhkan oleh mikroba untuk mendukung proses pertumbuhannya. Selain itu, juga dibahas mengenai proses dan cara-cara dalam mengkulturkan mikroba.

6.2 Nutrisi Mikroba

Nutrisi mikroba didefinisikan sebagai sumber gizi dan zat gizi yang dibutuhkan untuk mikroba dapat tumbuh dan bertahan hidup. Sama seperti manusia dan makhluk hidup lainnya, mikroba dapat memenuhi kebutuhan untuk hidup melalui nutrisi yang diserap. Faktor yang memiliki pengaruh paling besar terhadap kehidupan mikroba adalah nutrisi, sumber energi, suhu, kandungan gas, air, garam, pH, radiasi, dan keberadaan organisme lain. Nutrisi adalah zat kimia yang diperoleh dari lingkungan kemudian diserap dan digunakan di dalam sel untuk aktivitas seperti metabolisme dan pertumbuhan (Talaro and Chess, 2012).

Seluruh nutrisi mikroba berupa senyawa yang dibangun dari unsur kimia. Namun, tidak seluruh unsur kimia diperlukan sebagai nutrisi. Terdapat unsur (elemen) kimia utama dan dominan yang digunakan sebagai sumber nutrisi, seperti: hidrogen (H), oksigen (O), karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), belerang (S), dan selenium (Se). Selain itu, unsur (elemen) kimia yang lainnya, meskipun tidak diperlukan secara utama namun tetap dapat di metabolisme dengan cara tertentu oleh mikroba (Madigan *et al.*, 2012).

Berdasarkan hal tersebut, maka pengelompokan nutrisi pada mikroba dibagi menjadi dua kategori. Dua kategori nutrisi penting adalah Makro nutrien dan Mikro nutrien. Makro nutrien adalah nutrisi yang dibutuhkan dalam jumlah yang relatif besar dan memainkan peran utama dalam struktur sel serta metabolisme. Mikro nutrien disebut elemen jejak (*trace element*) yaitu sumber nutrisi yang dibutuhkan dalam jumlah lebih kecil (sedikit) dan terlibat dalam fungsi enzim dan pemeliharaan struktur protein (Talaro and Chess, 2012).

6.2.1 Unsur Makro nutrien

Makro nutrien merupakan unsur nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroba dalam jumlah kuantitas relatif besar. Karena dibutuhkan dalam jumlah yang besar, maka keberadaan unsur-unsur makro nutrien ini sangat penting karena memainkan peranan utama dalam metabolisme, aktivitas sel, serta pembentukan struktur sel. Beberapa unsur nutrisi yang termasuk

dalam Makro nutrien dapat dilihat pada Tabel 2.1. Contoh unsur nutrisi makro nutrien adalah senyawa senyawa yang mengandung Karbon (C), Nitrogen (N), Hidrogen (H), Oksigen (O), Fosfor (P), Sulfur (S) (Madigan *et al.*, 2012; Talaro and Chess, 2012)

Keberadaan unsur makro nutrien jika tidak tersedia dalam jumlah yang cukup di media pertumbuhan, maka mikroba cenderung tidak dapat tumbuh. Makro nutrien umumnya berasosiasi dengan dan berkontribusi terhadap aktivitas dan stabilitas molekul dan struktur sel seperti enzim dan ribosom. Sehingga makro nutrien penting dalam banyak proses seluler, termasuk protein sintesis dan konservasi energi (Talaro and Chess, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).

Seluruh sel mikroba membutuhkan unsur Karbon (C) dan sebagian besar dalam bentuk senyawa organik (senyawa mengandung karbon). Bakteri mengasimilasi senyawa organik untuk membuat bahan-bahan sel baru. Sumber karbon dihasilkan melalui proses respirasi, endapan sisa dan kerangka makhluk hidup. Senyawa organik sangat penting untuk membentuk struktur dan fungsi semua organisme dan virus (Madigan *et al.*, 2012; Talaro and Chess, 2012).

Sel bakteri mengandung sekitar 13% nitrogen, yang terdapat dalam protein, asam nukleat, dan beberapa komponen sel lainnya. Nitrogen yang tersedia di alam berada dalam bentuk anorganik seperti amonia (NH_3), nitrat (NO_3^-), atau gas nitrogen (N_2). Sebagian besar mikroba dapat menggunakan amonia sebagai sumber nitrogennya, dan ada pula yang dapat menggunakan nitrat. Gas nitrogen (N_2) hanya dapat digunakan melalui proses fiksasi nitrogen dengan bantuan mikroba. Mikroba tertentu memiliki kemampuan untuk memfiksasi Gas nitrogen dan merubahnya menjadi Amonia (NH_3) atau Nitrat (NO_3) yang kemudian disebut dengan mikroba pemfiksasi nitrogen. Nitrogen merupakan senyawa organik yang digunakan dalam menyediakan prekursor untuk biosintesis asam amino, biosintesis asam nukleat dan respirasi untuk menyediakan energi. Sehingga Nitrogen berperan penting untuk pertumbuhan karena termasuk elemen utama sel, asam amino, DNA dan RNA

(Madigan *et al.*, 2012; Talaro and Chess, 2012; Tortora, Funke and Case, 2013; Hoffman *et al.*, 2014)

Gas oksigen (O_2) merupakan sumber makro nutrisi yang diperlukan untuk metabolisme nutrisi oleh mikroba aerob. Mikroba Aerob adalah kelompok mikroorganisme yang dalam pertumbuhannya membutuhkan Oksigen (Talaro and Chess, 2012). Saat Oksigen tersedia cukup, maka mikroba Aerob akan melakukan proses respirasi secara aerob menggunakan Oksigen. Penyerapan oksigen yang banyak akan membuat sel menjadi lebih cepat membelah (bakteri tumbuh dengan cepat). Oksigen merupakan faktor pembatas bagi pertumbuhan mikroba Aerob (Black, 2012).

Air (Hidrogen) termasuk ke dalam senyawa nutrisi yang tersedia paling melimpah di dalam sel. Komposisi sel tertinggi adalah berupa air. Air bertindak sebagai pelarut dalam reaksi metabolisme pada sel mikroorganisme, digunakan untuk mentransfer energi serta menjaga pH sel (Talaro and Chess, 2012). Selain karbon, nitrogen, oksigen dan air, mikroorganisme juga membutuhkan asupan mineral tertentu seperti sulfur (belerang) dan fosfor untuk kepentingan pembentukan komponen sel seperti mensintesis ATP, fosfolipid, dan asam nukleat. Fosfor (P) merupakan komponen utama DNA dan RNA, sangat penting untuk susunan genetik sel dan virus. Mikroorganisme memperoleh fosfor terutama dari ion fosfat anorganik (PO_4^{3-}) (Black, 2012; Talaro and Chess, 2012).

Beberapa mikroba mampu mensintesis asam amino yang mengandung sulfur dari belerang dan asam amino lainnya. Mikroba memperoleh belerang (Sulfur) dari garam sulfat anorganik dan dari asam amino yang mengandung sulfur. Unsur Belerang (Sulfur) akan digunakan untuk membuat protein, koenzim, dan komponen sel lainnya. Unsur belerang dioksidasi oleh beberapa bakteri sebagai sumber energi (Black, 2012; Talaro and Chess, 2012).

Tabel 6.1. Unsur-Unsur Utama Makro nutrien

Unsur Makro nutrien	Bentuk di Alam	Sumber senyawa
Karbon	• CO₂ (gas) • CO₃²⁻ (karbonat) • Senyawa organik	• Udara (0,036%) • Sedimen (Endapan) • Makhluk hidup
Nitrogen	• N₂ (gas) • NO₃⁻ (nitrat) • NO₂⁻ (nitrit) • NH₃ (Amonia) • Nitrogen Organik (Protein, asam nukleat)	• Air (79 %) • Air dan tanah • Air dan tanah • Air dan tanah • Organisme
Oksigen	• O₂ (gas) • Oksida • H₂O	• Udara (20 %) dan produk utama fotosintesis
Hidrogen	• H₂ (gas) • H₂O • H₂S (Hidrogen Sulfida) • CH₄ (Metana) • Senyawa Organik	• Air • Rawa-rawa • Gunung berapi • Ventilasi gas • Organisme
Fosfor	• PO₄³⁻ (Fosfat)	• Batuan, Deposit mineral
Sulfur	• S (Sulfur) • SO₄²⁻ (Sulfat)	• Deposit mineral, dan Sedimen (Endapan gunung berapi)

Sumber: (Talaro and Chess, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023)

Selain unsur utama seperti karbon, nitrogen, oksigen, hidrogen, fosfor dan sulfur, masih ada beberapa unsur lain yang tergolong sebagai makro nutrien dan keberadaannya dibutuhkan

oleh sel walaupun jumlahnya tidak banyak, antara lain: Kalium (K), Magnesium (Mg), Kalsium (Ca), dan Sodium (Na). Unsur Kalium (K) dibutuhkan untuk beberapa aktivitas enzim. Magnesium (Mg) dibutuhkan untuk aktivitas enzim serta memiliki fungsi menstabilkan kinerja ribosom, membran dan asam nukleat (Madigan *et al.*, 2012).

Meskipun tidak seluruh mikroba membutuhkan Kalsium (Ca), namun peranan kalsium penting dalam karena membantu proses menstabilkan dinding sel. Utamanya adalah pada jenis mikroba yang memiliki endospora, sebab mampu menjaga stabilitas panas sehingga sel tidak rusak. Kalsium dibutuhkan oleh bakteri Gram positif untuk sintesis dinding sel dan oleh organisme pembentuk spora untuk sintesis spora. Sodium (Na) diperlukan oleh beberapa mikroba, tetapi tidak semuanya. Mikroba yang menggunakan Sodium (Na) sebagai sumber nutrisi umumnya karena di lingkungan atau habitatnya memang tersedia Sodium. Contohnya mikroba yang hidup di air laut. Air laut mengandung kadar sodium yang relatif tinggi sehingga mikroba yang ada di perairan laut adalah kelompok mikroba yang biasanya membutuhkan sodium untuk pertumbuhannya (Black, 2012; Madigan *et al.*, 2012).

6.2.2 Unsur Mikro nutrisi

Mikro nutrisi adalah sumber nutrisi yang dibutuhkan mikroba namun dalam jumlah yang lebih sedikit. Mikro nutrisi dikenal juga sebagai elemen jejak (*trace element*). Meskipun dibutuhkan dalam jumlah yang sedikit, akan tetapi keberadaan mikro nutrisi juga memerankan peranan dan fungsi penting seperti terlibat dalam fungsi enzim dan pemeliharaan. Beberapa unsur nutrisi yang termasuk dalam Mikro nutrisi dapat dilihat pada Tabel 6.2. Contoh unsur nutrisi mikro nutrisi adalah senyawa senyawa yang mengandung mineral seperti : Mangan (Mn), Seng (Zn), Kobalt (Co), Molibdenum (Mo), Nikel (Ni), dan Tembaga (Cu), Besi (Fe) (Black, 2012; Madigan *et al.*, 2012; Talaro and Chess, 2012).

Nutrisi elemen jejak berupa mineral oleh mikroba diperlukan secara bervariasi. Meskipun jumlah kebutuhan

terhadap mineral tersebut sedikit, sebagian besar dibutuhkan dalam bentuk ion untuk kofaktor enzim pada reaksi enzimatik di dalam sel. Keberadaan unsur mikro nutrien termasuk dalam faktor yang berpengaruh bagi pertumbuhan mikroba (Black, 2012; Madigan *et al.*, 2012). Mikro nutrien dapat ditambahkan ke dalam media di Laboratorium berupa komponen mineral dan logam (Tortora, Funke and Case, 2013)

Tabel 6.2. Unsur-Unsur Mikro nutrien

Unsur Mikro nutrien	Bentuk di Alam	Sumber senyawa
Mangan	• Mn • Mn²⁺ • Mn³⁺	• Ventilasi hidrotermal • Tanah • Logam
Seng	• Zn • Zn²⁺	• Batuan • Mineral
Besi	• Fe • Fe²⁺	• Batuan • Mineral
Tembaga	• Cu • Cu²⁺	• Sedimen geologis
Kobalt	• Co⁺ • Co²⁺	• Sedimen geologis
Nikel	• Ni	• Sedimen geologis
Molibdenum	• Mo	• Sedimen geologis

Sumber: (Talaro and Chess, 2012; Tortora, Funke and Case, 2013; J. Willey, Sandman and Wood, 2023)

Unsur Seng (Zn) dan Mangan (Mn) digunakan untuk mengaktifkan enzim tertentu. Unsur Mangan (Mn) adalah unsur pengaktif banyak enzim, komponen superoksida dismutase tertentu dan enzim pemecah air untuk menghasilkan oksigen. Seng (Zn) digunakan sebagai kofaktor enzim untuk mengatur genetika seperti pembentukan RNA dan DNA polimerase dan

protein pengikat DNA lainnya. Besi (Fe) diperlukan untuk sintesis senyawa yang mengandung heme (seperti sitokrom yang digunakan untuk sistem transpor elektron) dan untuk mengaktifkan enzim tertentu. Besi juga termasuk unsur elemen yang esensial dan penting untuk struktur respirasi protein. Meskipun kebutuhan mikroba terhadap zat besi sedikit, kekurangan zat besi akan sangat menghambat pertumbuhannya (Black, 2012; Madigan *et al.*, 2012; Talaro and Chess, 2012).

Unsur Kobalt, Nikel, Tembaga, dan Molibdenum merupakan unsur yang diperlukan dalam jumlah kecil dan berfungsi sebagai kofaktor dalam enzim khusus di sistem sel mikroba, namun tidak seluruh mikroba dapat memanfaatkan sumber nutrisi dari unsur tersebut. Kobalt (Co) dibutuhkan oleh mikroba yang mampu mensintesis vitamin B12. Tembaga (Cu) berperan dalam respirasi, sintesis sitokrom C oksidase, sintesis enzim peroksidase, oksigenase dan nitrogenase. Molibdenum (Mo) merupakan unsur yang diperlukan untuk sintesis enzim tertentu yang mengandung flavin, sintesis beberapa nitrogenase, reduktase nitrat, dan oksidase sulfit. Unsur Nikel (Ni) kebanyakan digunakan untuk aktivitas enzim hidrogenase; koenzim F430 dari metanogen, karbon monoksida dehidrogenase; dan sintesis enzim urease (Black, 2012; Madigan *et al.*, 2012; Talaro and Chess, 2012).

6.2.3 Respon terhadap keterbatasan nutrisi

Keberadaan nutrisi sangat penting untuk pertumbuhan mikroba. Apabila mikroba berada dalam kondisi lingkungan yang ekstrem seperti nutrisinya terbatas (limit), mikroba memiliki suatu mekanisme di dalam sel nya agar tetap dapat bertahan hidup. Mekanisme tersebut merupakan bentuk suatu respon yang diberikan oleh mikroba terhadap lingkungannya. Secara umum, respon seluler pertama oleh sel terhadap keterbatasan nutrisi adalah jalur respon Aklimatisasi. Bentuk bentuk respon aklimatisasi ini meliputi: Akuisisi, Mobilisasi, *Sparing* (penghematan) dan *Recycling* (Daur Ulang). Jalur aklimatisasi merupakan jalur yang dibutuhkan oleh mikroba sebab mampu

meningkatkan dan memaksimalkan perolehan nutrisi meskipun tersedia sangat terbatas (Merchant and Helmann, 2012).

Jalur Aklimatisasi melalui respon Akuisisi adalah jalur perolehan nutrisi yang mencakup hampir diseluruh jenis mikroba. Akuisisi adalah jalur induksi untuk mengakses beberapa sumber nutrisi yang bersifat penghalang sehingga hanya digunakan sebagai pilihan terakhir. Contohnya, penekanan fiksasi nitrogen oleh senyawa amonia. Saat sumber amonia dari lingkungan sudah mencukupi untuk sel mikroba melakukan proses fiksasi nitrogen, maka mikroba akan merespon dengan menekan akses sumber nutrisi amonia agar tidak berlebihan sehingga proses fiksasi nitrogen dapat berlangsung dan menghasilkan Nitrat dan Nitrit yang dibutuhkan oleh makhluk hidup. Melalui jalur ini, meskipun jumlah amonia sedikit (terbatas) di lingkungan, mikroba tetap mampu melakukan proses fiksasi nitrogen (Merchant and Helmann, 2012).

Jalur aklimatisasi melalui respon Mobilisasi adalah jalur yang membantu proses perolehan nutrisi dengan optimalisasi transport. Mobilisasi akan membantu memaksimalkan dan mengoptimalkan nutrisi untuk kinerja enzim seperti protease, nuklease dan berbagai proses enzim hidrolase. Jalur mobilisasi adalah jalur yang membantu dalam proses penyimpanan unsur atau energi. Nutrisi yang disimpan dalam jalur ini akan dikonsumsi oleh sel ketika diperlukan saat jumlah nutrisi dari lingkungan tersedia secara terbatas (defisiensi unsur nutrisi (Merchant and Helmann, 2012).

Jalur Aklimatisasi melalui respon *Sparing* (penghematan) terjadi ketika nutrisi tidak dapat diakses dari lingkungan dan simpanan nutrisi di dalam sel habis, maka mikroba akan melakukan mekanisme penghematan. Penghematan ini adalah respon yang diberikan agar sel mengurangi kebutuhan seluler dan membatasi serta menekan penggunaan nutrisi secara selektif. Mekanisme ini didasarkan pada mekanisme prioritas yaitu sel mikroba akan membedakan antara prioritas dan fungsi yang tinggi dengan rendah untuk kelangsungan hidupnya. Umumnya, unsur nutrisi yang dihemat adalah ketika keterbatasan makro nutrien Fosfor (P) dan Sulfur (S) serta mikro

nutrien di lingkungan. Penghematan ini dilakukan agar sel tetap dapat melaksanakan fungsinya dengan baik meskipun kondisi nutrisi di lingkungan terbatas. Respon penghematan akan membentuk jalur-jalur alternatif yang bisa menggantikan jalur utama, namun fungsi nya tetap sama (Merchant and Helmann, 2012).

Jalur Aklimatisasi dengan *Recycling* (Daur ulang) unsur adalah respon yang mekanismenya sulit dilakukan karena harus menghilangkan unsur yang dibutuhkan. Selain melalui respon penghematan karena terbatasnya unsur nutrisi, respon daur ulang ini juga dapat dilakukan ketika keberadaan unsur nutrisi terbatas. Strategi yang digunakan adalah melalui degradasi komponen seluler utama seperti protein, kompleks ribosom, bahkan DNA. Tujuan degradasi ini adalah untuk memulihkan nutrisi yang tersimpan di dalam komponen seluler sehingga akan terbentuk baru kemudian dapat digunakan kembali seperti sistem daur ulang (Merchant and Helmann, 2012).

6.3 Kultur Organisme

Perkembangan kultur organisme seperti mikroba telah berkembang sejak zaman Pasteur dan Koch yang merupakan ahli mikrobiologi. Kultur mikroba merupakan proses menumbuhkan mikroba (bakteri, jamur, virus) dalam suatu media pertumbuhan. Spesies mikroba dapat dikulturkan di dalam laboratorium dengan meniru dan menyesuaikan lingkungan alam (habitat aslinya). Oleh karena itu, media pertumbuhan yang digunakan dalam proses kultur di laboratorium harus memuat sumber-sumber nutrisi yang diperlukan agar mikroba tumbuh sehingga dapat dilakukan identifikasi spesies mikroba. Kultur mikroba hanya mungkin dilakukan ketika tersedia media yang cocok dan sesuai. Nutrisi pada media kultur akan diserap ke dalam sel mikroba (Pommerville, 2011; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).

Media kultur dapat berupa campuran nutrisi padat (*solid*) dan cair (*broth*). Media kultur harus memuat seluruh faktor pertumbuhan yang dibutuhkan mikroba. Setelah nutrisi, faktor pertumbuhan lain yang harus ada di media adalah pH,

kelembaban, dan tingkat oksigen. Meskipun seluruh mikroba membutuhkan sumber energi dan sumber nutrisi (makro nutrien, mikro nutrien), mikroba memiliki masing-masing komposisi yang tepat di dalam media bergantung pada spesies apa yang akan dikulturkan. Artinya. Setiap spesies mikroba memiliki berbagai macam kebutuhan nutrisi masing-masing berbeda sehingga komposisi pada media kultur (pertumbuhan) punya komposisi yang tidak sama. Sebaiknya, sebelum menumbuhkan (mengkulturkan) mikroba, perlu mengetahui kondisi habitat asli (lingkungan asal) mikroba karena bermanfaat dalam penentuan dan pemilihan media yang sesuai dengan kebutuhan nutrisinya mencerminkan kondisi habitat asli (Pommerville, 2011; Betsy and Keogh, 2012; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023)

Selain untuk mengidentifikasi spesies tertentu, media kultur juga dapat didesain untuk memfasilitasi pertumbuhan hanya untuk satu jenis mikroba saja dalam suatu sampel dari alam. Kita dapat menambahkan senyawa kimia tertentu seperti antibiotik hingga darah atau serum darah ke dalam media kultur untuk keperluan isolasi dan identifikasi mikroba. Ketika menggunakan media kultur, media harus dalam kondisi steril. Media steril yang digunakan tidak mengandung organisme hidup. Hal ini bertujuan agar hanya mikroba yang ingin kita tumbuhkan saja yang didapatkan. Berbagai macam media kultur tersedia untuk pertumbuhan mikroba di Laboratorium. Media kultur terus-menerus sedang dikembangkan sampai saat ini untuk penggunaan identifikasi dan isolasi bakteri dalam studi dan penelitian di bidang analisis mikrobiologi makanan, mikrobiologi air, mikrobiologi tanah, mikrobiologi tumbuhan (asosiasi mikroba-tumbuhan, dan mikrobiologi medis, mikrobiologi industri dan lainnya (Pommerville, 2011; Betsy and Keogh, 2012; Tortora, Funke and Case, 2013; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).

6.3.1 Tipe media kultur mikroba

Media kultur untuk isolasi dan identifikasi mikroba secara mendasar dapat diklasifikasikan menjadi 2 tipe (tabel 6.3). Klasifikasi tipe media kultur berdasarkan tipe komposisi bahan kimia dan tipe fisik Tipe media kimia yaitu media yang berdasarkan komposisi bahan kimia dapat disebut juga sebagai media kimia sintetik. Apabila menggunakan media tipe ini, seluruh komposisi dan jumlah bahan kimia dapat diketahui termasuk rumus kimia dari sumber nutrisi bahan kimianya. Media tipe ini dapat berupa media cair maupun media padat seperti agar. Sumber nutrisi yang digunakan sebagai komposisi media sintetik seperti (tabel 6.3): media dengan glukosa sebagai sumber karbon dan garam amonium sebagai sumber nitrogen, natrium klorida, magnesium sulfat, Kalium fosfat, dan air. Media kimia sintetik banyak digunakan untuk menentukan kebutuhan pertumbuhan spesifik dari mikroba (Pommerville, 2011; Black, 2012; J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023).

Tipe media kompleks adalah media yang mengandung setidaknya satu bahan komposisi kimia non spesifik seperti pepton, ekstrak daging (*meat extract*), atau ekstrak ragi (*yeast extract*) (Tabel 6.3). Pepton berfungsi sebagai sumber karbon, energi, dan nitrogen. Ekstrak daging sapi dan ekstrak ragi adalah ekstrak yang mengandung asam amino, peptida, nukleotida, asam organik, vitamin dan mineral. Ekstrak ragi adalah sumber vitamin serta sumber senyawa nitrogen dan karbon. Media kompleks bermanfaat karena satu media yang kompleks mampu memenuhi semua kebutuhan nutrisi banyak mikroba yang berbeda. Selain itu, sering kali kita tidak mengetahui nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroba tertentu. Sehingga, dengan adanya media kompleks ini, maka setidaknya mikroba yang akan ditumbuhkan tetap dapat hidup meskipun sumber nutrisinya minimal (sederhana). Media kompleks ini juga dapat digunakan untuk kondisi mikroba yang memiliki persyaratan kebutuhan nutrisi yang rumit, atau mikroba yang sulit tumbuh. Media yang kompleks umumnya banyak digunakan dalam laboratorium pengajaran karena tujuannya hanya untuk menumbuhkan mikroba dan tidak memperhatikan tentang nutrisi spesifiknya secara mendetail

(Pommerville, 2011; Black, 2012; J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023).

Tabel 6.3. Tipe media kultur

Tipe Media	Bahan-Bahan
Media Kimia Sintetik	• Glukosa • Amonium fosfat ((NH₄)₂HPO₄) • Natrium Klorida (NaCl) • Magnesium sulfat (MgSO₄·7H₂O) • Kalium fosfat (K₂HPO₄) • Air • Agar (jika media padat)
Media Kompleks	• Pepton • Ekstrak daging (<i>meat extract</i>) • Ekstrak ragi (<i>yeast extract</i>) • Natrium klorida (NaCl) • Air • Agar (jika media padat)

Sumber: (Pommerville, 2011; J. Willey, Sandman and Wood, 2023)

6.3.2 Media kultur fungsional

Penggunaan media di Laboratorium seringkali media pertumbuhan dimodifikasi untuk tujuan tertentu seperti mengisolasi, mengidentifikasi dan memberikan informasi yang cepat dan penting tentang mikroba penyebab infeksi atau penyakit. Media kultur mikroba berdasarkan fungsi nya dapat dibagi menjadi 3 kategori yaitu: media selektif (*selective medium*), media diferensial (*differential medium*), dan media pengayaan (*enrichment medium*). Adapun komponen dan penggunaan media dapat ditunjukkan pada Tabel 6.4 (Pommerville, 2011; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).

Media selektif (*selective medium*) adalah media yang memungkinkan pertumbuhan mikroba tertentu tetapi menghambat pertumbuhan mikroba lain. Artinya, media ini

bersifat selektif sehingga bahan-bahan yang ada di dalamnya mengandung bahan yang mampu menghambat mikroba tertentu. Apabila menggunakan media selektif ini, maka hanya mikroba yang kita inginkan saja yang dapat tumbuh sedangkan mikroba lain akan terhambat dan tidak akan tumbuh di media. Contoh penggunaan media selektif ini adalah untuk mengidentifikasi infeksi bakteri *Clostridium botulinum* di sampel makanan yang diduga merupakan agen penyebab keracunan makanan. Media selektif yang digunakan adalah media agar SPS agar (Sulfit Polimiksin Sulfadiazin). Media tersebut memungkinkan pertumbuhan dari bakteri *Clostridium botulinum* sekaligus menghambat pertumbuhan sebagian besar spesies *Clostridium* lain maupun spesies bakteri lainnya. Contoh lainnya, adalah penggunaan Media agar SS (Agar Salmonella-Shigella) untuk mendeteksi keberadaan spesies Salmonella sp. dan Shigella sp. Media ini, bersifat selektif, apabila dalam sampel mengandung bakteri Salmonella sp. atau Shigella sp. maka warna koloni bakteri yang ditumbuhkan pada media akan berwarna hitam (Gambar 6.1) (Leboffe and Pierre, 2011; Pommerville, 2011; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).



Gambar 6.1. Agar SS (*Salmonella-Shigella* agar)
(Sumber : (Leboffe and Pierre, 2011))

Media diferensial (*differential medium*) adalah media yang memanfaatkan sifat-sifat biokimia dari mikroba target. Media diferensial mampu menunjukkan perubahan nyata ketika

mikroba target tumbuh serta membantu untuk mengidentifikasi dan menganalisis proses biokimia atau metabolisme mikroba yang tumbuh di dalam media kultur. Berbeda dengan media selektif, media diferensial tidak akan membunuh / menghambat mikroba non target, namun hanya menunjukkan bahwa yang tumbuh adalah mikroba target melalui kemampuan biokimianya. Media diferensial mengandung bahan atau bahan kimia tertentu yang memungkinkan kita dapat membedakan secara visual spesies mana yang memiliki dan spesies mana yang tidak memiliki proses biokimia tertentu. Hal ini biasanya disebabkan adanya penambahan indikator perubahan warna, indikator pH atau gula, yang secara visual menunjukkan proses biokimia telah terjadi. Indikator tersebut akan memudahkan untuk membedakan secara visual koloni suatu mikroba dari koloni mikroba lain pada media kultur yang sama. Contoh media diferensial adalah Agar darah (*Blood agar*) yang merupakan media untuk membedakan spesies bakteri berdasarkan kemampuannya dalam memecah sel darah merah (Gambar 6.2). Bakteri hemolitik memiliki kemampuan untuk memecah sel darah merah, pada media agar darah akan menghasilkan zona bening di sekitar koloninya karena terdapat mekanisme penghancuran sel darah merah oleh bakteri. Sebaliknya, bakteri non hemolitik, tidak akan membentuk zona bening di sekitar koloni karena tidak terjadi mekanisme penghancuran sel darah. Media diferensial dapat digunakan dalam berbagai situasi, terutama di sektor medis karena biasanya digunakan untuk mengidentifikasi sifat-sifat spesies bakteri tertentu yang diketahui bersifat patogen dan berbahaya bagi manusia (Pommerville, 2011; Betsy and Keogh, 2012; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).



Gambar 6.2. Agar darah (*Blood Agar*)
(Sumber :J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023))

Tabel 6.4. Tipe media kultur fungsional

Media	Komponen	Penggunaan	contoh
Media Selektif	• Stimulasi pertumbuhan • Penghambat pertumbuhan	Memilih mikroba tertentu (selektif)	• Agar garam mannitol (deteksi <i>Staphylococcus</i>) • Agar Salmonella-Shigella (deteksi <i>Salmonella sp.</i> Dan <i>Shigella sp.</i>)
Media Diferensial	• Pewarna • Stimulasi pertumbuhan	Membedakan mikroba yang berbeda dalam suatu campuran	• Agar MacConkey (Deteksi bakteri negatif) • Agar darah (deteksi bakteri patogen, hemolitik)
Media Pengayaan	• Stimulasi pertumbuhan	Mengulturkan mikroba yang sulit ditumbuhkan	• Agar coklat (deteksi bakteri <i>Neisseria sp.</i>)

Sumber: (Pommerville, 2011; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023)

Media pengayaan / media yang diperkaya (*enrichment medium*) merupakan media mengandung nutrisi yang dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan berbagai macam organisme mikroba. Media pengayaan mengandung nutrisi khusus yang mendukung pertumbuhan mikroba tertentu yang kemungkinan tidak hidup dalam jumlah yang cukup pada suatu media sehingga sulit untuk dilakukan isolasi dan identifikasi. Berbeda dengan media selektif, media pengayaan tidak menekan ataupun menghambat yang lain. Artinya, media pengayaan ini digunakan ketika suatu bakteri sukar / sulit untuk tumbuh pada suatu media tertentu, atau dapat tumbuh namun jumlahnya sedikit dan memiliki sifat patogen berbahaya. Sehingga, keberadaan media pengayaan adalah untuk memberikan dukungan nutrisi tertentu pada bakteri / mikroba sehingga proses tumbuhnya menjadi lebih cepat. Misalnya, bakteri *Salmonella typhi* mungkin tidak mencukupi banyak dalam sampel tinja untuk memungkinkan hasil identifikasi positif. Bakteri kemudian dikultur pada media yang mengandung unsur Se (selenium), yang mendukung pertumbuhan bakteri. Setelah diinkubasi dalam media pengayaan, jumlah bakteri *Salmonella typhi* menjadi lebih besar atau meningkat sehingga identifikasi menghasilkan positif. Contoh media pengayaan adalah media agar coklat (Gambar 6.3) untuk membantu mendeteksi kelompok spesies bakteri *Neisseria* sp. yang merupakan bakteri penyebab penyakit infeksi gonore, menular secara seksual. Bakteri ini ditumbuhkan pada media agar coklat, yaitu media agar darah yang sudah dipanaskan hingga suhu 80 °C, kemudian warna agar berubah menjadi coklat. Media agar coklat banyak digunakan untuk menumbuhkan bakteri patogen yang berbahaya (Pommerville, 2011; Betsy and Keogh, 2012; Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).



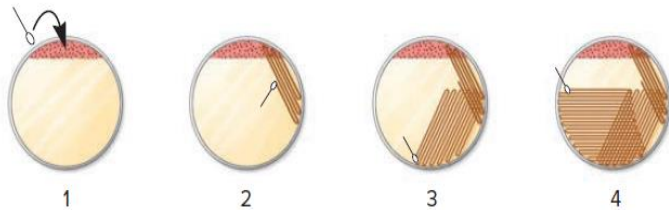
Gambar 6.3. Agar Coklat (*Chocolate agar*)
(Sumber : (J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023))

6.3.3 Metode kultur mikroba

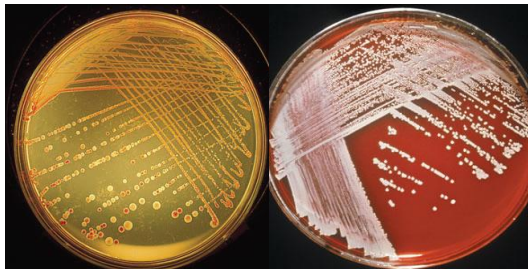
Teknik untuk mendapatkan kultur murni telah banyak dilakukan melalui beberapa metode. Isolasi mikroba dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kultur murni dari sampel. Kultur murni dapat diperoleh melalui metode *streak plate* (lempeng / cawan gores), *spread plate* (lempeng / cawan sebar), dan *pour plate* (lempeng/ cawan tuang). Ketiga metode tersebut memiliki kelebihanannya masing-masing dalam memperoleh kultur murni. Para mikrobiologis dapat menggunakan ketiga metode tersebut sesuai dengan kebutuhan analisa nya (Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).

Metode *streak plate* (lempeng / cawan gores) adalah metode untuk memperoleh kultur murni menggunakan teknik goresan pada agar padat di cawan. Bakteri diambil menggunakan jarum oose (loop) steril kemudian diinokulasikan di sepanjang permukaan agar sehingga akan meninggalkan garis-garis goresan bakteri di permukaan agar. Goresan bakteri tersebut membentuk beberapa pola (Gambar 6.4). Sektor (kuadran) pertama adalah jalur goresan awal dari inokulasi bakteri. Selanjutnya, jarum oose (loop) disterilkan kemudian digores kembali dengan cara diusap pada garis dari goresan pertama sehingga akan diperoleh sektor (kuadran) kedua. Proses ini berlanjut hingga pada sektor (kuadran) ketiga hingga sektor (kuadran) keempat. Berdasarkan

metode ini, jumlah bakteri akan terdilusi (berkurang) seiring dengan digoresnya pada setiap sektor. Setelah itu, cawan diinkubasi pada suhu pertumbuhan yang sesuai. Sel tunggal yaitu sel kultur murni akan tumbuh dan berada di permukaan agar pada sektor paling akhir (kuadran keempat) karena sudah menjadi koloni yang terpisah (Gambar 6.5) (Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).



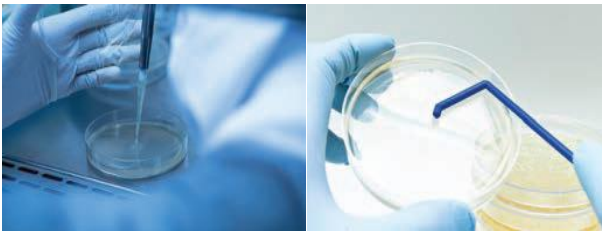
Gambar 6.4. Tahapan metode *Streak plate*
(Sumber : (J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023))



Gambar 6.5. *Streak plate* pada media agar
(Sumber : (Black, 2012; J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023))

Metode *spread plate* (lempeng / cawan sebar), dan Metode *pour plate* (lempeng/ cawan tuang) keduanya memiliki kesamaan yaitu sampel sel (kultur) bakteri diencerkan terlebih dahulu sebelum dipisahkan secara spasial untuk memperoleh kultur murni. Perbedaan keduanya, yaitu pada metode *spread plate* (lempeng / cawan sebar), sel (kultur) bakteri disebarkan pada permukaan agar, sedangkan pada metode *pour plate* (lempeng/ cawan tuang), kultur bakteri dimasukkan lebih dahulu pada cawan steril kosong, lalu media agar dituang ke dalamnya. Kedua metode tersebut dapat digunakan untuk menentukan jumlah

mikroba dalam sebuah sampel. Metode *spread plate* dilakukan dengan menginokulasikan kultur di bagian tengah permukaan media agar secara merata, kemudian disebarakan dengan bantuan batang bengkok (*spreader*) steril (Gambar 6.6). Sel akan berkembang menjadi koloni pada hasil sebaran di permukaan setelah diinkubasi (Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).



Gambar 6.6. Tahapan metode *Spread plate*
(Sumber : (J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023))



Gambar 6.7. *Spread plate* pada media agar
(Sumber : (J. M. Willey, Sandman and Wood, 2023))

Metode *pour plate* (lempeng/ cawan tuang) banyak digunakan untuk memperoleh kultur murni dari bakteri, archaea, dan jamur. Metode ini bermanfaat ketika mengambil sampel populasi mikroba yang heterogen. Kekurangan metode *pour plate* dibandingkan dengan *spread plate* yaitu kemungkinan akan menghasilkan koloni mikroba yang tumbuh melebihi permukaan agar (koloni tumbuh di dalam atau di bagian bawah agar). Hal ini terjadi karena kultur bakteri dimasukkan lebih dahulu kemudian

media agar dituang. Mengatasi hal tersebut, maka umumnya sampel diencerkan lebih dulu secara serial untuk mengurangi populasi mikroba sehingga mikroba yang tumbuh adalah secukupnya dan mendapatkan koloni terpisah (Black, 2012; J. Willey, Sandman and Wood, 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Betsy, T. and Keogh, J. 2012. Microbiology DeMYSTiFieD, 2nd Edition. United States of America: McGraw-Hill.
- Black, J.G. 2012. Microbiology: Principle And Explorations 8th Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Hoffman, B.M. et al. 2014. Mechanism of nitrogen fixation by nitrogenase: The next stage. *Chemical Reviews*, 114(8), pp. 4041–4062. Available at: <https://doi.org/10.1021/cr400641x>.
- Leboffe, M.J. and Pierre, B.E. 2011. A Photographic Atlas for the Microbiology Laboratory 4th Edition. United States of America: Morton Publishing.
- Madigan, M.T. et al. 2012. Brock Biology of Microorganisms. San Fransisco: Benjamin Cummings.
- Merchant, S.S. and Helmann, J.D. 2012. Elemental Economy. Microbial Strategies for Optimizing Growth in the Face of Nutrient Limitation, *Advances in Microbial Physiology*. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398264-3.00002-4>.
- Pommerville, J.C. 2011. Alcamo's fundamentals of microbiology 9th Edition. United States of America: Jones and Bartlett Publishers.
- Talaro, K.P. and Chess, B. 2012. Foundations in Microbiology 8th Edition. New York: McGraw-Hill.
- Tortora, G.J., Funke, B.R. and Case, C.L. 2013. Microbiology: An Introduction. United States of America: Pearson Education.
- Wiley, J., Sandman, K. and Wood, D. 2023. Prescott's Microbiology 12th Edition. New York: McGraw-Hill.

BAB 7

PERTUMBUHAN MIKROORGANISME

Oleh Nur Faidah Munir

7.1 Pendahuluan

Mikrobiologi adalah salah satu ilmu biologi yang paling umum digunakan, namun mikrobiologi baru menjadi ilmu sejati pada akhir abad ke-19. Mikrobiologi adalah studi tentang mikroba, yaitu organisme yang terlibat terlalu kecil untuk dapat diamati dengan baik. Mikroorganisme adalah organisme hidup yang biasanya terlalu kecil untuk diamati di lingkungannya. Mikroorganisme adalah organisme dengan diameter 1 mm atau kurang, dan umumnya dijumpai dalam mikrobiologi. Kebanyakan mikroorganisme hanya berukuran beberapa ribu mikrometer, sehingga hanya dapat dilihat menggunakan mikroskop. Mikrobiologi merupakan bidang ketiga dalam biologi, karena mikroba tidak dapat dilihat dengan mata manusia dan memerlukan prosedur khusus untuk mempelajarinya.

Mikroorganisme membutuhkan energi dan sumber daya mentah untuk mensintesis komponen biologis. Ketika bakteri diberi nutrisi dan keadaan yang tepat, mereka secara aktif melakukan metabolisme dan berkembang biak. Pertumbuhan dapat digambarkan sebagai peningkatan jumlah sel. Pertumbuhan mikroba memiliki dua tahap yang berbeda. Fase pertama mencakup sintesis komponen seluler baru serta pertumbuhan ukuran sel, sedangkan fase kedua melibatkan peningkatan jumlah sel dalam populasi. Karena mikroorganisme memiliki umur yang terbatas, mereka berkembang biak untuk menjamin kelangsungan hidupnya. Pengamatan pertumbuhan pada makhluk multiseluler seperti hewan, tumbuhan, dan manusia dapat dilakukan dengan mengamati secara langsung pertambahan ukuran tubuh individu. Namun, karena mikroba adalah organisme bersel tunggal, ukuran selnya sangat kecil. Ukuran ini memungkinkan pandangan langsung ke sel.

7.2 Pengukuran Konsentrasi Mikroba

Konsentrasi mikroba dapat dinyatakan sebagai konsentrasi sel (jumlah sel yang hidup per satuan volume kultur) atau konsentrasi biomassa (berat kering sel per satuan volume kultur). Kedua metrik ini mungkin tidak selalu berkorelasi karena rata-rata berat kering sel bervariasi menurut tahap kultur. Mereka juga memiliki arti berbeda; misalnya, konsentrasi sel penting dalam studi genetika dan inaktivasi mikroba, sedangkan biomassa sangat penting dalam studi biokimia atau pemberian makan mikroba.

1. Jumlah Sel Hidup

Jumlah sel yang hidup biasanya dianggap sebagai metrik konsentrasi sel. Untuk melakukan hal ini, 1 ml kultur bakteri diekstraksi dan diencerkan sepuluh kali sebelum ditambahkan ke media agar yang sesuai. Bakteri (atau kumpulan bakteri) yang tidak terlihat akan berkembang menjadi koloni yang dapat dihitung. Pelat dengan 30-300 koloni memberikan data yang paling dapat diandalkan untuk analisis statistik. Jumlah unit pembentuk koloni (CFU) per mililiter suspensi bakteri murni dihitung dengan mengalikan jumlah pelat dengan faktor pengenceran (10). Dalam pendekatan ini, bakteri mati dalam suspensi tidak berpengaruh pada jumlah bakteri akhir.

2. Kekeruhan

Kekeruhan mengacu pada kekeruhan suatu cairan yang dihasilkan oleh sejumlah besar partikel individu yang seringkali tidak terlihat oleh mata manusia. Dalam sebagian besar keadaan, pengukuran fotolistrik terhadap kekeruhan budidaya dapat dibandingkan dengan penilaian keberlanjutan berbasis kurva standar. Sebagai alternatif, perkiraan visual kadang-kadang dapat dibuat: Misalnya, suspensi *Escherichia coli* yang hampir keruh memiliki sekitar 10⁷ sel per mililiter, sedangkan suspensi yang agak keruh mengandung sekitar 10⁸ sel per mililiter. Hubungan antara kekeruhan dan masa hidup dapat berubah selama

perkembangan dan kematian. Sel mungkin kehilangan viabilitasnya tanpa menimbulkan kekeruhan pada kultur.

3. Kepadatan Biomassa

Pada prinsipnya biomassa dapat dinilai secara langsung dengan menimbang kultur mikroba setelah dicuci dengan air suling. Faktanya, pendekatan ini bermasalah, jadi para peneliti biasanya membuat kurva standar yang menghubungkan berat kering dengan jumlah sel yang layak, berdasarkan rata-rata dari tiga pelat duplikat. Metode alternatif untuk memperkirakan kandungan biomassa mencakup pengukuran komponen seluler penting seperti protein atau menilai volume yang ditempati oleh sel yang dibebaskan dari suspensi.

7.3 Pertumbuhan Eksponensial

Tingkat Pertumbuhan Konstan

Laju perkembangan sel non-nutrisi berada pada urutan pertama: Laju pertumbuhan (diukur dalam gram biomassa yang dihasilkan per jam) adalah hasil kali waktu (t), laju pertumbuhan konstan (k), dan konsentrasi biomassa B :

$$\frac{dB}{dt} = kB \quad (1)$$

Persamaan penataan ulang (1) mengungkapkan bahwa konstanta laju pertumbuhan adalah laju sel menghasilkan sel baru:

$$k = \frac{Bdt}{dB} \quad (2)$$

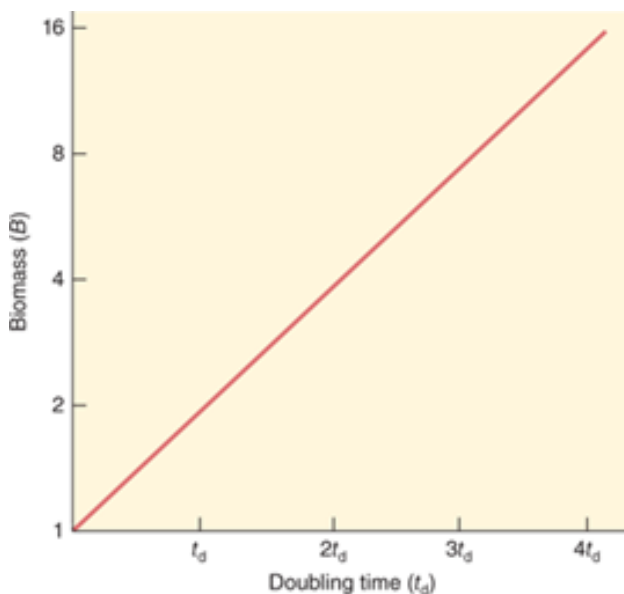
Konstanta laju pertumbuhan sebesar $4,3 \text{ J}^{-1}$ adalah salah satu yang tertinggi yang dilaporkan, yang menyiratkan bahwa setiap gram sel menghasilkan 4,3 g sel setiap jam selama masa pertumbuhan. Organisme yang tumbuh lebih lambat dapat memiliki laju pertumbuhan konstan serendah $0,02 \text{ J}^{-1}$. Pada laju

pertumbuhan yang konstan, setiap gram sel dalam kultur menghasilkan 0,02 g sel setiap jam.

Integrasi persamaan (2) menghasilkan

$$\ln = \frac{B_1}{B_0} = 2.3 \log^{10} = \frac{B^1}{B^0} = k(t^1 - t_0) \quad (3)$$

logaritma natural dari rasio B_1 (biomassa pada waktu 1 $[t_1]$) dengan B_0 (biomassa pada waktu nol $[t_0]$) sama dengan hasil kali konstanta laju pertumbuhan (k) dan perbedaan waktu ($t_1 - t_0$). Pertumbuhan yang mengikuti persamaan (3) dikatakan eksponensial karena biomassa meningkat secara eksponensial seiring waktu. Korelasi linier pertumbuhan eksponensial dibuat dengan memplot logaritma konsentrasi biomassa (B) sebagai fungsi waktu (t).



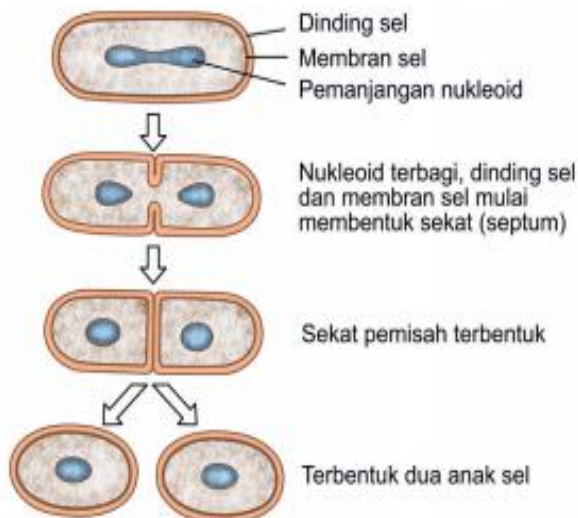
Gambar 7.1. Grafik biomassa versus waktu penggandaan yang menunjukkan pertumbuhan eksponensial linier yang akan terjadi dalam sistem tertutup. Biomassa (B) berlipat ganda pada setiap waktu penggandaan (t_d).

7.4 Pertumbuhan Mikroba

Reproduksi mikroba dapat bersifat seksual atau aseksual. Reproduksi aseksual pada bakteri sering terjadi melalui pembelahan biner, yang mana satu sel induk membelah menjadi dua sel anak, yang masing-masing melahirkan dua sel anak lagi, dan seterusnya. Bentuk reproduksi aseksual lainnya termasuk pembelahan ganda, fragmentasi, dan tunas.

7.5 Pembelahan Biner

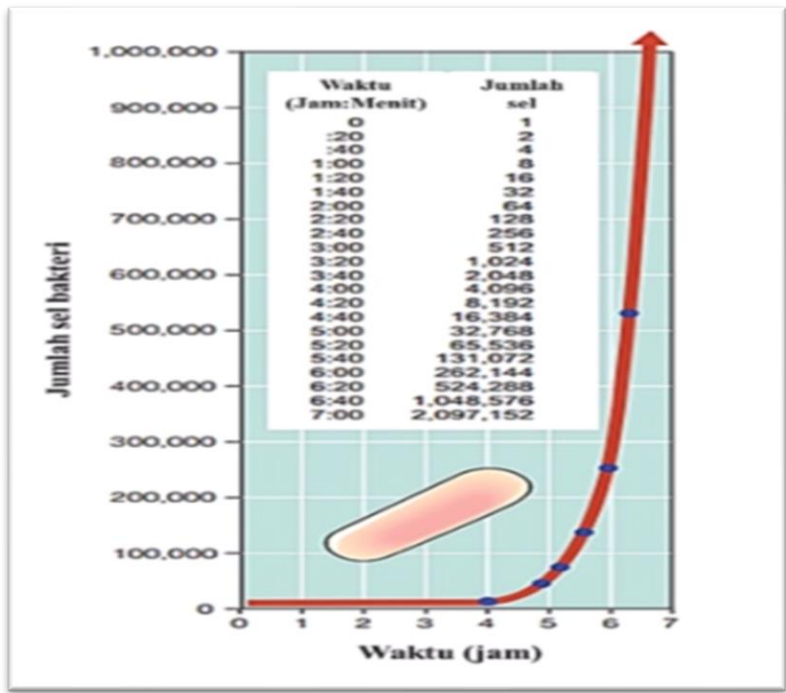
Proliferasi mikrobiologi bakteri didefinisikan sebagai peningkatan yang konsisten pada semua komponen kimia sel. Proliferasi sel merupakan hasil pertumbuhan, yang meningkatkan jumlah bakteri dalam suatu populasi atau budaya. Kebanyakan bakteri membelah menggunakan pembelahan biner, yang melibatkan pembelahan sel untuk menghasilkan dua sel anak yang identik dengan sel induk. Pertumbuhan bakteri dapat digambarkan sebagai jumlah sel yang dihasilkan ketika satu bakteri membelah menjadi dua, masing-masing menghasilkan empat, lalu delapan, dan seterusnya.



Gambar 7.2. Pembelahan Biner

7.6 Waktu Generasi

Waktu Generasi adalah jumlah waktu yang dibutuhkan bakteri untuk membuat dua sel anak dalam kondisi optimal. Kebanyakan bakteri berbahaya, termasuk E. coli, memiliki waktu pertumbuhan sekitar 20 menit. M. tuberculosis mempunyai waktu generasi yang lebih lama (20 jam) dan umur yang paling lama (20 hari). Kusta Bakteri ini berkembang biak dan berkembang biak dengan cepat, menghasilkan jutaan sel hanya dalam waktu 24 jam. Misalnya, dalam waktu sekitar 7 jam, E. coli dapat tumbuh 1 juta sel setelah 20 generasi, 1 miliar sel setelah 30 generasi, dan 1021 sel setelah 24 jam. Namun, dalam praktiknya, bakteri berhenti berkembang biak setelah pembelahan sel berulang kali karena penurunan nutrisi dan akumulasi produk berbahaya.



Gambar 7.3. Populasi Bakteri E.Coli Dengan Waktu Generasi 20 Menit
(Pommerville, 2011)

Pertumbuhan eksponensial mengacu pada perluasan populasi bakteri yang menggandakan jumlah sel dalam generasi tertentu seiring berjalannya waktu. Pertumbuhan sel bakteri secara eksponensial dapat dinyatakan secara matematis menggunakan garis geometris. Misalnya, jika satu sel membelah menjadi dua, persamaannya adalah $20 \rightarrow 21$. Pembagian dua sel menjadi empat dapat dinyatakan sebagai $21 \rightarrow 22$, misalnya. Jumlah sel dalam kultur. Persamaan di bawah ini menyatakan korelasi konstan antara jumlah awal dan jumlah sel setelah waktu pertumbuhan eksponensial.

$$N = N_0 2^n$$

Dalam persamaan ini, huruf N melambangkan jumlah sel akhir, N_0 melambangkan jumlah sel awal, dan n melambangkan jumlah generasi selama fase pertumbuhan eksponensial. Persamaan logaritma menghasilkan ekspresi $N = N_0 2^n$, yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai n sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N &= N_0 2^n \\ \log N &= \log N_0 + n \log 2 \\ \log N - \log N_0 &= n \log 2 \\ n &= \frac{\log N - \log N_0}{\log 2} = \frac{\log N - \log N_0}{0,301} \\ n &= 3,3 (\log N - \log N_0) \end{aligned}$$

Waktu generasi (g) suatu bakteri dapat ditentukan dengan membandingkan waktu pertumbuhan eksponensial (t) dengan jumlah generasi (n). Persamaan yang digunakan untuk menghitung waktu pembangkitan adalah $g = t/n$.

7.7 Jumlah Konsentrasi Bakteri

Mikroba dapat diukur sebagai (i) konsentrasi sel (jumlah sel yang dapat hidup per satuan volume kultur) atau (ii) konsentrasi biomassa (berat kering sel per satuan volume kultur). Jumlah bakteri pada waktu tertentu dapat dihitung dengan melakukan penghitungan total atau penghitungan tepat.

Jumlah total: Ini mencerminkan jumlah total bakteri dalam sampel, baik hidup atau mati. Hal ini dilakukan dengan menghitung bakteri di bawah mikroskop dengan ruang hitung atau mengukur pertumbuhannya dengan tabung opasitas biasa.

Jumlah yang layak: Ini biasanya mengacu pada jumlah bakteri yang hidup. Perhitungan ini dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan pengenceran atau pelapisan.

1. Metode pengenceran melibatkan inkubasi sejumlah tabung yang berisi media kultur cair dengan pengenceran sampel yang bervariasi, dan jumlah viabilitas diperkirakan berdasarkan jumlah tabung yang menunjukkan pertumbuhan bakteri.
2. Metode pelat sering digunakan dalam pengujian mikrobiologi udara untuk memperkirakan kadar koliform dalam air minum. Sejumlah kecil sampel diencerkan dan disebarkan ke permukaan cawan agar. Banyaknya koloni yang tumbuh setelah waktu inkubasi yang sesuai menunjukkan jumlah bakteri yang mampu bertahan.

7.8 Kurva Pertumbuhan

Kurva pertumbuhan Pertumbuhan bakteri melalui pembelahan biner dapat diwakili oleh kurva yang memuat logaritma jumlah sel dan waktu inkubasi. Fase pertumbuhan bakteri dibagi menjadi empat fase, yaitu fase lag (adaptasi), fase logaritmik (eksponensial), fase stasioner, dan fase kematian;

1. Fase Lag

Selama fase lag, bakteri beradaptasi dengan lingkungannya. Ini adalah tahap di mana bakteri menjadi matang tetapi tidak dapat membelah. Fase lag dari siklus perkembangan bakteri melibatkan pembuatan RNA, enzim, dan komponen lainnya. Perubahan sel minimal selama fase

lag karena sel tidak langsung bereplikasi di media baru. Fase lag adalah masa pembelahan sel yang sedikit atau tidak ada sama sekali yang dapat berlangsung antara satu jam hingga beberapa hari. Selama fase ini, sel tidak dalam keadaan dorman.

2. Fase Log

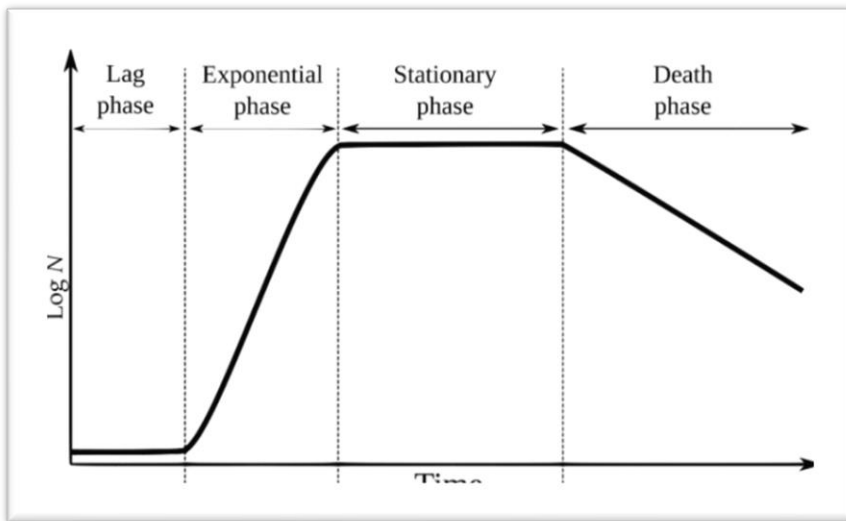
Fase ini ditandai dengan pertumbuhan sel yang cepat secara eksponensial (yaitu 1 hingga 2 hingga 4 hingga 8 dan seterusnya). Populasi bakteri berlipat ganda pada setiap generasi. Mereka bereproduksi dengan kecepatan maksimum. Sel bakteri berukuran kecil dan warnanya seragam. Mikroba sensitif terhadap kondisi buruk, seperti antibiotik dan agen antimikroba lainnya.

3. Fase Stasioner

Setelah fase log, pertumbuhan bakteri hampir berhenti total karena kekurangan nutrisi penting, kekurangan oksigen dalam air, perubahan pH medium, dll, dan akumulasi limbah metabolisme beracun mereka sendiri. Tingkat kematian bakteri melebihi tingkat replikasi bakteri. Endospora mulai terbentuk pada tahap ini. Bakteri menjadi variabel Gram dan menunjukkan pewarnaan tidak teratur. Banyak bakteri mulai memproduksi eksotoksin.

4. Fase Kematian

Selama fase kematian (fase penurunan), bakteri mati. Hal ini dapat disebabkan oleh kurangnya pola makan, suhu lingkungan yang berada di atas atau di bawah batas toleransi spesies, atau faktor stres lainnya.



Gambar 7.4. Kurva Pertumbuhan Bakteri

7.9 Pemeliharaan Sel Dalam Fase Eksponensial

Sel dapat dipertahankan dalam fase eksponensial dengan memindahkannya secara teratur ke media baru dengan komposisi yang sama saat sel masih tumbuh secara eksponensial. Hal ini dikenal sebagai pertumbuhan yang seimbang. Perangkat kultur berkelanjutan atau kemostat, dapat digunakan di laboratorium untuk menjaga pertumbuhan kultur secara seimbang dalam kisaran laju pertumbuhan tertentu. Perangkat ini terdiri dari bejana kultur dengan siphon luapan dan pompa pengukur atau katup yang mengalirkan media baru ke pasokan dengan kecepatan terkendali. Media dalam wadah kultur diaduk dengan aliran udara steril; setiap tetes media baru yang masuk menyebabkan setetes budaya tersedot keluar. Media dirancang sedemikian rupa sehingga nutrisi membatasi hasil pertumbuhan. Pembuluh darah terinfeksi, dan sel-sel tumbuh hingga nutrisi yang terbatas habis. Media segar dari persediaan kemudian dibiarkan mengalir pada suhu yang memungkinkan sel untuk menggunakan nutrisi terbatas segera setelah disediakan. Dalam kondisi ini, konsentrasi sel, yang diatur oleh konsentrasi nutrisi di dinding, tetap konstan, dan laju pertumbuhan berbanding

lurus dengan laju aliran medium. Budaya berkelanjutan lebih mirip dengan kondisi yang dihadapi organisme di habitat dunia nyata (seperti tubuh manusia), di mana sumber daya yang terbatas tersedia secara terus-menerus.

7.10 Pertumbuhan Biofilm

Banyak infeksi disebabkan oleh bakteri yang tidak berkembang sendiri (secara planktonik), melainkan dalam komunitas multiseluler yang kompleks dimana kumannya bersifat sesil. Koloni mikroba biasanya terbentuk di permukaan, oleh karena itu disebut "biofilm". Misalnya, kita menyikat gigi setiap hari untuk menghilangkan biofilm bakteri yang terbentuk saat kita tidur. Demikian pula, biofilm telah dikaitkan dengan *Streptococcus viridians* pada katup jantung, infeksi paru-paru *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* pada kateter, kolonisasi *Legionella pneumophila* pada sistem air rumah sakit, dan banyak lagi. Di alam, biofilm seringkali terdiri dari banyak spesies mikroba. Memahami pembentukan biofilm bakteri menjadi elemen mikrobiologi medis yang lebih penting.

Produksi biofilm dipicu oleh berbagai tekanan, dan kedua bakteri memberikan respons yang berbeda terhadap sinyal-sinyal ini. Biofilm dimulai dengan satu bakteri yang menempel pada suatu permukaan, yang kemudian mengalami pembelahan biner dan akhirnya membentuk komunitas bakteri keturunan yang erat. Terakhir, populasi bakteri ini membentuk cangkang glikokaliks untuk melindungi dirinya dari lingkungan. Glycocalyx juga membantu menjaga komunitas biofilm tetap utuh. Bakteri dalam biofilm menghasilkan bahan kimia kecil, seperti homoserin lakton, yang diambil oleh bakteri tetangga dan berfungsi sebagai sistem "telekomunikasi" koloni, yang menginstruksikan masing-masing bakteri untuk mengaktifkan gen tertentu pada saat tertentu (penginderaan kuorum). Sinyal-sinyal ini disebut sebagai sensor kuorum. Secara konseptual, teknik produksi biofilm masuk akal. Hal ini mendorong lebih banyak keragaman metabolik. Bakteri di tepi biofilm, misalnya, mungkin memiliki akses lebih besar terhadap oksigen dan

sumber daya lain dibandingkan bakteri yang berada di bagian dalam film.

Sel kekebalan atau obat-obatan dapat melindungi sel-sel di dalam tubuh dari predasi. Bakteri yang berikatan erat mungkin dapat mentransmisikan gen secara efisien, sehingga menghasilkan plastisitas fenotipik yang lebih besar dibandingkan sel planktonik. Semua variabel ini sulit untuk dimodelkan secara statistik, oleh karena itu pertumbuhan biofilm dibandingkan dengan pertumbuhan kultur batch. Ini adalah aspek penting dari mikrobiologi medis yang harus dipelajari dalam konteks penularan penyakit.

7.11 Definisi Dan Pengukuran Dari Kematian

Arti Kematian Bakteri

Bagi sel mikroba, kematian berarti hilangnya kemampuan bereproduksi (tumbuh dan membelah) secara permanen. Dengan pengecualian organisme VBMC yang dijelaskan sebelumnya, uji empiris tingkat kematian adalah kultur sel pada media padat: Sebuah sel dianggap mati jika tidak menghasilkan koloni yang cukup. Tentu saja reliabilitas tes ditentukan oleh media dan kondisi yang digunakan. Pertimbangkan sebuah akulturasi di mana 99% sel tampak "mati". Kemampuan untuk membangun koloni pada satu media mungkin terbukti benar-benar layak ketika diuji pada media lain. . Selain itu, menutup sampel secara langsung mungkin membuat beberapa sel hidup tidak dapat dideteksi dalam spesimen klinis berukuran besar karena cairan sampel dapat menghambat pertumbuhan mikroba. Dalam beberapa keadaan, sampel mungkin perlu diencerkan terlebih dahulu dalam media cair untuk memungkinkan pertumbuhan sel yang layak sebelum pelapisan. Kondisi inkubasi pada jam-jam awal setelah pengobatan juga penting dalam menentukan "pembunuhan". Misalnya, jika sel bakteri terkena radiasi ultraviolet lemah dan kemudian langsung ditempelkan pada media apa pun, 99,99% di antaranya mungkin telah terbunuh. Jika sel disinari pertama kali dibiakkan dalam kondisi yang sesuai selama 20 menit, pelapisan hanya menghasilkan 10% kematian. Dengan kata lain, iradiasi menyebabkan sel "mati" jika segera

ditutup, namun tetap hidup jika dibiarkan memperbaiki kerusakan radiasi sebelum pelapisan. Sel mikroba yang tidak terganggu secara fisik hanya akan dianggap "mati" dalam kondisi yang digunakan untuk menilai kelangsungan hidup.

Pengukuran Kematian Bakteri

Ketika bekerja dengan mikroorganisme, kita biasanya mengukur kematian suatu populasi, bukan sel individu. Ini adalah masalah statistik. Dalam lingkungan apa pun yang dapat menyebabkan kematian sel, kemungkinan kematian sel tertentu tetap konstan per satuan waktu. Misalnya, jika suatu kondisi digunakan yang menyebabkan 90% sel mati dalam 10 menit pertama, kemungkinan satu sel mati dalam jangka waktu tersebut adalah 0,9. Dengan demikian, 90% sel yang bertahan hidup diperkirakan akan mati setiap interval 10 menit berturut-turut, sehingga memungkinkan terbentuknya kurva kematian. Jumlah sel yang mati dengan selamat dalam setiap interval waktu merupakan fungsi dari jumlah orang saat ini, sehingga kematian populasi terjadi sebagai proses eksponensial menurut rumus umum:

$$S=S_0e^{-kt}$$

S_0 adalah jumlah manusia yang bertahan pada waktu nol, dan S adalah jumlah manusia yang bertahan pada waktu t . Saat memplot pecahan $\ln (S/S_0)$ dari waktu ke waktu, angka kematian eksponensial diwakili oleh $-k$, serupa dengan pertumbuhan eksponensial. Kinetika kematian sel bakteri juga ditentukan oleh jumlah target yang harus dicapai suatu agen untuk membunuh mikroba planktonik tertentu. Misalnya, satu "pukulan" dapat menargetkan kromosom haploid atau membran sel bakteri. Sebaliknya, sel dengan beberapa salinan target yang dinonaktifkan menampilkan kurva multihit.

7.12 Pengendalian Lingkungan Pertumbuhan Mikroba

Sifat kuat dari perkembangan mikroba yang tidak terkendali jelas merupakan ancaman bagi keberadaan manusia.

Untuk hidup bersama dengan bakteri, spesies yang lebih tinggi harus mengatur pertumbuhannya. Kita manusia mencapai hal ini melalui biologi, memanfaatkan sistem kekebalan tubuh dan kekuatan nutrisi. Kami juga menggunakan cara fisik untuk menghindari kuman. Sterilisasi, desinfeksi, pasteurisasi, dan aseptik adalah istilah-istilah yang harus dipahami sebelum dapat dikomunikasikan dengan benar. Untuk mengilustrasikan pentingnya memahami kata-kata ini, kami mengacu pada sterilisasi sebagai tindakan menghilangkan semua organisme, termasuk spora, khususnya sediaan. Memahami gagasan ini sangat penting terutama untuk instrumen bedah, karena spora tidak ingin masuk ke lokasi bedah. Sebaliknya, "mendisinfeksi" peralatan ini hanya dapat menghilangkan sel vegetatif, bukan spora. Selain itu, "membersihkan" instrumen secara fisik tidak serta merta menghilangkan seluruh sel vegetatif dan spora, namun meminimalkan beban biologis pada instrumen.

7.13 Strategi Pengendalian Bakteri Pada Pttingkat Lingkungan

Dalam mikrobiologi medis, pengendalian antibiotik terhadap kuman yang menginfeksi manusia biasanya dianggap sebagai standar emas untuk mengobati penyakit. Meskipun hal ini benar, garis pertahanan pertama adalah mencegah infeksi. Misalnya, tetanus pada bayi baru lahir menyebabkan sekitar 240.000 kematian di seluruh dunia setiap tahunnya. Meskipun penyakit ini sangat jarang terjadi di negara-negara industri, banyak negara berkembang tidak memiliki sarana untuk "mensterilkan" instrumen (selain vaksinasi tetanus rutin). Jika metode ini diterapkan dengan benar di daerah pedesaan, prevalensi penyakit ini dapat dikurangi secara signifikan. Oleh karena itu, seseorang harus memahami antara lain proses sterilisasi, desinfeksi, dan pasteurisasi. Teknik untuk mengurangi infeksi mikroba harus dipahami pada tingkat mekanisme kerjanya sebelum dapat diterapkan pada kondisi yang tepat.

7.14 Mekanisme Umum Tindakan Biosida Gangguan pada Membran atau Dinding Sel

Membran sel bekerja sebagai penghalang selektif, memungkinkan beberapa molekul terlarut lewat sementara molekul lainnya tidak termasuk. Banyak bahan kimia secara aktif diangkut melalui membran dan terkonsentrasi di dalam sel. Membran juga mengandung enzim yang terlibat dalam pembuatan komponen selubung sel. Zat yang terakumulasi pada permukaan sel dapat mengubah sifat fisik dan kimia membran, mempengaruhi fungsi normalnya dan membunuh atau menekan sel. Dinding sel berfungsi sebagai struktur korset (paling baik digambarkan sebagai jaring ikan) yang melindungi sel dari osmotiklisis. Lisis sel dapat disebabkan oleh obat yang mengganggu ikatan silang peptidil (misalnya penisilin).

Denaturasi Protein

Denaturasi protein Protein ada dalam bentuk terlipat dan dicirikan dalam tiga dimensi terutama oleh interaksi nonkovalen intramolekul seperti ikatan kovalen ionik, hidrofobik, dan hidrogen atau disulfida. Keadaan ini dikenal sebagai struktur tersier protein, dan mudah terganggu oleh berbagai keadaan fisik (misalnya panas) atau bahan kimia (misalnya alkohol), menyebabkan protein yang rusak menjadi tidak berfungsi. Denaturasi protein mengacu pada gangguan struktur tersier protein.

Gangguan Gugus Sulfhidril Bebas

Enzim yang mengandung sistein memiliki rantai samping yang diakhiri dengan gugus sulfhidril. Selain itu, beberapa koenzim, seperti koenzim A dan dihidrolipoat, termasuk gugus sulfhidril bebas. Enzim dan koenzim ini tidak bekerja kecuali gugus sulfhidril bebas dan tereduksi. Banyak logam, termasuk ion merkuri, mengganggu interaksi dengan sulfhidril. Banyak enzim dalam sel termasuk sulfhidril, yang bertindak sebagai zat pengoksidasi, dan logam berat menyebabkan kerusakan besar.

Kerusakan DNA

Berbagai faktor fisik dan kimia menyebabkan kerusakan DNA, termasuk radiasi pengion, sinar ultraviolet, dan senyawa reaktif DNA. Agen alkilasi dan bahan kimia lain yang bereaksi secara kovalen dengan basa purin dan pirimidin untuk menghasilkan hasil tambahan DNA atau ikatan silang antaruntai termasuk dalam kategori yang terakhir. Radiasi dapat merusak DNA dalam berbagai cara. Sinar ultraviolet, misalnya, menyebabkan ikatan silang pirimidin tetangga pada salah satu dari dua untai polinukleotida, menghasilkan dimer pirimidin; radiasi pengion menyebabkan terobosan untai tunggal dan ganda. Lesi DNA yang disebabkan oleh radioaktif dan bahan kimia menghancurkan sel dengan mengganggu replikasi DNA.

Antagonisme Kimia

Antagonisme kimia mengacu pada campur tangan bahan kimia dengan reaksi biasa antara enzim dan substratnya. Antagonis berfungsi dengan berinteraksi dengan komponen holoenzim (protein apoenzim, aktivator mineral, atau koenzim), menghalangi perlekatan substrat normal. (Istilah "substrat" digunakan secara luas di sini untuk mencakup keadaan ketika inhibitor bergabung dengan apoenzim, mencegah koenzim untuk menempel.) Antagonis bergabung dengan enzim karena afinitas kimianya pada titik kritis pada enzim. Fungsi katalitik enzim didasarkan pada daya tariknya terhadap substrat alaminya; dengan demikian, bahan kimia apa pun yang secara struktural mirip dengan substrat mungkin juga memiliki afinitas terhadap enzim. Jika afinitasnya cukup kuat, "analog" akan menggantikan media biasa, sehingga mencegah terjadinya reaksi yang sesuai. . Banyak holoenzim menggunakan ion mineral sebagai jembatan, baik antara enzim dan koenzim atau antara enzim dan substrat. Bahan kimia yang mudah bercampur dengan mineral tersebut akan menghambat perlekatan koenzim atau substrat (misalnya karbon monoksida dan sianida bergabung dengan atom besi dalam enzim yang mengandung heme dan mencegahnya bekerja dalam respirasi). Antagonis kimia mudah diklasifikasikan menjadi dua jenis: (a) antagonis proses produksi energi, dan (b)

antagonis proses biosintetik. Yang pertama meliputi racun enzim pernapasan (karbon monoksida, sianida) dan fosforilasi oksidatif (dinitrofenol), sedangkan yang terakhir mencakup analog asam amino dan asam nukleat. Dalam beberapa keadaan, analog hanya menghambat integrasi metabolit reguler (misalnya, 5-metiltryptofan menghambat penggabungan tryptofan ke dalam protein), sementara dalam keadaan lain, analog menggantikan metabolit normal dalam makromolekul, sehingga menjadikannya tidak berfungsi. Penggunaan p-fluorophenylalanine sebagai pengganti fenilalanin dalam protein adalah contoh dari jenis antagonisme yang terakhir.

7.15 Tindakan Khusus Dari Biosida Terpilih

1. Panas

Panas adalah teknik mensterilkan bahan yang paling mudah, asalkan tahan panas. Pada kultur skala laboratorium, suhu 100°C akan membunuh semua kecuali sporaebacteria dalam waktu 2-3 menit, sedangkan spora terbunuh pada suhu 121°C selama 15 menit. Uap biasanya digunakan karena kuman lebih cepat mati jika lembab, dan uap juga berfungsi sebagai alat untuk menyebarkan panas ke seluruh wadah sterilisasi. Untuk mencapai suhu 121°C di permukaan laut, uap harus dijaga pada tekanan 15 pon per inci persegi (psi) di atas tekanan atmosfer; autoclave atau pressure cooker digunakan untuk ini. Pada ketinggian yang lebih tinggi, tekanan harus lebih dari 15 psi untuk mencapai 121°C. Tersedia oven listrik bersirkulasi udara panas untuk mensterilkan barang-barang yang harus tetap kering. Karena panas kurang efektif pada bahan kering, suhu 160-170°C biasanya digunakan selama 1 jam atau lebih. Panas mendenaturasi protein sel dan asam nukleat serta merusak membran sel dalam kondisi ini (suhu tinggi diterapkan dalam jangka waktu lama). Perawatan ini, jika dilakukan dengan benar, bersifat sporisidal.

2. Radiasi

Radiasi UV, dengan panjang gelombang sekitar 260 nm, menghasilkan dimer timidin, yang mencegah replikasi DNA bakteri. Biasanya bersifat bakterisida, tetapi mungkin tidak bersifat sporisidal. Radiasi pengion dengan panjang gelombang 1 nm atau kurang (gamma atau sinar-X) menghasilkan radikal bebas yang merusak protein, DNA, dan lipid. Terapi ini efektif melawan bakteri dan spora.

3. Alkohol

Senyawa ini berhasil menghilangkan air dari sistem biologis. Jadi, mereka berfungsi sebagai "pengering cair". Etil alkohol, isopropil alkohol, dan n-propanol menunjukkan aktivitas antibakteri yang cepat terhadap bakteri vegetatif, virus, dan jamur tetapi tidak bersifat sporisidal. Aktivitasnya paling tinggi bila diencerkan dengan air hingga konsentrasi 60-90%. Teknik pengobatan ini dianggap bakterisida tetapi tidak sporisidal.

4. Aldehida

Instrumen, endoskopi, dan peralatan bedah didesinfeksi dan disterilkan pada suhu rendah menggunakan senyawa seperti glutaraldehid atau formaldehida. Mereka biasanya digunakan dalam larutan 2% untuk mencapai tindakan sporisidal. Bahan kimia ini sebagian besar bersifat bakterisidal dan sporisidal.

5. Biguanida

Klorheksidin umumnya digunakan dalam obat kumur dan tangan, serta sebagai desinfektan dan pengawet. Bahan kimia ini bersifat bakterisidal, namun tidak sporisidal. Mycobacteria, karena lapisan sel lilinnya yang berbeda, sering kali resisten terhadap bahan kimia ini.

6. Bisfenol

Bisphenol umumnya digunakan dalam sabun antibakteri dan obat kumur. Secara umum, senyawa ini menunjukkan

aktivitas mikrobisida berspektrum luas namun mempunyai efek terbatas terhadap *P. aeruginosa* dan jamur. Triclosan dan hexachlorophene memiliki sifat bakterisidal dan sporostatik.

7. Agen Pelepas Halogen

Bahan kimia pelepas klorin yang paling penting adalah natrium hipoklorit, klorin dioksida, dan natrium dikloroisosianurat, yang merupakan zat pengoksidasi yang mengganggu aktivitas seluler protein. Efek bakterisidal bahan kimia ini disebabkan oleh komponen aktifnya, asam hipoklorit. Pada dosis yang lebih besar, kelompok ini menjadi sporisidal. Yodium (I_2) sangat bersifat bakterisidal dan sporisidal. Iodofor (misalnya, povidone-iodine) adalah kompleks pelarut atau pembawa yodium yang beroperasi sebagai reservoir aktif.

8. Turunan Logam Berat

Perak (Ag^+) sulfadiazine, senyawa yang terdiri dari dua agen antibakteri, Ag^+ dan sulfadiazine, menunjukkan aksi spektrum luas. Pengikatan komponen sel seperti DNA terutama bertanggung jawab atas efek penghambatannya. Bahan kimia ini tidak bersifat sporisidal.

9. Asam Organik

Asam organik berfungsi sebagai pengawet di sektor farmasi dan makanan. Asam benzoat bersifat fungistatik, sedangkan asam propionat bersifat bakteriostatik dan fungistatik. Keduanya juga tidak bersifat sporisidal.

10. Hidrogen Peroksigen

peroksida (H_2O_2) memiliki berbagai aktivitas melawan virus, bakteri, ragi, dan spora bakteri. Tindakan sporisidal memerlukan konsentrasi yang lebih besar (10–30%). H_2O_2 dan periode kontak yang lama.

11. Fenol

Fenol dan beberapa bahan kimia fenolik lainnya memiliki sifat antiseptik, desinfektan, dan pengawet. Secara umum, ini tidak bersifat sporisidal.

12. Senyawa Amonium Kuarter

Struktur molekul senyawa ini mengandung dua wilayah: wilayah yang menolak air (hidrofobik) dan wilayah yang menarik air (hidrofilik). Deterjen kationik, seperti senyawa amonium kuaterner (QAC), merupakan antiseptik dan desinfektan yang efektif. QAC telah digunakan untuk berbagai tujuan klinis, termasuk desinfeksi pra operasi pada kulit yang tidak rusak dan membersihkan permukaan keras. Mereka bersifat sporostatik, yang berarti mereka menekan pertumbuhan spora tetapi tidak menekan perkecambahan. QAC mempengaruhi virus yang tertutup tetapi tidak mempengaruhi virus yang tidak berselubung. Secara umum, ini tidak bersifat sporisidal.

13. Sterilisasi Fase Uap

Peralatan medis dan perlengkapan bedah yang peka terhadap panas dapat disterilkan secara efisien dengan sistem fase uap yang mengandung etilenoksida, formaldehida, hidrogen peroksida, dan asam perasetat. Ini adalah sporisidal.

7.16 Hubungan Konsentrasi Biosida Dan Waktu Terhadap Pembunuhan Antimikroba

Ketika biosida yang diuraikan di atas digunakan untuk mengubah populasi mikroba, variabel waktu dan konsentrasi harus dipertimbangkan. Umumnya diketahui bahwa konsentrasi bahan kimia yang digunakan berhubungan dengan waktu yang dibutuhkan untuk membunuh sebagian kecil populasi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C^n t = K$$

Dalam persamaan ini, C mewakili konsentrasi biosida, t adalah waktu yang diperlukan untuk membunuh sebagian kecil

sel, dan n dan K adalah konstanta. Pernyataan ini menyatakan bahwa, misalnya, jika $n = 6$ (seperti dalam kasus fenol), menggandakan konsentrasi obat akan mempersingkat waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat inaktivasi yang sama sebanyak 64 kali. Fakta bahwa efisiensi biosida berubah seiring dengan konsentrasi hingga pangkat enam menyiratkan bahwa diperlukan enam molekul biosida untuk menonaktifkan sel, meskipun kurangnya bukti kimia langsung yang mendukung klaim ini. Untuk menetapkan nilai n untuk setiap biosida, kurva inaktivasi dihasilkan untuk beberapa konsentrasi, dan waktu yang diperlukan untuk menonaktifkan sebagian kecil populasi pada setiap konsentrasi dihitung. Misalnya, C_1 mewakili konsentrasi awal dan t_1 mewakili waktu yang diperlukan untuk menonaktifkan 99% sel. Misalkan C_2 dan t_2 menjadi konsentrasi kedua dan waktu yang diperlukan untuk menonaktifkan 99% sel. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa:

$$C_1^n t_1 = C_2^n t_2$$

Menyelesaikan n menghasilkan:

$$n = + \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log C_1 - \log C_2}$$

Jadi, n dapat dihitung dengan mengukur kemiringan garis yang terbentuk ketika $\log t$ diplot terhadap $\log C$. Jika n ditentukan secara eksperimental, K dapat dihitung dengan memasukkan nilai observasi untuk C , t , dan n ke dalam persamaannya. Pembalikan Aksi Biosidal Selain kinetika yang bergantung pada waktu dan konsentrasi, aspek lain dari aktivitas biosida adalah kapasitas aksi antimikroba untuk dibalik.

7.17 Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroba

1. Oksigen

Mikroba digolongkan berdasarkan kebutuhan oksigennya, yaitu: 1. Aerobik obligat (harus mendapat oksigen untuk tumbuh) 2. Anaerob obligat (dapat

berkembang tanpa oksigen) 3. Aerobik/anaerob fakultatif (pertumbuhan tidak ada oksigen) 4. Mikroaerofilik (membutuhkan sedikit oksigen)).

2. CO₂

Bakteri kapnofilik adalah organisme yang berkembang hanya dengan kadar karbon dioksida (CO₂) yang sangat besar. Mereka tumbuh subur di lingkungan dengan 5-10% CO₂ dan 15% O₂. 3% CO₂ dapat diproduksi dalam toples lilin. Mikroorganisme ini antara lain *H. influenzae* dan *Brucella abortus*.

3. Suhu

Suhu ideal bagi sebagian besar mikroorganisme berbahaya adalah 37 derajat Celcius. Namun suhu idealnya berbeda-beda. Bakteri diklasifikasikan menjadi:

- a. Psikrofil adalah bakteri yang menyukai suhu dingin dan tumbuh antara 0 dan 20°C. Kategori ini mencakup sebagian besar manfaat tanah dan air.
- b. Mesofil: Bakteri termofilik ini tumbuh subur pada suhu antara 25 dan 40 derajat Celsius. Kategori ini mencakup sebagian besar mikroorganisme berbahaya.
- c. Termofil: Mikroba yang tumbuh subur di suhu panas. Mereka dapat tumbuh pada suhu tinggi berkisar antara 55 hingga 80 derajat Celcius. Salah satu contohnya adalah *B. stearothermophilus*.

4. Keasaman (pH)

Kebanyakan bakteri berbahaya tumbuh subur antara pH 7,2 dan 7,6. Hanya sedikit bakteri, seperti laktobasilus, yang dapat tumbuh pada pH asam di bawah 4,0. Fermentasi menghasilkan asam, yang mencegah pembusukan banyak makanan, termasuk acar dan keju. *V. cholerae* merupakan jenis bakteri yang dapat tumbuh subur pada lingkungan basa (8.2-8.9).

5. Cahaya

Tergantung pada sumber energi yang digunakan, bakteri dapat diklasifikasikan menjadi fototrof (bakteri yang memperoleh energi dari sinar matahari) atau kemotrof (bakteri yang memperoleh energi dari sumber kimia).

6. Tekanan Osmotik

Mikroba menerima hampir semua nutrisinya dalam bentuk larutan dari air di sekitarnya. Dengan demikian, pertumbuhan bakteri dipengaruhi oleh tekanan osmotik dan salinitas larutan. Bakteri dapat bertahan terhadap berbagai variasi osmotik eksternal berkat ketahanan mekanis dinding selnya. Organisme yang memerlukan tekanan osmotik tinggi disebut bakteri osmofilik. Paparan bakteri terhadap larutan hipertonik dapat mengakibatkan eliminasi air secara osmotik, yang menyebabkan kontraksi protoplasma (plasmolisis). Di sisi lain, perpindahan bakteri secara tiba-tiba dari larutan pekat ke air suling dapat mengakibatkan penyerapan air yang berlebihan, menyebabkan sel mengembang dan menyebar (plasmoptysis).

DAFTAR PUSTAKA

- Barcina I, Arana I. (2009) The viable but nonculturable phenotype: a crossroads in the life-cycle of non-differentiating bacteria? *Rev Environ Sci Biotechnol* 8:245–255.
- Block S.S. (2001) *Disinfection, Sterilization, and Preservation*, 5th ed. Lippincott Williams & Wilkins.
- Colwell RR, Grimes D.J. (2000): *Nonculturable Microorganisms in the Environment*. American Society for Microbiology Press.
- Fraiese A, Maillard J.Y., Sattar, S. (2013): *Russell, Hugo & Aycliffe's Principles and Practice of Disinfection, Preservation and Sterilization*, 5th ed. Blackwell Scientific Publications.
- Gerhardt P, *et al.* (1981): *Manual of Methods for General Bacteriology*. American Society for Microbiology.
- Hans-Curt F, Jost, W.(2010) The biofilm matrix. *Nat Rev Microbiol*;8:623–633.
- McDonnell GE(2007) *Antisepsis, Disinfection, and Sterilization: Types, Action, and Resistance*. American Society for Microbiology Press.
- McDonnell G, Russell AD. (1999): Antiseptics and disinfectants: Activity, action, and resistance. *Clin Microbiol Rev* ;12:147.
- Rutala WA, Weber DJ (2008) *Health Care Practices Advisory Committee: Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities*. Centers for Disease Control and Prevention, 2008. http://www.cdc.gov/hicpac/Disinfection_Sterilization/acknowledg.html
- Siegels DA, Kolter R(1992): Life after log. *J Bacteriol*174:345
- Pommerville, J. C. (2011) *Alcamo's Fundamentals of Microbiology*. Ninth ed, *Advances in Solid and Hazardous Waste Management*. Ninth ed. Massachusetts: Jones and Bartlett. doi: 10.1007/978-3-319-57076-1_15.
- Wilbey, A. (2013). The science of microbiology. In *Dairy Industries International* (Vol. 78, Issue 7).
- Yani, S & Opik, T. (2021). *Mikrobiologi Dasar. LP2M UIN SGD Bandung*.

BAB 8

KERAGAMAN MIKROORGANISME

Oleh Helena Daten

8.1 Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara megabiodiversitas kedua setelah Brasil. Keanekaragaman tersebut meliputi manusia, hewan, tumbuhan, dan mikroorganisme. Mikroorganisme berkontribusi dalam menyumbang angka tertinggi kedua untuk keanekaragaman di dunia karena di dalam tubuh manusia, hewan, tumbuhan, dan lingkungan sekitar terdapat mikroorganisme yang hidup berdampingan dengan substrat tersebut.

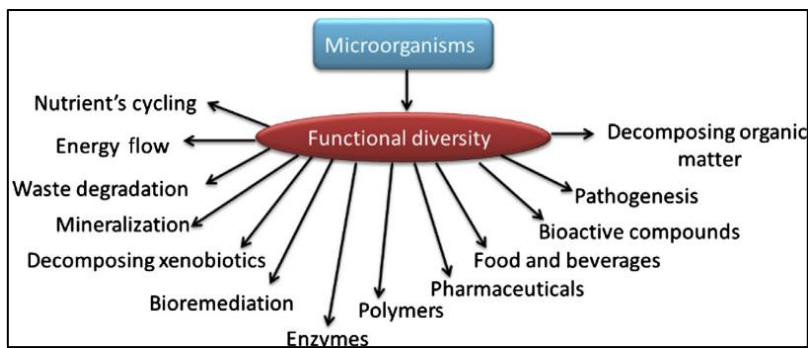
Mikroorganisme dapat hidup di darat, air, dan udara. Mereka juga berperan dalam proses rantai makanan di dunia. Peran tersebut memberi dampak positif dan negatif bagi substrat itu sendiri. Mikroorganisme juga layak untuk mendapatkan perlakuan yang sama seperti substratnya karena mereka membutuhkan tempat tinggal (substrat) dan nutrisi yang cukup untuk tumbuh. Nutrisi, energi, dan lingkungan yang tidak sesuai dengan kebutuhkannya juga akan memengaruhi keanekaragaman mikroorganisme tersebut. Oleh karena itu, kondisi substrat yang seimbang harus dipertahankan untuk menjaga keseimbangan mikroorganisme, sehingga tidak menurunkan diversitas, mengubah komposisi mikroorganisme, meningkatkan reproduksi mikroorganisme berbahaya, dan menurunkan aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat (Maddox, 2023; Huddell, 2019; Wu dkk, 2017).

8.2 Metode untuk menentukan diversitas mikroba

Analisis diversitas mikroba menyediakan informasi penting yaitu informasi tentang populasi mikroba dan fungsinya di lingkungan. Keanekaragaman komunitas mikroba dipengaruhi oleh jenis substrat dan lingkungan sekitar substrat, sehingga

pada saat pengambilan sampel harus diukur parameter lingkungannya. Oleh karena itu, sangat penting untuk memonitor komunitas mikroba untuk menentukan diversitas mikroba termasuk pada kondisi lingkungan yang mengalami fluktuasi iklim.

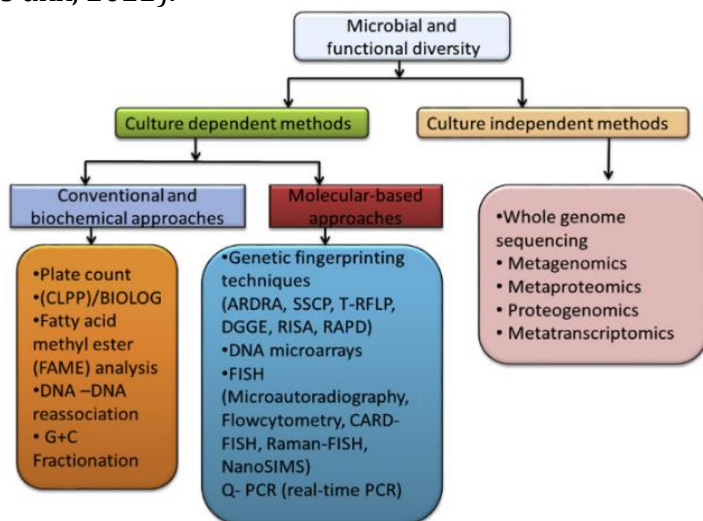
Mikroorganisme seperti prokariotik, virus, viroid, kapang, yeast, mikroalga, dan protozoa mempunyai jumlah yang sangat banyak di muka bumi ini. Jumlah prokariotik di biosfer sekitar $4-6 \times 10^{30}$ sel. Prokariotik yang berada di laut terbuka sekitar 1.2×10^{29} - 3.5×10^{30} sel, di tanah (2.6×10^{29} sel), dan di bawah permukaan terestrial (0.25 - 2.5×10^{30} sel). Oleh karena itu, komposisi mikroba di muka bumi lebih banyak sekitar 60% dibandingkan tumbuhan dan hewan. Aktivitas mikroorganisme mempengaruhi aktivitas semua organisme lain di biosfer. Misalnya, mereka memfasilitasi dan mengelola siklus biogeokimia dengan menguraikan bahan organik, xenobiotik, mendaur ulang nutrisi dan elemen penting, serta degradasi limbah. Mereka juga merupakan kandidat potensial untuk produksi produk alami seperti senyawa bioaktif, polimer, dan enzim (Gambar 8.1) (Srivastava dkk, 2019).



Gambar 8.1. Peran mikroorganisme yang berbeda-beda
(Sumber: Srivastava dkk, 2019)

Ada dua metode untuk mengetahui diversitas mikroba yaitu *culture-dependent* dan *culture-independent* (Gambar 8.2). *Culture-dependent* menyediakan informasi pada *fine-scale diversity*, yang mana isolat diisolasi dari substrat, kemudian

dikultur di laboratorium, dan dikarakteristik karakter morfologi, fisiologi, dan sifat biokimianya menggunakan teknik konvensional dan dilanjutkan dengan analisis molekuler. Kelemahan dari metode ini adalah tidak semua mikroba yang ada di komunitas tersebut tumbuh pada saat isolasi sehingga terjadi bias dalam menentukan diversitas mikroba. Selain itu, metode ini juga hanya dapat mengisolasi <1% mikroba yang sebenarnya ada di lingkungan tersebut. Sementara itu, metode *culture-independent* (metagenomik) tidak melakukan proses isolasi dan kultur individu mikroba, namun menggunakan teknik sekuensing untuk mengetahui diversitas dan fungsional mikroba di dalam ekosistem. Kelemahan metode ini adalah kita tidak mempunyai koleksi individu mikroba walaupun individu tersebut mempunyai informasi taksonomi dan peran dalam lingkungannya dapat diketahui dengan jelas. Metode ini merupakan metode yang populer saat ini dan sekuensingnya sesuai dengan target gen. Biasanya untuk identifikasi prokariotik target gen menggunakan 16S rDNA sedangkan eukariotik menggunakan gen 18S/28S/Internal transcribed spacer (ITS) sesuai kebutuhan (Carles dkk, 2022).



Gambar 8.2. Perbedaan metode *culture-dependent* dan *culture-independent*

(Sumber: Srivastava dkk, 2019)

Sejak konsep metagenomics ditemukan, teknologi metagenomik telah diterapkan secara luas dalam studi mikroorganisme di dalam sampel lingkungan. Salah satu metode metagenomik yang digunakan akhir-akhir ini adalah *next generation sequencing* (NGS). Metode NGS adalah metode molekuler yang digunakan untuk mengetahui komposisi mikroba di dalam sampel menggunakan sekuens DNA. Sampel DNA untuk metode ini dapat diambil langsung dari lingkungan (tanah, air, dan udara) atau biasa disebut *environmentalDNA* (*eDNA*). Langkah-langkah untuk melakukan metode ini adalah pengambilan sampel, ekstraksi DNA, amplifikasi DNA menggunakan target gen dan primer spesifik, sekuensing, dan terakhir adalah identifikasi. Sekuensing menggunakan NGS memperoleh data yang lebih banyak dalam waktu sangat cepat. Hal-hal yang perlu diperhatikan di dalam metode ini adalah jenis primer universal yang digunakan; waktu, suhu, dan siklus amplifikasi; dan jumlah variabel yang dipilih. Platform yang mendukung NGS adalah Illumina MiSeq/HiSeq, Roche 454, dan SOLiD. Selain platform ini, masih ada platform lain yang akan dikembangkan. Sementara itu, beberapa software yang digunakan untuk menganalisis data adalah FLASH, QIIME dan UPARSE (Rupert dkk, 2020)

Sekuens DNA yang diperoleh diidentifikasi menggunakan data base metagenomic (Mendez-Garcia dkk, 2018). Data base tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Genbank-NCBI*
(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/metagenome/>)
Jenis sekuens metagenomik (RNA ribosom 16S, fosmid, dll.) dapat dikirimkan langsung di Genbank ini.
Genebank ini banyak menyediakan ribuan bank sekuen dari mikroorganisme untuk mengetahui nama spesies dan individu (strain) yang terdapat di sampel
2. *The European Bioinformatics Institute (EBI)*
(<https://www.ebi.ac.uk/metagenomics/>)
Data base ini menyediakan layanan penyimpanan dan analisis filogenetik untuk data metagenomik. Basedata ini menyediakan lebih dari 13.000 metagenom dan lebih dari

- 1100 metatranskriptom, diklasifikasikan menurut lingkungan asalnya
3. *The Integrated Microbial Genomes with Microbiome samples (IMG/M)* (<https://img.jgi.doe.gov/m/>). Bank data sekuen ini menyediakan data archaea, bacteria, eukarya, plasmids, viruses, dan genome fragments. Di IMG juga menyimpan data metatranskriptomik, dengan 5156 kumpulan data yang berbeda dari beragam sampel yang kaya akan komunitas mikroba (laut, muara, air tawar, tanah, hutan, rizosfer bioreactor dan lainnya)
 4. *MG-RAST* (<http://metagenomics.anl.gov>). Pada web ini, Portal data submit terbuka untuk memproses, menganalisis, berbagi, dan menyebarkan kumpulan data metagenomik. Ada lebih dari 200.000 kumpulan data, sekitar 30.000 di antaranya tersedia untuk diunduh publik. Hampir 8% dari keseluruhan data berasal dari eksperimen metatranskriptomik
 5. *Functional Ontology Assignments for Metagenomes (FOAM)* (<http://cbb.pnnl.gov/portal/software/FOAM.html>), adalah basis data gen fungsional yang dikembangkan untuk menyaring kumpulan data sekuen metagenomik lingkungan. Analisis metagenom lingkungan saat ini sangat menantang karena keragaman yang tinggi dan sebagian besar taksa mikroba yang tidak dikarakterisasi di sebagian besar habitat lingkungan.
 6. *iMicrobe* (<http://imicrobe.us>). Pengumpulannya tidak hanya mencakup data metagenomik tetapi juga data sekuen mikroba terkait lainnya, seperti transkriptomik dan genomik. Sebenarnya, data base ini juga terdapat 3338 sampel omics di lingkungan yang berbeda.
 7. *VIROME* (<http://virome.dbi.udel.edu/>): *Viral Informatics Resource for Metagenome Exploration (VIROME)* adalah basis data yang dirancang untuk mengklasifikasikan semua open reading frames (ORF) dari pustaka shotgun metagenom virus. Ini memungkinkan eksplorasi data sekuen metagenom yang dikumpulkan dari kumpulan virus yang terjadi dalam

sejumlah konteks lingkungan yang berbeda, yang saat ini berisi data yang berasal dari 466 Libraries.

8. MeganDB (<http://www.megan-db.org/>): *MetaGenome Analyzer DataBase* (MegaDB) adalah basis data metagenomik yang sebelumnya dihitung menggunakan alat populer MEGAN (MEta Genome Analyzer), yang digunakan untuk taksonomi dan anotasi fungsional dari data metagenomik. Saat ini terdiri dari 235 metagenom.
9. *The Human Microbiome Project Consortium* (<http://hmpdacc.org>) digunakan untuk mempelajari pengaruh mikrobioma manusia dalam kesehatan manusia. Semua studi metagenomik dalam konteks mikrobioma manusia disimpan dalam database Human Microbiome Project. Saat ini, terdapat 1265 metagenom dari lingkungan yang berbeda yang berlokasi di tubuh manusia.

Satu gram sampel dapat mengandung sampai 10 miliar mikroorganisme dengan ribuan spesies yang berbeda. Kondisi penyimpanan sampel sangat berpengaruh terhadap komposisi mikroba apalagi berkaitan dengan DNA, karena DNA mudah terdegradasi pada suhu ruang lebih dari 2 jam penyimpanan. Sampel juga bisa di simpan pada suhu ruang selama 2 hari tetapi perlu ditambahkan stabilizing buffer, namun buffer yang digunakan tidak memengaruhi komposisi mikroba. Selain itu, ada faktor lain yang memengaruhi komposisi mikroba yaitu kontaminasi selama pegumpulan sampel dan transportasi ke laboratorium, wadah yang digunakan, waktu penyimpanan, dan suhu penyimpanan. Sementara itu, pemilihan metode yang digunakan harus tepat. Metode konvensional dengan cara isolasi dan karakterisasi menghasilkan kurang dari 1% mikroorganisme yang dapat dilihat di mikroskop, sehingga komunitas mikroorganisme di substrat belum terwakilkan. Paramater keanekaragaman mencakup variabilitas genetik (spesies) jumlah (kekayaan), dan kelimpahan relatif (kemerataan). Hal ini menggambarkan kompleksitas dan variabilitas pada berbagai tingkatan kelompok biologis. Aspek penting dalam keanekaragaman satu ekosistem adalah variasi proses,

kompleksitas interaksi, dan jumlah tingkat trofik (Torsvik & Øvreås, 2002). Oleh karena itu, untuk mencapai target dalam penentuan diversitas mikroba maka metode yang digunakan harus tepat. Setiap metode mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Perbedaan metode konvensional (*culture-dependent*) dan moderen (*culture-independent*) dapat dilihat di Tabel 8.1.

Tabel 8.1. Perbedaan metode yang digunakan untuk analisis keanekaragaman mikroorganisme

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Metode <i>Culture-dependent</i>		
<i>Plate count</i>	Cepat	Tidak cocok untuk mikroba yang tidak dikultur
	Murah	Terbatas hanya untuk mikroba yang tumbuhnya cepat
	Mudah untuk dikerjakan	Terbatas untuk spesies kapang yang menghasilkan spora dalam jumlah banyak
Profil fisiologis tingkat komunitas/BIOLOG	Cepat	Tidak cocok untuk mikroba yang tidak dikulturkan
	Dapat dikulturkan	Hanya mendeteksi mikroba
	Murah	Hanya mikroba pengguna sumber karbon yang tumbuh

Metode	Kelebihan	Kekurangan
	Memungkinkan untuk diferensiasi mikroba	Lebih menampilkan diversitas metabolik dibandingkan diversitas mikroba
	Memungkinkan untuk memperoleh data mikroba dalam jumlah banyak	Bias terhadap mikroba yang tumbuhnya cepat
	Memungkinkan untuk mempelajari daerah spesifik sumber karbon	Kepadatan inokulum signifikan
Metode <i>culture independent</i>		
Metagenomik: <i>Next generation sequencing</i> (NGS)	Cepat	Mahal
	Sampelnya diambil dari lingkungan dan langsung diekstraksi DNA	Isolasi DNA manual membutuhkan banyak bahan dan waktu
	Dapat menentukan fungsi dan peran fisiologis dan ekologi mikroba	Tidak cocok untuk sampel-sampel yang tidak baik dan di simpan pada kondisi yang tidak tepat
	Identifikasi sampai tahap spesies	Mikroba tidak dapat dikulturkan
	Data yang diperoleh adalah	Membutuhkan ketelitian dalam

Metode	Kelebihan	Kekurangan
	diversitas, kelimpahan, pemerataan dan dominansi mikroba	memilih target gen, primer, waktu dan siklus amplifikasi
	Dapat mendeteksi mikroba yang hidup dan aktif membela, mati, dorman, dan hidup tetapi tidak aktif	Analisis data membutuhkan banyak software

Sumber: Srivasta dkk, 2019

8.3 Keanekaragaman mikroba pada sampel lingkungan

Sampel dapat diambil dari berbagai substrat seperti tanaman, manusia, tanah, dan air. Komposisi mikroba di substrat tersebut dipengaruhi oleh faktor internal (substrat) dan eksternal (lingkungan). Sampel tersebut dianalisis keanekaragaman mikrobanya sehingga dapat mengetahui fungsi mikroba di lingkungan tersebut.

8.3.1 Sampel dari tumbuhan

Bagian tumbuhan yang biasa digunakan sebagai sampel adalah akar, batang, daun, bunga, buah, dan biji. Mikroba di organ tumbuhan ada dua jenis yakni endofit (di dalam jaringan tumbuhan) dan rhizosfer (di permukaan bagian tubuh tumbuhan). Pemilihan jenis sampel disesuaikan dengan tujuan peneliti.

Rizosfer dapat didefinisikan sebagai akar yang mengelilingi tanah dan ditandai dengan kelimpahan mikroba yang tinggi. Oleh karena itu, ini dianggap sebagai hotspot mikroba yang kaya nutrisi dan merupakan lingkungan hidup yang sangat kompetitif. Untuk mendapatkan keunggulan kompetitif, beberapa bakteri rizosfer menembus ke dalam organ tanaman

dan mempertahankan gaya hidup saprofit dan endofit. Bakteri endofit dapat masuk ke dalam tanaman melalui luka jaringan, stomata, lentisel, dan melalui radikula yang berkecambah. Bakteri endofit diketahui juga mengkolonisasi tanaman dengan cara masuk melalui retakan akar, rambut akar, dan juga dari biji melalui transmisi vertikal. Selama transisi dari rizosfer ke endosfer tumbuhan, bakteri yang berkolonisasi harus memiliki kemampuan beradaptasi dengan cepat terhadap lingkungan yang sangat berbeda dalam hal pH, tekanan osmotik, sumber karbon, dan ketersediaan oksigen. Mikroba juga harus memiliki kemampuan untuk mengatasi respon pertahanan tanaman yang dimediasi melalui produksi reactive oxygen species (ROS) yang menyebabkan stres pada bakteri penyerang/patogen (Bashir dkk, 2022).

Komunitas bakteri rhizosfer mempunyai efek besar bagi pertumbuhan dan kesehatan tumbuhan termasuk nutrisi, menekan penyakit, dan resisten terhadap stress biotik dan abiotic. Banyak penelitian mendukung bahwa iklim, jenis tanah, spesies tumbuhan, genotip tumbuhan, dan masa pertumbuhan sangat mempengaruhi diversitas komunitas mikroba rhizosfer. Contohnya adalah tanaman kedelai, ada penelitian yang menunjukkan bahwa diversitas bakteri rhizosfer tanaman kedelai lebih tinggi dibandingkan dengan tanah di luar rhizosfer (*bulk soil*). Penelitian tersebut juga menyatakan bahwa proses pertumbuhan tanaman kedelai memengaruhi diversitas mikroba dibandingkan dengan *bulk soil* tidak ada perubahan komposisi selama pertumbuhan kedelai. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa faktor proses pertumbuhan lebih mempengaruhi komposisi mikroba dibandingkan dengan faktor lingkungan (Aswani dkk, 2020).

Mikroorganisme endofit berinteraksi dengan tumbuhan seperti bakteri dan kapang. Bakteri endofit berada di dalam jaringan interior tanaman dan memainkan peran penting dalam penunjang pertumbuhan tanaman dan perlindungan dari penyakit. Beragam spesies bakteri endofit yang berasal dari bakteri Gram-positif hingga Gram-negatif. Contohnya adalah *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Bacillus*,

Brevibacterium, *Microbacterium*, *Pseudomonas*, dan lainnya. Mikroba endofit biasanya berasal dari filum actinobacteria, proteobacteria, dan firmicus. Actinobacteria adalah mikroba yang bentuknya transisi antara kapang dan bakteri dan mereka masuk dalam filum aktinobakteria. Selain itu, genus *Streptomyces* juga ditemukan dominan dan umum diisolasi dari endofit tumbuhan (Arrigoni dkk, 2018; Costa dkk, 2021).

Semua mikroba di tumbuhan mempunyai peran masing-masing. Contoh mikroba yang berperan untuk fiksasi nitrogen adalah genus *Cyanobacteria*, *Alphaproteobacterial*, *Betaproteobacteria*, *Methylobacterium*, *Rhodopseudomonas*, *Pantoea*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Achromobacter* dan lainnya. Selain itu, mikroba yang berperan sebagai pelarut fosfat, pelarut besi, dan produksi siderofor seperti kelompok bakteri yang berasal dari genus *Bacillus* dan *Pseudomonas*. Berikut ini adalah contoh mikroba endofit yang berasal dari tanaman obat seperti *Lantana camara* Linn., *Plectranthus tenuiflorus*, *Tridax procumbens* Linn., dan *Azadirachta indica* adalah *Bacillus* spp., *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus licheniformis*, *Micrococcus luteus*, *Paenibacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Acinebacter calcoaceticus*, *Chryseobacterium daejeonense*, *Enterobacter cancerogenus*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter cowanii*, *Pantoea eucalypti*, *Pantoea stewartii*, *Pseudomonas argentinensis*, *Raoultella planticola*, *Cronobacter sakazakii*, *Enterobacter* sp., *Lysinibacillus sphaericus*, *Terribacillus saccharophilus*, *Ralstonia*, *Bacillus mojavenis*, *Staphylococcus*, *Achromobacter* sp., *Agrococcus* sp., *Agrobacterium* sp., *Arthrobacter* sp., *Flavobacterium*, *Kineococcus* sp. *Bacillus pumilus*, *Bacillus aryabhattai*, dan *Pseudomonas graminis* (Darlison dkk, 2019; Xu dkk, 2019; Aswani dkk, 2020; Perazzolli dkk, 2020; Chen dkk, 2021; Abid dkk, 2022; Bashir dkk, 2022; Yan dkk, 2022).

8.3.2 Sampel dari manusia

Gambaran umum analisis komposisi mikroba dari sampel manusia biasanya menggunakan sampel feses. Sampel yang diambil langsung diekstraksi DNA kemudian diamplifikasi, dan

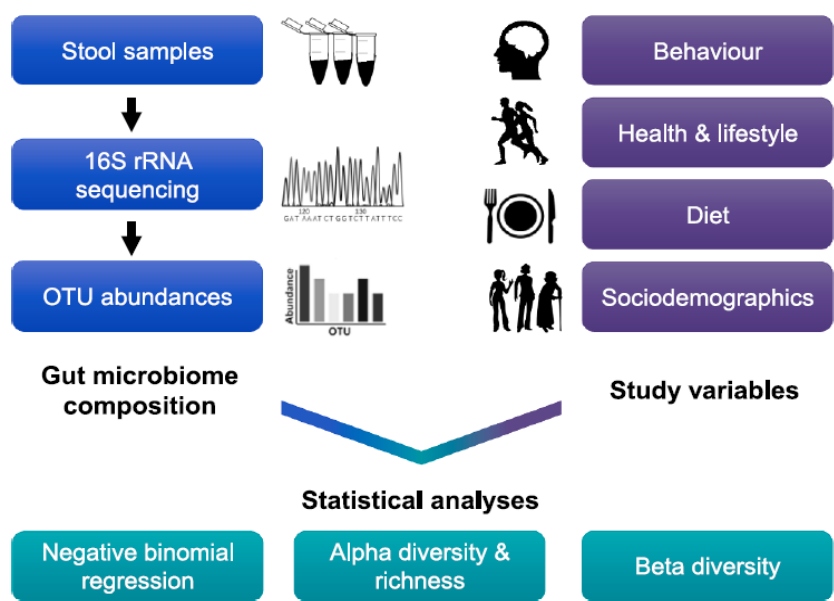
disekuensing. Setelah itu, dianalisis komposisi mikrobanya (Gambar 8.3). Diversitas mikroba dari sampel manusia dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu (1) genetika manusia dan interaksi sistem imun pada perkembangan awal, (2) bagian tubuh, (3) diet, (4) antibiotik, (5) gaya hidup, dan (5) sosiodemografis. Komposisi mikroba di dalam tubuh manusia itu unik setiap individu, dan perbedaan antara individu sangat besar dibandingkan dengan perbedaan jenis biokimia di dalam tubuh manusia dari waktu ke waktu. Bahkan kembar identik pun, komposisi mikrobanya jauh berbeda dibandingkan dengan kembar non identik. Beberapa penelitian juga menyebutkan bahwa komposisi mikroba di dalam tubuh manusia lebih dipengaruhi oleh faktor lingkungan, sedangkan untuk faktor genetik lebih terbatas dalam memengaruhi jumlah mikroba di manusia (Johnson, 2020).

Selama di kandungan dan setelah lahir, bayi baru lahir terpapar mikroba ibu dan lingkungan yang memulai pembentukan mikrobioma usus. Dalam tahun pertama kehidupan, diperkirakan 10^{13} hingga 10^{14} sel/ml yang terdiri dari 500-1000 spesies yang mengkolonisasi saluran pencernaan. Setelah penyapihan, mikrobiota usus menjadi lebih mapan, sehingga mikrobiota mempunyai finger print sendiri untuk hidup di dalam individu yang sehat seumur hidupnya (Johnson, 2020).

Bagian tubuh juga memengaruhi komposisi mikroba. Tubuh yang terpapar langsung dengan lingkungan biasanya lebih beragam. Kulit misalnya, Karakteristik fisik dan topografi kulit memainkan peran penting dalam membentuk komunitas mikroba yang sama antar lokasi. Faktor-faktor ini juga berperan dalam membentuk individualitas mikrobioma, sehingga setiap orang mempunyai jenis mikroba yang unik pada kulitnya, terlepas dari perbedaan bagian kulit.

Contoh lainnya adalah usus. Meskipun interaksi fisik antar manusia memengaruhi komposisi komunitas mikroba dari waktu ke waktu. Namun, mikrobioma di dalam usus masih mempertahankan komposisi yang relatif unik pada setiap orang. Hal ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa mikrobiota orang dewasa relatif stabil dan unik pada

setiap orang, dibandingkan anak dengan perubahan drastis selama tiga tahun pertama kehidupan. Perubahan pola makan dapat sangat memengaruhi struktur komunitas mikroba usus, dan pembersihan yang berlebihan dapat mengubah mikrobioma kulit untuk sementara. Namun, dalam kedua kasus, mikrobiota dan struktur asli muncul kembali saat kondisi aslinya terbentuk kembali. Pola makan sangat memengaruhi komposisi mikroba di setiap manusia. Meskipun, beberapa orang memakan makanan yang sama sama, namun komposisi mikroba dalam setiap manusia pasti berbeda dan unik (Johnson dkk, 2020; Ding dkk, 2022).



Gambar 8.3. Gambaran umum desain penelitian dari sampel manusia seperti feses
(Sumber: Johnson dkk, 2020)

Faktor lainnya adalah gaya hidup. Gaya hidup seseorang dapat memengaruhi komposisi mikroba dari individu tersebut karena adanya interaksi dengan lingkungannya yaitu makhluk hidup lain maupun tempat tinggalnya. Misalnya ada penelitian terdahulu menjelaskan bahwa pasangan yang hidup bersama

dengan hewan peliharaanya seperti anjing cenderung mempunyai komposisi mikroba yang sama di keduanya dibandingkan dengan pasangan yang hidup dengan anak anaknya maupun hanya hidup berdua dengan pasangannya mempunyai komposisi mikroba yang berbeda di setiap individu. Terakhir adalah sosiodemografis. Sosiodemografi seperti pendapatan, pekerjaan, pendidikan, usia, jenis kelamin, dan lain-lain juga memengaruhi komposisi mikroba (Johnson dkk, 2020).

Setiap bagian tubuh manusia mempunyai komposisi mikrobanya masing-masing. Contoh organ manusia yang mempunyai kelimpahan mikroba paling tinggi adalah paru. Paru-paru merupakan tempat yang kaya mikroba. Mikroba di paru-paru lebih beranekaragam dibandingkan dengan saluran pencernaan karena berhubungan dengan udara dan lendir dua arah yakni bisa dari pernapasan maupun pencernaan. Pada manusia yang sehat, mikroba paru-paru memiliki kepadatan rendah tetapi memiliki keanekaragaman yang tinggi dan saling berinteraksi. Pada tingkat filum, *Firmicutes*, *Bacteroidetes* dan *Proteobacteria* adalah filum yang paling umum ditemukan di manusia sehat. Pada tingkat genus, *Prevotella*, *Veillonella* dan *Streptococcus* merupakan mikroorganisme yang dominan. Komposisi mikrobioma paru ditentukan oleh imigrasi mikroba, eliminasi, dan tingkat pertumbuhan relatif anggota mikroba. Pada penyakit paru-paru, faktor-faktor ini dapat berubah, dan oleh karena itu terjadi pertumbuhan berlebih dari satu spesies dengan penurunan keanekaragaman mikroba. Pada salah satu penyakit paru-paru yang umum seperti asma, sampel bronkoskopi menunjukkan peningkatan kelimpahan *Haemophilus*, *Neisseria*, *Fusobacterium*, dan *Porphyromonas*. Sementara itu, contoh kelimpahan mikroba di dalam usus manusia sehat adalah terdapat genus *Ruminococcaceae*, *Escherichia*, *Shigella*, *Bifidobacterium*, *Bacteroides*, *Streptococcus*, *Lachnospiraceae*, *Clostridium*, *Clostridiales*, *Blautia*, *Roseburia*, *Ruminococcus*, *Faecalibacterium*, *Corynebacterium*, *Desulfovibrio*, *Dialister*, *Dorea*, *Flavonifractor*, *Lactobacillus*, *Oscillibacter*, *Sutterella*, *Turicibacter*, *Oscillospira*, *Parabacteroides*,

Akkermansia, *Alistipes*, *Collinsella*, *Prevotella*, *Firmicutes*, dan *Romboutsia* (Khatiwada & Subedi, 2020; Cheng dkk, 2023).

8.3.3 Sampel tanah

Tanah di permukaan biasanya lebih rendah kandungan karbon organiknya, total nitrogen, rendahnya diversitas enzim karbohidrat aktif (CAZym), rendahnya motilitas dan lainnya. Hal tersebut berkebalikan dengan tanah yang berada di risosfer. Selain itu, jumlah total DNANYa juga tinggi di risosfer. Contoh cara pengambilan sampel tanah adalah Tanah digali dengan ukuran 5x20 cm dan diambil tanah yang berada di kedalaman tersebut. Apabila mengambil tanah di dekat akar maka akar digoyang untuk menghilangkan tanah gembur di sekitar akar, setelah itu, diambil tanah yang melekat pada akar. kemudian dikumpulkan dan di simpan pada plastik steril, dimasukan ke dalam *cool box* dan dibawa ke laboratorium untuk di simpan pada suhu 20 °C sampai digunakan (Yang dkk., 2020).

Mikroba yang ada di tanah sangat beranekaragam dan mempunyai peran masing-masing. Misalnya filum mikroba yang ditemukan di tanah adalah Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes, dan Chloroflexi. Kelompok genus yang berasal dari filum ini adalah *Rubrivivax*, *Nitrospira*, *Methylothermobacter*, *Methyloversatilis* dan *Acidaminobacter*. Kelima genus ini memainkan peran penting dalam mempertahankan struktur dan fungsi komunitas ekologis sehingga mereka ditentukan sebagai keystone spesies. *Rubrivivax* adalah bakteri fotosintetik yang dapat berperan dalam proses transfer elektron potensial redoks tinggi dan degradasi hidrokarbon aromatik. *Nitrospira* merupakan kelompok bakteri pengoksidasi nitrit yang merupakan bagian dari siklus nitrogen biogeokimia. *Methylothermobacter* dan *Methyloversatilis* adalah kelompok methylophilic yang membutuhkan metil untuk pertumbuhannya. *Methyloversatilis* juga berkontribusi terhadap biodegradasi Benazolin-Ethyl dalam lumpur aktif. *Acidaminobacter*, takson yang memfermentasi asam amino, telah terdeteksi dalam komunitas metanogenik yang menurunkan polisyklis aromatic hydrocarbon (PAH). Oleh karena itu, kelima

taksa kunci dapat memainkan peran penting dalam proses fungsi ekologis. Filum mikroba lainnya yang melimpah di tanah adalah Acidobacteria, Verrucomicrobia, Planctomycetes, Gemmatimonadetes, Nitrospirae, Elusimicrobia, Parcubacteria, Latescibacteria, Atribacteria, Saccharibacteria, Aminicenantes, Spirochaetae, Deinococcus-Thermus, dan Chlorobi. Selain itu kelompok kapang juga ditemukan di tanah seperti filum Ascomycota, Basidiomycota, Chytridiomycota, Ciliophora, Glomeromycota, Metazoa, Diatomea, Choanomonada, Zoopagales, Nucleariida, Schizoplasmodiida, Mucoromycotina, dan Ichthyosporidia. Ditambah lagi dengan kelompok archae yang melimpah di tanah adalah filum Thaumarchaeota dan Euryarchaeota (Eo & Park, 2016; Jiao dkk, 2016; Kasemodel dkk, 2019; Wang dkk., 2019; Xiao dkk, 2019; Yang dkk, 2020; Dlamini dkk., 2023).

8.3.4 Sampel air

Sampel yang dapat digunakan untuk melihat komunitas mikroba di satu perairan sangat beragam, seperti air, sediment, biofilm, mikroplastik, dan sponge. Setiap sampel mempunyai perlakuan yang unik sebelum dianalisis keanekaragaman mikroba. Misalkan sampel hujan es diambil dengan cara es dikumpulkan dan dibilas dengan campuran larutan 1% benzalkonium klorida dan 62% etanol untuk menghentikan pertumbuhan mikroba, diikuti dengan pembilasan menyeluruh menggunakan aquabidest hingga melelehkan sekitar 1 cm dari lapisan luar secara merata. Selanjutnya sampel disentrifugasi pada 12.000 rpm selama 90 menit pada suhu 4 °C untuk memperoleh pellet. Pellet disuspensikan kembali dalam 10 µL aquadest steril. kemudian suspensi dilakukan siklus pembekuan (-80 °C) tiga kali dan pemanasan (65 °C) untuk melepaskan isi sel. Terakhir pellet digunakan untuk isolasi DNA (Kozjek dkk, 2023).

Contoh sampel lainnya adalah sediment, mikroplastik, dan air. Sedimen dikumpulkan secara acak pada jarak sekitar 30 m sepanjang pantai/danau dengan kedalaman 0-10 cm dan kemudian dicampur secara merata untuk membentuk sampel komposit. Selain itu, sampel mikroplastik dan partikel kayu

dikumpulkan dan dibilas menggunakan aquadest steril dan disaringan pada saringan berukuran 50 μm yang telah disterilkan. Sementara itu, sampel air diambil pada kedalaman 0–15 cm, sedimen diambil dengan kedalaman (0–10 cm) (Abia dkk, 2018; Ding dkk, 2019; Gong dkk, 2019; Amelia dkk, 2020; González-Pleiter dkk, 2021; Hu dkk, 2021; Alotaibi dkk, 2022)

Diversitas mikroba bergantung pada substrat. Contoh mikroba yang melimpah di es adalah komunitas bakteri yang berasal dari filum Proteobacteria dan Firmicutes (Kozjek dkk, 2023). Sementara mikroba yang melimpah di air adalah filum Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Acidobacteria, Cyanobacteria, Chloroflexi, Firmicutes, Verrucomicrobia, Planctomycetes, Nitrospirae, Hydrogenedentes, Candidatus Saccharibacteria, Parcubacteria, Chlamydae, Spirochaetes, Armatimonadetes, dan Fibrobacteres (Abia dkk, 2018; Alotaibi dkk, 2022). Mikroba yang melimpah di sediment adalah mikroba yang berasal dari filum Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Acidobacteria, Cyanobacteria, Planctomycetes, Chloroflexi, Firmicutes, Verrucomicrobia, Nitrospirae, Chlorobi, Gemmatimonadetes, Caldithrix, Armatimonadetes, Epsilonbacteraeota, Latescibacteria, Patescibacteria, Spirochaetes, dan Fusobacteria (Ding dkk, 2019; Filippini dkk, 2019; Nathan dkk, 2020). Sementara itu, diversitas mikroba dari sampel mikroplastik terdiri dari filum Acidobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Chlorobi, Chloroflexi, Cyanobacteria, Deferribacteres, Firmicutes, Fusobacteria, Gracillibacteria, Ignavibacteria, Latescibacteria, Parcubacteria, Pemgrinibacteria, Planctomycetes, Proteobacteria, Spirochaetes, Synergistetes, Tenericutes, dan Verrucomicrobia (Curren & Leong, 2019; Ding dkk, 2019; Wu dkk, 2019; González-Pleiter dkk, 2021; Hu dkk, 2021). Berdasarkan keragaman ketiga substrat tersebut menunjukkan bahwa terdapat beberapa filum yang sama ditemukan di ketiga substrat tersebut. Proteobacteria, Actinobacteria, dan Bacteroidetes adalah kelompok filum yang melimpah lebih dari 75% kecuali di sampel sediment. Partikel kayu dan mikroplastik akan memperkaya Proteobacteria dan Bacteroidetes dibandingkan dengan komunitas bakteri di air.

Sedimen merupakan wadah untuk komunitas bakteri karena akumulasi nutrisi dari air dan lingkungan sekitarnya. Komunitas bakteri sedimen juga memiliki kekayaan dan keanekaragaman yang lebih tinggi daripada air.

DAFTAR PUSTAKA

- Abia, A.L.K., Alisoltani, A., Keshri, J., Ubomba-Jaswa. 2018. *Metagenomic analysis of the bacterial communities and their functional profiles in water and sediments of the Apies River, South Africa, as a function of land use. Science of the total environment.* 616-617: 326-334. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.322>.
- Abid, L., Smiri, M., Federici, E., Lievens, B., Manai, M., Yan, Y., Sadfi-Zouaoui, N. *Diversity of rhizospheric and endophytic bacteria isolated from dried fruit of Ficus carica. Saudi journal of biological sciences.* 29: 103398. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103398>.
- Alotaibi, M.O., Mohammed, A.E., Eltom, K.H. 2022. *Metagenomic analysis of bacterial communities of Wadi Namar Lake, Riyadh, Saudi Arabia. Saudi journal of biological sciences.* 29: 3749-3758. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.03.001>.
- Amelia, T.S.M., Lau, N., Amirul, A.A., Bhupalan, K. 2020. *Metagenomic data on bacterial diversity profiling of high-microbial-abundance tropical marine sponges Aaptos aaptos and Xestospongia muta from waters off terengganu, South China Sea. Data in Brief.* 31: 105971. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105971>.
- Arrigoni, E., Antonielli, L., Pindo, M., Pertot, I., Perazzolli, M. 2018. *Tissue age and plant genotype affect the microbiota of apple and pear bark. Microbiological research.* 211: 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.04.002>.
- Aswani, R., Jishma, P., Radhakrishnan. 2020. *Endophytic bacteria from the medicinal plants and their potential applications. Microbial Endophytes: Prospects for Sustainable Agriculture.* 1: 15-36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818734-0.00002-4>.
- Bashir, I., War, A.F., Rafiq, I., Reshi, Z.A., Rashid, A., Shouche, Y.S. 2022. *Phyllosphere microbiome: Diversity and functions. Microbiological research.* 254: 126888. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126888>.

- Carles, L., Wullschleger, S., Joss, A., Eggen R.I.L., Schirmer, K., Schuwirth, N., Stamm, C., Tlili, A. 2022. *Wastewater microorganisms impact microbial diversity and important ecological functions of stream periphyton*. *Water research*. 225: 119119. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119119>.
- Chen, X., Wicaksono, W.A., Berg, G., Cernava, T. 2021. *Bacterial communities in the plant phyllosphere harbour distinct responders to a broad-spectrum pesticide*. *Science of the Total Environment*. 751: 141799. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141799>.
- Cheng, Q., Zhang, L., Liu, F., Fan, C., Wu, T., Li, Y., Hou, H., Ma, Y., Tan, Y., Li, Y., Hai, Y., Zhang, Y. 2023. *Metagenomics reveals structural and functional gut mycobiota dysbiosis in Tibetan subjects with coronary heart disease*. *Human gene*. 36: 201158. <https://doi.org/10.1016/j.humgen.2023.201158>.
- Costa, D., Fernandes, T., Martins., Pereira, J.S., Tavares, R.M., Santos, P.M., Baptista, P., Lino-Neto, T. 2021. *Illuminating Olea europaea L. endophyte fungal community*. *Microbiological research*. 245: 126693. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126693>.
- Curren, E., Leong, S.C.Y. 2019. *Profiles of bacterial assemblages from microplastics of tropical coastal environments*. *Science of the total environment*. 655: 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.250>.
- Darlison, J., Mogren, L., Rosberg, A.K., Gruden, M., Minet, A., Line, C., Mieli, M., Bengtsson, T., Hakansson, A., Uhlig, E., Becher, P.G., Karlsson, M., Alsanius, B. W. 2019. *Leaf mineral content govern microbial community structure in the phyllosphere of spinach (Spinacia oleracea) and rocket (Diplotaxis tenuifolia)*. *Science of the Total Environment*. 675: 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.254>.
- Ding, L., Mao, R.F., Guo, X., Yang, X., Zhang, Q., Yang, C. 2019. *Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China*. *Science of the total*

- environment*. 667: 427-434.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.332>.
- Ding, X., Zhou, J., Chai, Y., Yan, Z., Liu, X., Dong, Y., Mei, X., Jiang, Y., Lei, H. 2022. *A metagenomic study of the gut microbiome in PTB'S disease. Microbes and infection*. 24: 104893.
<https://doi.org/10.1016/j.micinf.2021.104893>.
- Dlamini, S.P., Akanmu, A.O., Fadiji, A.E., Babalola, O.O. 2023. *Maize rhizosphere modulates the microbiome diversity and community structure to enhance plant health Saudi Journal of Biological Sciences*. 30: 103499.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103499>.
- Eo, J., Park, K. 2016. *Long-term effects of imbalanced fertilization on the composition and diversity of soil bacterial community. Agriculture, Ecosystems and Environment*. 231: 176-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.039>.
- Filippini, G., Bugnot, A.B., Johnston, E.L., Ruszczuk, J., Potts, Scanes, P., Ferguson, A., Ostrowski, M., Varkey, D., Dafforn, K.A. 2019. *Sediment bacterial communities associated with environmental factors in Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons (ICOLLs). Science of the total environment*. 693: 133462.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.268>.
- Gong, M., Yang, G., Zhuang, L., Zeng, E.Y. 2019. *Microbial biofilm formation and community structure on low-density polyethylene microparticles in lake water microcosms. Environmental pollution*. 252: 94-102.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.090>.
- González-Pleiter, M., Velazquez, D., Casero, M.C., Tytgat, B., Verleyen, E., Leganes, F., Rosal, R., Quesada, A., Fernandez-Pinas, F. 2021. *Microbial colonizers of microplastics in an Arctic freshwater lake. Science of the total environment*. 795: 148-640.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148640>.
- Hu, H., Jin, D., Yang, Y., Zhang, J., Ma, C., Qiu, Z. 2021. *Distinct profile of bacterial community and antibiotic resistance genes on microplastics in Ganjiang River at the watershed level*.

- Environmental research.* 200: 111363.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111363>.
- Hu, L., Zi, H. B., Wu, P. F., Wang, Y., Lerdau, M., Wu, X. W., & Wang, C. T. 2019. *Soil bacterial communities in grasslands revegetated using Elymus nutans are largely influenced by soil pH and total phosphorus across restoration time.* *Land Degrad. Dev.* 30 (18): 2243–2256.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3414>.
- Jiao, S., Liu, Z., Lin, Y., Yang, J., Chen, W., Wei, G. 2016. *Bacterial communities in oil contaminated soils: Biogeography and co-occurrence patterns.* *Soil Biology & Biochemistry.* 98: 64–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.005>.
- Johnson, K.V.A. 2020. *Gut microbiome composition and diversity are related to human personality traits.* *Human Microbiome Journal.* 15: 100069.
<https://doi.org/10.1016/j.humic.2019.100069>.
- Kasemodel, M.C., Sakamoto, I.K., Varesche, M.B.A., Rodrigues. 2019. *Potentially toxic metal contamination and microbial community analysis in an abandoned Pb and Zn mining waste deposit* *Science of the total environment.* 675: 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.223>.
- Khatiwada, S., Subedi, A. 2020. *Lung microbiome and coronavirus disease 2019 (COVID-19): Possible link and implications.* *Human microbiome journal.* 17: 100073.
<https://doi.org/10.1016/j.humic.2020.100073>.
- Kozjek, M., Vengust, D., Radosevic, T., Zitko, G., Koren, S., Toplak, N., Jerman, I., Butala, M., Podlogar, M., Virsek, M.K. 2023. *Dissecting giant hailstones: A glimpse into the troposphere with its diverse bacterial communities and fibrous microplastics.* *Science of the total environment.* 856: 158786.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158786>.
- Ma, T., Yang, K., Yang, L., Zhu, Y., Jiang B., Xiao, K. S., Fang, M., Gong, J., Gu, Z., Xiang, P., Liu, Y., & Li, J. 2023. *Different rotation years change the structure and diversity of microorganisms in the nitrogen cycle, affecting crop yield.* *Applied Soil*

- Ecology*, 193: 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105123>.
- Mendez-Garcia, C., Bargiela, R., Martinez-martinez, M., Ferrer, M. 2018. *Metagenomic Protocols and Strategies*. *Metagenomic*. 1: 15-54. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102268-9.00002-1>.
- Nathan, V.K., Vijayan, J., Ammini, P. 2020. *Comparison of bacterial diversity from two mangrove ecosystems from India through metagenomic sequencing*. *Regional studies in marine science*. 35: 101184.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101184>.
- Perazzolli, M., Nesler, A., Giovannini, O., Antonielli, L., Puopolo, G., Pertot, I. 2020. *Ecological impact of a rare sugar on grapevine phyllosphere microbial Communities*. *Microbiological research*. 232: 126387.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126387>.
- Rupert, R., Lie, G.J.C.W., John, D.V., Annammala, K.V., Jani, J., Rodrigues, K.F. 2020. *Metagenomic data of bacterial community from different land uses at the river basin, Kelantan*. *Data in Brief*. 33: 106351.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106351>.
- Srivastava, N., Gupta, B., Gupta, S., Danquah, M. K., & Sarethy, I. P. 2019. *Analyzing functional microbial diversity: an overview of techniques*. *Microbial diversity in the genomic era*. 79-101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814849-5.00006-X>.
- Torsvik, V., & Øvreås, L. 2002. *Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems*. *Current Opinion in Microbiology*, 5 (3): 240-245.
[https://doi.org/10.1016/s1369-5274\(02\)00324-7](https://doi.org/10.1016/s1369-5274(02)00324-7).
- Wang, N., Wang, A., Xie, J., He, M. 2019. *Responses of soil fungal and archaeal communities to environmental factors in an ongoing antimony mine area* *Science of the total environment*. 652: 1030-1039.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.300>.
- Wu, X., Liu, H., Fu, B., Wang, Q., & Liu, G. 2017. *Effects of land-use change and fertilization on N₂O and NO fluxes, the*

- abundance of nitrifying and denitrifying microbial communities in a hilly red soil region of southern China. Appl. Soil Ecol.* 120: 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.004>.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, M., Wang, Y. 2019. *Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm. Water research.* 165: 114979. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114979>.
- Xiao, E., Ning, Z., Xiao, T., Sun, W., Qiu, Y., Zhang, Y., Chen, J., Gou, Z., Chen, Y. 2019. *Variation in rhizosphere microbiota correlates with edaphic factor in an abandoned antimony tailing dump. Environmental pollution.* 253: 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.097>.
- Xu, W., Wang, F., Zhang, M., Ou, T., Wang, R., Strobel, G., Xiang, Z., Zhou, Z., Xie, J. 2019. Diversity of cultivable endophytic bacteria in mulberry and their potential for antimicrobial and plant growth-promoting activities. *Microbiological research.* 229: 126328. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126328>.
- Yan, K., Han, W., Zhu, Q., Li, C., Dong, Z., Wang, Y. 2022. *Leaf surface microtopography shaping the bacterial community in the phyllosphere: evidence from 11 tree species. Microbiological research.* 254: 126897. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126897>.
- Yang, K., Luo, S., Hu, L., Chen, B., Xie, Z., Ma, B., Ma, W., Du, G., Ma, X., Roux, X.L. 2020. *Responses of soil ammonia-oxidizing bacteria and archaea diversity to N, P and NP fertilization: Relationships with soil environmental variables and plant community diversity. Soil Biology and Biochemistry.* 145: 107795. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107795>.

BAB 9

JENIS PEMERIKSAAN MIKROBIOLOGI

Oleh Adriani

9.1 Pendahuluan

Mikroorganisme merupakan makhluk hidup yang berukuran kecil (mikroskopik) di alam semesta dan hidup berdampingan dengan manusia. Contoh mikroorganisme adalah bakteri, jamur, protozoa dan virus. Meskipun berukuran kecil namun pengaruh yang ditimbulkan memiliki dampak yang besar bagi kelangsungan hidup manusia. Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur berperan sebagai organisme pengurai/saprofit dalam rantai makanan. Hasil penguraian bahan organik oleh bakteri akan digunakan oleh tumbuhan sebagai fertiliser. Selain itu, mikroorganisme juga menghasilkan produk pangan seperti tempe, tape, kecap, yogurt dan keju yang dimanfaatkan untuk kebutuhan manusia. Dalam dunia kesehatan, mikroorganisme menghasilkan metabolit sekunder yang memiliki aktivitas sebagai antimikroba, antidiabetes, antimalaria, antiinflamasi, antioksidan maupun antikanker. Selain itu, mikroorganisme seperti bakteri berperan sebagai flora normal dalam tubuh manusia yaitu membantu proses pencernaan pada usus halus. Dalam bidang pertanian, mikroorganisme membantu pertumbuhan tanaman melalui penyediaan nutrisi, penyediaan hormon dan melindungi dari kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan (Adriani, 2017; Winarsih *et al*, 2022; Adriani dkk, 2023). Meskipun mikroorganisme memiliki banyak peranan yang menguntungkan, namun ternyata mikroorganisme juga dapat merugikan.

Mikroorganisme merupakan agen infeksi penyakit dan sumber kontaminasi bahan pangan. Beberapa mikroorganisme bersifat patogen terhadap manusia dan hewan. Sebagai contoh,

bakteri *Escherichia coli* menyebabkan diare, *Mycobacterium tuberculosis* menyebabkan tuberkulosis, *Bacillus anthracis* menyebabkan penyakit antrax pada hewan, jamur *Candida albicans* menyebabkan keputihan pada wanita. Bakteri dan jamur dapat mengkontaminasi bahan pangan sehingga menyebabkan perubahan struktur, bau dan rasa yang berujung pada kerusakan (Adriani, 2014; Yanuar et al., 2023). Apabila makanan yang terkontaminasi dikonsumsi akan menimbulkan penyakit seperti diare maupun keracunan. Oleh karena itu penting untuk senantiasa menjaga kebersihan diri sendiri, lingkungan maupun bahan pangan yang akan dikonsumsi agar terhindar dari mikroorganisme patogen. Salah satu cara untuk mendeteksi keberadaan mikroorganisme di sekitar kita adalah dengan melakukan pemeriksaan mikrobiologi. Tujuan pemeriksaan mikrobiologi adalah mengidentifikasi jenis mikroorganisme penyebab penyakit, menganalisis sejauh mana kerusakan yang terjadi akibat infeksi mikroorganisme dan menghitung jumlah mikroorganisme. Dengan melakukan pemeriksaan mikrobiologi, akan mudah menegakkan diagnosis, langkah pengobatan yang akan dilakukan dan upaya pencegahan dari mikroorganisme patogen. Bab ini akan membahas jenis pemeriksaan mikrobiologi yang umum dilakukan di laboratorium.

9.2 Sampel Untuk Pemeriksaan Mikrobiologi

Untuk melakukan pemeriksaan mikrobiologi diperlukan sampel atau bahan yang akan diperiksa. Sampel dapat berasal dari tubuh manusia/pasien maupun dari makanan atau minuman yang diduga tercemar oleh mikroorganisme. Sampel dari tubuh manusia meliputi darah, urine, sputum, nanah, bilasan bronkus maupun jaringan tubuh. Adapun sampel makanan dan minuman meliputi air minum, air sungai, produk makanan yang akan dipasarkan dan jajanan anak sekolah.

9.3 Jenis Pemeriksaan Mikrobiologi

Pemeriksaan mikrobiologi berdasarkan jenis sampel dibedakan menjadi 2 yaitu :

9.3.1 Pemeriksaan mikrobiologi untuk sampel klinis

Pemeriksaan mikrobiologi untuk sampel klinis umumnya berkaitan dengan sampel yang berasal dari tubuh pasien. Namun hal ini tidak berlaku mutlak, karena pada kenyataannya jenis pemeriksaan sampel klinis dapat juga diterapkan pada sampel mikrobiologi lainnya yang berasal dari alam. Jenis pemeriksaan tersebut meliputi pemeriksaan makroskopis, pemeriksaan mikroskopis, uji biokimia dan analisis menggunakan polymerase reaction chain (PCR).

1. Pemeriksaan makroskopik

Pemeriksaan makroskopik dilakukan untuk mengidentifikasi bakteri atau jamur berdasarkan hasil pengamatan morfologi koloni menggunakan mata biasa (tanpa alat bantu mikroskop). Pemeriksaan makroskopis bakteri dapat dilakukan setelah sampel diinokulasi pada medium agar padat dan diinkubasi selama 18-24 jam. Berbeda dengan bakteri, jamur membutuhkan waktu yang lebih lama untuk pertumbuhannya, yaitu sekitar 3-7 hari. Karakteristik morfologi bakteri yang diamati secara langsung meliputi bentuk, ukuran, warna, elevasi, tepi, tampilan koloni dan teksturnya (Gambar 9.1).

a. Bentuk.

Koloni bakteri memiliki bentuk yang beragam seperti bulat, *irregular*, lonjong, filament atau rhizoid. Koloni jamur memiliki bentuk bulat, *irregular* maupun rhizoid.

b. Ukuran

Koloni bakteri memiliki ukuran yang bervariasi yaitu menyerupai titik (*punctiform*), kecil, sedang dan besar. Koloni jamur berukuran lebih besar daripada koloni bakteri dan tumbuh menyebar.

Forms of the Bacterial Colony						
Shape	 Circular	 Punctiform	 Irregular	 Filamentous	 Rhizoid	 Spindle
Elevation	 Raised	 Convex	 Flat	 Umbonate	 Crateriform	 Pulvinate
Margin	 Entire	 Undulate	 Filiform	 Curled	 Lobate	 Erose

Gambar 9.1. Bentuk koloni bakteri

<https://biologyreader.com/wpcontent/uploads/2022/04/forms-of-the-bacterial-colony.jpg>

c. Warna.

Secara umum, koloni bakteri ada menghasilkan pigmen (kuning, biru, pink), namun ada juga yang tidak menghasilkan pigmen (putih dan krem). Koloni jamur memiliki warna putih, hitam, coklat kekuningan, hijau, abu-abu atau krem.

d. Elevasi

Secara umum elevasi koloni bakteri ada yang rata, raised, cembung, bentuk bantal (*pulvinate*) dan cembung di bagian tengah (*umbonate*). Untuk koloni jamur elevasinya rata.

e. Tepi

Secara umum koloni bakteri memiliki tepi yang rata (*entire*), bergelombang (*undulate*), berlekuk (*lobate*), melengkung (*curled*), bergerigi (*rhizoid*, *serrate*), *irregular*, rhizoid, atau filamentous.

f. Tampilan koloni

Tampilan koloni bakteri meliputi penampilan morfologi seperti mengkilap, kusam atau berawan. Tampilan koloni jamur yaitu menyerupai beludru, namun ada juga yang tampak licin dan mengkilap.

g. Tekstur

Koloni bakteri memiliki tekstur mukoid/bergetah/kental, kering atau rapuh, sedangkan pada jamur menyerupai kapas.

2. Pemeriksaan mikroskopik

Setelah pemeriksaan makroskopik selesai dilanjutkan dengan pemeriksaan mikroskopik yang bertujuan untuk mengidentifikasi sel mikroba secara mikroskopik. Jenis pemeriksaan mikroskopik yang umum ditemukan di laboratorium adalah pewarnaan Gram dan pewarnaan basil tahan asam (BTA).

a. Pewarnaan gram

Pewarnaan gram diperkenalkan pertama kali oleh Hans Christian Gram, seorang ahli bakteriologi berkebangsaan Denmark pada tahun 1882. Beliau menemukan metode pewarnaan gram ketika hendak melakukan pengamatan bakteri pneumonia di bawah mikroskop. Dalam pengerjaannya, Cristian Gram menggunakan beberapa reagen untuk mewarnai bakteri yang akan diamati berdasarkan komponen dinding selnya. Ternyata penggunaan beberapa reagen tersebut menyebabkan bakteri Pneumonia terlihat dengan jelas di bawah mikroskop. Dari sinilah muncul istilah pewarnaan Gram untuk membedakan jenis bakteri berdasarkan komponen peptidoglikan yang terdapat pada dinding sel. Sampai saat ini pewarnaan gram masih digunakan sebagai prosedur standar dalam pemeriksaan sampel klinis maupun non klinis.

Jenis reagen yang digunakan dalam pewarnaan gram ada 4 yaitu:

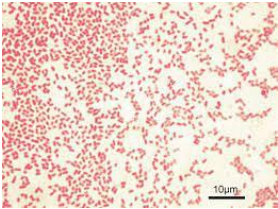
- 1) *Kristal violet/larutan A/pewarna primer*. Pemberian kristal violet pada sampel merupakan tahap awal pewarnaan gram dan bertujuan untuk mewarnai dinding sel bakteri. Setelah diberikan kristal violet, sampel didiamkan selama 1 menit agar pewarna dapat diserap oleh dinding sel bakteri.

- 2) *Iodine/larutan B.* Pemberian larutan iodine bertujuan untuk memaksimalkan peran kristal violet dalam mewarnai dinding sel bakteri. Sampel didiamkan selama 1 menit setelah diberikan iodine.
- 3) *Alkohol/larutan C.* Fungsi alkohol dalam pewarnaan gram adalah melunturkan pewarna primer (kristal violet) sehingga memudahkan sel dalam menyerap zat warna penutup. Pemberian alkohol pada sampel cukup sebentar saja yaitu 15 detik.
- 4) *Safranin/larutan D.* Fungsi safranin adalah sebagai cat penutup dalam pewarnaan gram dan memberikan warna merah pada sel sehingga mudah diamati di bawah mikroskop. Sampel didiamkan selama 30 detik setelah diberikan safranin dan selanjutnya dibilas dengan air mengalir. Hasil pewarnaan gram diperlihatkan pada tabel 1.

Pewarnaan gram tergolong pewarnaan diferensial, yaitu pewarnaan yang bertujuan untuk membedakan antara bakteri gram positif dengan bakteri gram negatif berdasarkan struktur dinding selnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 9.1 berikut.

Tabel 9.1. Perbedaan antara bakteri gram positif dengan bakteri gram negative

Pembeda	Bakteri Gram Positif	Bakteri Gram Negatif
Komponen dinding sel - Lapisan peptidoglikan - Lipid - Asam tekoat	Tebal Sedikit (1-4%) Ada	Tipis Tebal (11-22%) Tidak ada
Ketahanan terhadap asam	Tahan	Tidak

Pembeda	Bakteri Gram Positif	Bakteri Gram Negatif
Kemampuan menyerap zat warna safranin	Tidak menyerap	Menyerap
Hasil pewarnaan gram	Ungu 	Merah 
Contoh	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>

b. Pewarnaan BTA

Pewarnaan BTA termasuk pewarnaan diferensial dan bertujuan untuk membedakan bakteri tahan asam dengan bakteri yang tidak tahan asam. Orang yang pertama kali memperkenalkan pewarnaan BTA adalah Franz Ziehl (1859-1926) dan Freeserich Neelsen (1854-1894), sehingga pewarnaan ini juga dikenal sebagai pewarnaan Ziehl Neelsen (ZN). Pewarnaan BTA sendiri merupakan alat diagnostik standar untuk penyakit tuberculosis yang direkomendasikan oleh WHO. Hal ini disebabkan karena pewarnaan BTA memiliki kelebihan berupa mudah dilakukan, reagen yang digunakan mudah diperoleh, hasil akurat dan diperoleh dalam waktu singkat serta memberikan latar yang kontras (warna biru) dengan bakteri yang diamati (warna merah), seperti yang terlihat pada gambar 2. Namun demikian pewarnaan BTA juga memiliki kekurangan yaitu mampu mewarnai jenis *Mycobaterium* lainnya selain *Mycobacterium tuberculosis*(*M.tuberculosis*) Dengan

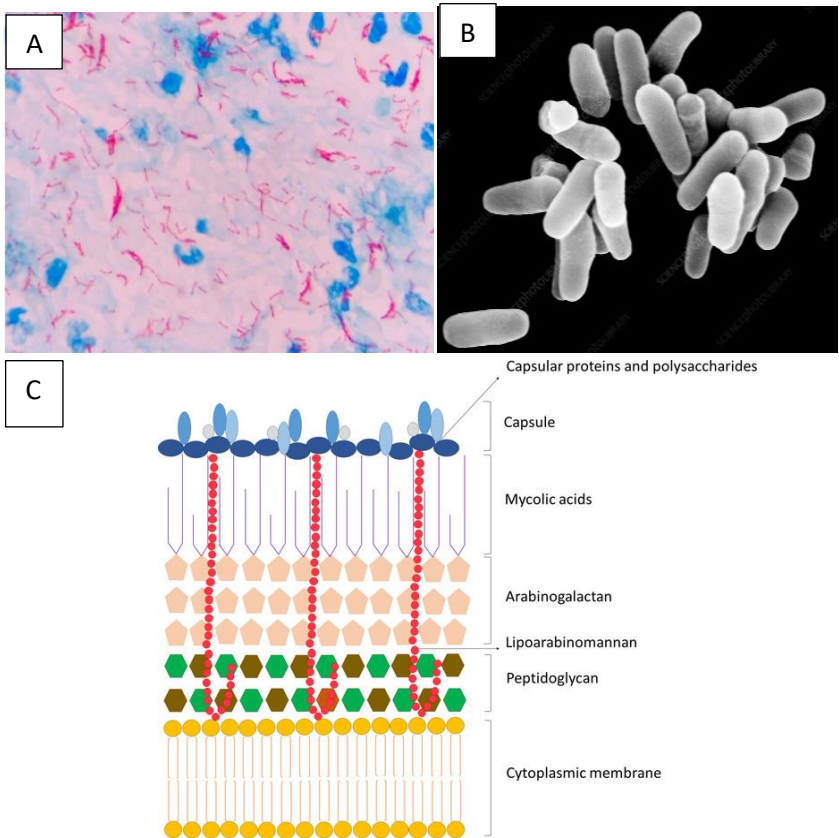
demikian ada kemungkinan memberikan hasil positif palsu dalam penegakan diagnosis

Pewarnaan BTA spesifik untuk mewarnai jenis *Mycobacterium* terutama *M.tuberculosis*. Hal ini disebabkan karena komposisi dinding sel *M.tuberculosis* berbeda dengan kebanyakan bakteri pada umumnya. *M.tuberculosis* memiliki komponen lipid yang tinggi ($\pm 60\%$) dan *micolid acid* yang menyebabkan bakteri ini bersifat tahan asam dan sulit untuk diwarnai. Dalam pewarnaan BTA digunakan metode khusus berupa pemanasan sampel bakteri yang telah ditetesi dengan pewarna karbol fuksin untuk membuka komponen lipid dinding sel yang tebal. Karbol fuksin (warna merah) selanjutnya akan menembus dinding sel dan menuju sitoplasma dan mewarnainya. Ikatan yang terbentuk antara sitoplasma dengan karbol fuksin sangat kuat sehingga tidak mudah dilunturkan. Hal inilah yang menyebabkan *M.tuberculosis* berwarna merah meskipun telah diberi metilen blue.

Apabila hasil pewarnaan BTA telah diamati, maka tahapan berikutnya adalah interpretasi hasil berdasarkan *International Union Against Tuberculosis Lung Disease* (IUATLD). Semakin banyak jumlah BTA yang ditemukan (+1/+2/+3) maka semakin besar kemungkinan orang/pasien tersebut menularkan TBC kepada orang lain. Interpretasi BTA berdasarkan IUATLD dapat dilihat pada Tabel 9.2 di bawah ini.

Tabel 9.2. Interpretasi BTA berdasarkan IUATLD

Negatif	Apabila tidak ditemukan BTA dalam 100 lapang pandang
1+	Apabila ditemukan 10-99 BTA dalam 100 lapang pandang
2+	Apabila ditemukan 1-10 BTA setiap 1 lapang pandang
3+	Apabila ditemukan > 10 BTA dalam 1 lapang pandang



Gambar 9.2. Hasil pewarnaan BTA secara mikroskopik (A), visualisasi *M. tuberculosis* menggunakan SEM (B), dan struktur dinding sel *M. tuberculosis*. <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0753332217336557-gr2.jpg>

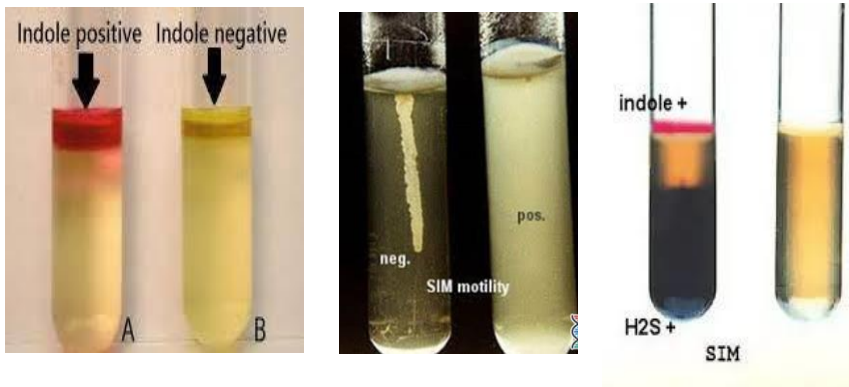
3. Uji biokimia

Uji biokimia bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat fisiologi atau karakteristik bakteri yang berhasil diisolasi ataupun yang diperoleh dari sampel. Dengan mengetahui karakteristik bakteri nantinya akan memudahkan proses identifikasi. Pada dasarnya uji biokimia berkaitan dengan proses metabolisme yang terjadi di dalam sel bakteri. Oleh karena itu, dalam pengujian biokimia digunakan reagen/media yang berperan sebagai substrat untuk

metabolisme sel bakteri sekaligus mendeteksi produk yang dihasilkan Beberapa uji biokimia yang umum dilakukan dalam pengujian mikrobiologi adalah :

a. Uji SIM (*Sulfide indole motility*)

Uji SIM umumnya digunakan untuk membedakan bakteri dari golongan Enterobacteriaceae. Prinsip pengujian SIM adalah melihat kemampuan bakteri memproduksi sulfur (H_2S), senyawa indol dan motilitas dalam media agar semisolid. Untuk pengujian ini digunakan media diferensial berupa media SIM dengan komposisi pepton, tripton, ferrous ammonium sulfat, sodium thiosulfate dan agar. Hasil positif uji SIM ditandai dengan perubahan warna media menjadi hitam, yang menunjukkan produksi H_2S oleh bakteri. Indikator hasil positif lainnya adalah terbentuk warna merah pada permukaan media SIM setelah ditetesi dengan reagen Kovac's yang menunjukkan bahwa bakteri menghasilkan indol. Terbentuknya koloni bakteri yang tumbuh menyebar di daerah sekitar bekas tusukan ose menandakan bahwa bakteri yang diuji bersifat motil.

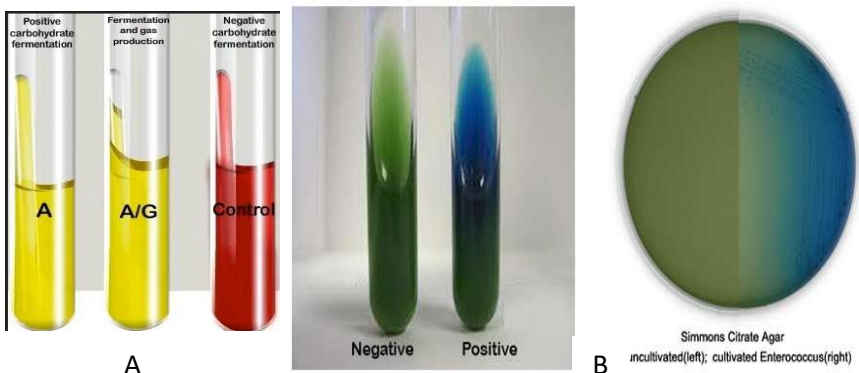


Gambar 9.3. Hasil positif untuk uji SIM.

https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQyiDWMDh27rKZ_5HpfVHu6egffcKGr5hoxbg&usqp=CAU

b. Uji fermentasi karbohidrat

Uji fermentasi karbohidrat bertujuan untuk melihat kemampuan bakteri dalam menggunakan karbohidrat tertentu sebagai sumber energi. Jenis karbohidrat yang dimaksud adalah glukosa, laktosa, dan sukrosa. Kemampuan bakteri memfermentasi karbohidrat ditandai dengan perubahan warna media dan terbentuk gelembung pada tabung durham. Warna medium yang berubah dari merah menjadi kuning disebabkan karena PH media menjadi asam akibat aktivitas bakteri memfermentasi karbohidrat. Gelembung gas yang terbentuk pada tabung durham menunjukkan bahwa fermentasi karbohidrat oleh bakteri uji menghasilkan gas. Hasil uji fermentasi karbohidrat diperlihatkan pada Gambar 9.4A.



Gambar 9.4. Hasil fermentasi karbohidrat (A) dan sitrat (B) oleh bakteri ([https://i0.wp.com/microbeonline.com](https://i0.wp.com/microbeonline.com;);

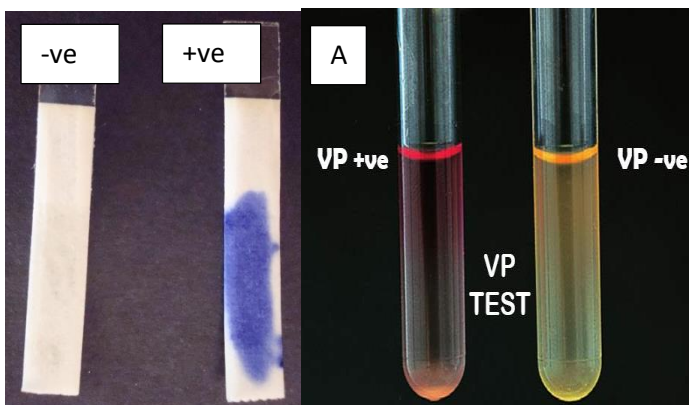
c. Uji sitrat

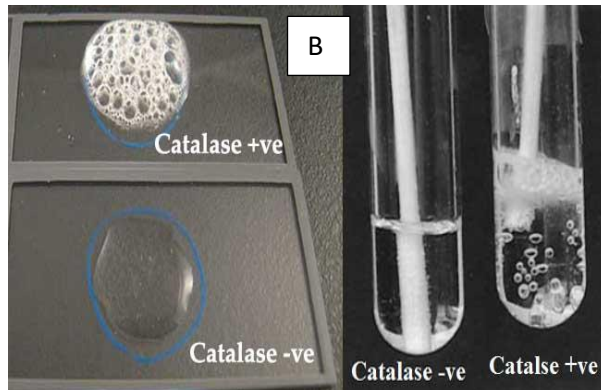
Sumber karbon pada mikroba tidak hanya bersumber dari karbohidrat, namun juga berasal dari senyawa sitrat. Contoh mikroba yang mampu memfermentasi sitrat adalah *Aspergillus niger* dan beberapa bakteri enterobacteriaceae (Kusiyanto dkk, 2019). Untuk melihat kemampuan penggunaan sitrat oleh bakteri maka bakteri diinokulasi pada medium

Simmons Citrate Agar (SCA). Komposisi medium SCA adalah natrium sitrat (sumber karbon), ammonium posfat (sumber nitrogen) dan indikator warna bromtyhmol blue. Hasil positif ditandai dengan peningkatan pH yang menyebabkan perubahan warna menjadi biru (Gambar 4B).

d. Uji oksidase

Untuk mengidentifikasi bakteri penghasil enzim sitokrom C oksidase maka dilakukan tes oksidase. Dalam proses metabolisme, enzim sitokrom C berperan sebagai pentransfer elektron dari donor (rantai transpor) ke akseptor elektron terakhir (O_2). Prinsip uji oksidase adalah mendeteksi enzim sitokrom yang dimiliki bakteri gram negatif seperti *Pseudomonaceae* dan *Neisheria* (oksidase positif) dan membedakannya dengan golongan *Enterobacteriaceae* (oksidase negatif) (Ridhwan dkk, 2023). Sampel uji dinyatakan positif apabila menunjukkan warna ungu dalam waktu 5-10 detik setelah digores pada kertas saring yang sebelumnya telah direndam dengan larutan Kovac's. sampel uji dinyatakan negatif apabila tidak terjadi perubahan warna pada kertas saring dalam 2 menit.





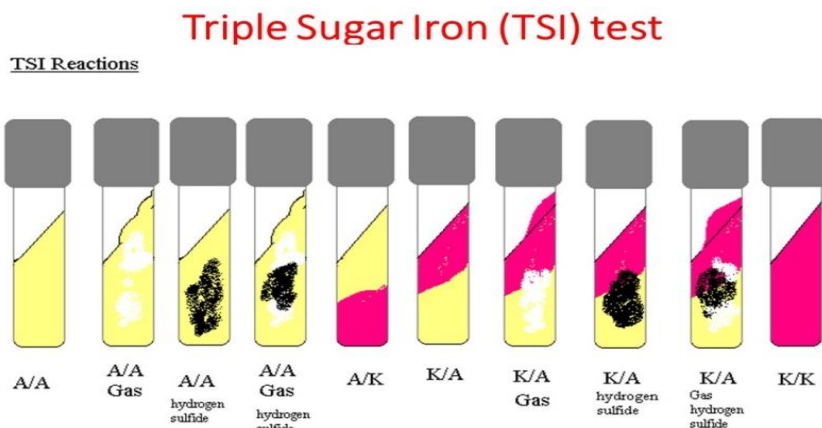
e. Uji TSIA

Uji *triple sugar iron agar* (TSIA) digunakan untuk membedakan bakteri enterik gram negatif berdasarkan kemampuannya memfermentasi 3 jenis karbohidrat (glukosa, laktosa dan karbohidrat) dan menghasilkan gas (H_2S) dan asam sebagai produk samping. Media TSIA termasuk medium diferensial yang dilengkapi dengan indikator pH (fenol red) dan Fe. *Fenol red* akan memberikan warna merah apabila berada pada pH basa dan kuning apabila berada pada lingkungan yang asam. Media TSIA yang pecah/retak menandakan bahwa bakteri uji menghasilkan gas. Apabila terdapat endapan hitam pada media menandakan bahwa bakteri uji membentuk senyawa $FeSO_4$. Apabila terjadi fermentasi glukosa oleh bakteri maka *butt* (dasar) media akan berwarna kuning yang menandakan kondisi asam. Apabila bagian *slant*/lereng berwarna merah menunjukkan kondisi basa. Apabila bakteri uji mampu memfermentasi semua karbohidrat, maka *butt* dan *slant* berwarna kuning. Jika tidak terjadi fermentasi, maka *butt* dan *slant* akan berwarna merah (Idroes dkk. 2019). Interpretasi hasil uji TSIA ditunjukkan oleh Gambar 9.6.

f. Uji Voges Proskauer (VP)

Uji Voges Proskauer (VP) bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri menghasilkan asimetil

karbinol/aseton yang merupakan produk akhir dari fermentasi glukosa. Untuk melakukan uji VP diperlukan larutan barrit A (mengandung α -naftol 5%, dan etanol) dan larutan barrit B (mengandung potassium hidroksida dan air deionisasi). Penambahan barrit A dan barrit B pada kultur bakteri uji menyebabkan bakteri yang positif VP berwarna merah jambu-merah setelah 15 menit. Sedangkan kultur bakteri yang negatif VP tidak mengalami perubahan warna. Interpretasi hasil uji VP ditunjukkan oleh Gambar 9.5A.



Gambar 9.6. Interpretasi hasil uji TSIA
(<https://microbenotes.com/triple-sugar-iron-agar-tsia-test/>)

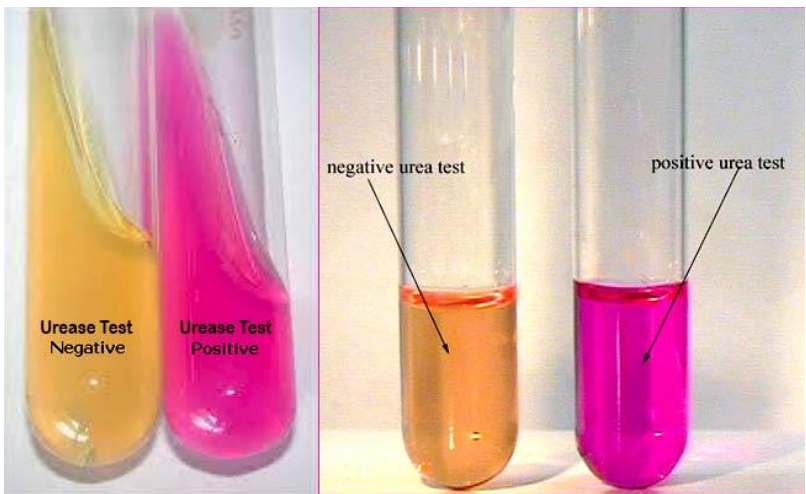
g. Uji katalase

Uji katalase termasuk uji diferensial untuk membedakan bakteri *Staphylococcus sp* dan *Streptococcus sp*. Prinsip kerja uji katalase adalah mengidentifikasi genus bakteri berdasarkan kemampuannya menghasilkan enzim katalase. Fungsi enzim katalase adalah mengubah H_2O_2 (peroksida) yang bersifat toksin menjadi H_2O dan O_2 . *Staphylococcus sp* menghasilkan enzim katalase ditandai dengan terbentuknya gelembung gas (O_2) ketika ditetesi dengan peroksida (H_2O_2). Namun hasil ini akan berbeda pada sampel yang negatif katalase, dimana tidak terbentuk

gelembung gas ketika ditetesi dengan H_2O_2 . Interpretasi hasil uji katalase diperlihatkan pada gambar 9.5B.

i. Uji urease

Tujuan uji urease adalah melihat kemampuan mikroba (bakteri dan khamir) dalam mengubah urea menjadi amoniak. Untuk melakukan uji urease diperlukan urea base agar dengan komposisi berupa pepton, glukosa, NaCl, KH_2PO_4 , *fenol red* dan agar. Dalam hal ini, pepton berperan sebagai sumber nitrogen. Apabila terjadi hidrolisis antara ikatan karbon dan ikatan nitrogen, maka akan terbentuk amoniak yang ditandai dengan perubahan warna media dari kuning menjadi merah muda (Gambar 9.7). Amoniak menyebabkan media bersifat basa sehingga phenol red berubah menjadi merah muda (Antriana, 2014). Contoh bakteri yang bersifat positif terhadap uji urease adalah *Staphylococcus sp*, *Heliobacter sp*, *Mycobacterium sp*, dan *Clostridium perfringers* (Konieczna et al., 2012)



Gambar 9.7. Interpretasi hasil uji urease
(<https://microbiologyinfo.com/urease-test-principle-media-procedure-and-result/>)

4. Analisis menggunakan PCR

Kecenderungan pemeriksaan sampel mikrobiologi berbasis molekuler dalam dekade terakhir ini cukup meningkat. Hal ini disebabkan karena pemeriksaan molekuler mikroba memberikan hasil yang spesifik, akurat dan cepat dalam menegakkan diagnosis (Khairir dkk, 2020; Wulandari dkk, 2021). Salah satu teknologi yang umum digunakan dalam pemeriksaan mikrobiologi adalah *polymerase chain reaction* (PCR), untuk mendeteksi materi genetik (DNA/RNA) dari bakteri, jamur maupun virus. Dengan mengetahui keberadaan DNA/RNA mikroba akan memudahkan penegakan diagnosis suatu penyakit. Tidak hanya itu, pemanfaatan PCR banyak digunakan untuk mengidentifikasi penyakit genetik, penyakit infeksi, diagnosis dini penyakit tertentu, *profiling-genetic* dalam bidang forensik, studi epidemiologi, penentuan keragaman makhluk hidup dan biologi evolusi serta deteksi mutasi pada gen (Fatchiyah, 2013; Kusnadi, 2020). Prinsip kerja PCR adalah melipatgandakan jumlah DNA/RNA mikroorganisme secara enzimatis menggunakan primer spesifik.

Identifikasi bakteri menggunakan PCR umumnya menggunakan gen penanda 16S rRNA (*ribosomal ribonucleic acid*). Bakteri memiliki gen pengkode ribosom 16S (Svedberg) yang sifatnya lestari dan dimiliki oleh bakteri lain yang berkerabat dekat. Kelebihan menggunakan gen 16S rRNA adalah mampu mengidentifikasi bakteri yang sulit ditumbuhkan di laboratorium, tingkat akurasi yang tinggi serta hasil diperoleh dalam waktu singkat (Noer, 2021). Bakteri dikategorikan berkerabat dekat dengan bakteri lainnya apabila memiliki homologi sekuen 16Sr-RNA di atas 98% (Rinanda, 2011; Akihary, 2020). Dengan demikian memudahkan proses identifikasi bakteri. Berdasarkan pemaparan di atas, maka 16S rRNA dijadikan sebagai primer universal untuk identifikasi bakteri.

Komponen yang dibutuhkan untuk melakukan analisis PCR adalah template DNA, enzim taq DNA polymerase, PCR buffer, nucleotide (dNTPs) dan primer.

a. *DNA template*

Untuk mendapatkan *DNA template*, terlebih dahulu harus dilakukan ekstraksi DNA dari bakteri uji. Ekstraksi DNA dapat dilakukan secara konvensional maupun menggunakan *kit extraction*. Ekstraksi DNA secara konvensional memiliki kelebihan berupa jumlah DNA yang diperoleh lebih banyak dan lebih murah dibandingkan menggunakan *kit extraction*. Meskipun demikian, penggunaan *kit extraction* lebih unggul dalam hal efisiensi waktu. DNA yang akan digunakan untuk analisis PCR sebaiknya murni bebas dari kontaminan (nilai absorbansi $\lambda 260/280$ antara 1,8-2,0). Semakin murni DNA yang digunakan maka hasil PCR yang diperoleh juga semakin bagus.

b. Enzim taq DNA polymerase

Dalam analisis PCR, enzim taq DNA polymerase berfungsi sebagai katalisator reaksi. Karakteristik enzim polymerase adalah bersifat termostabil hingga suhu 95°C. Hal ini disebabkan karena enzim ini diperoleh dari bakteri *Thermo aquaticus* yang hidup pada sumber air panas (>80°C).

c. PCR buffer

Reaksi yang berlangsung dalam PCR membutuhkan pH tertentu, olehnya itu diperlukan buffer yang sesuai dengan kondisi reaksi. Buffer PCR sangat penting karena menyediakan lingkungan yang sesuai untuk aktivitas optimum dan stabilitas DNA polymerase.

d. Nucleotide (dNTPs)

Dalam analisis PCR, dNTPs bertindak sebagai komponen penyusun untai DNA yang baru. Komponen dNTPs adalah dATP (deoksiadenosin trifosfat), dTTP (deoksitimin triposfat), dCTP (deoksositidin triposfat) dan dGTP (deoksiguanosin triposfat)

e. Primer

Primer adalah molekul oligonukleotida untai tunggal yang terdiri atas 18-30 pasang basa dan komplementer dengan sekuens yang akan diamplifikasi. Fungsi primer

yaitu sebagai pembatas fragmen DNA uji yang akan diamplifikasi dan juga menyediakan gugus hidoksil pada ujung 3' saat eksistensi PCR berlangsung. Primer yang digunakan untuk analisis PCR sebaiknya tidak lebih dari 30 basa karena akan menyebabkan spesifisitas dan efektivitas primer berkurang. Selain itu juga menyebabkan biaya yang dikeluarkan meningkat (Handoyo, 2000).

Tahapan dalam proses PCR ada 3 yaitu denaturasi, annealing dan ekstension (Kusnadi, 2020; Yanuhar: 2023)

1. Denaturasi

Denaturasi adalah proses pemanasan untai DNA *double helix* menggunakan suhu yang tinggi (90-95°C, selama 30 detik). Denaturasi menyebabkan rantai DNA *double helix* terbuka dan membentuk *single strand* DNA.

2. Annealing

Setelah terbentuk *single strand* DNA maka tahapan berikutnya adalah *annealing* yaitu penempelan pasangan primer di sepanjang untai DNA. Proses *annealing* memerlukan suhu berkisar antara 37°C-60°C selama 30-45 detik.

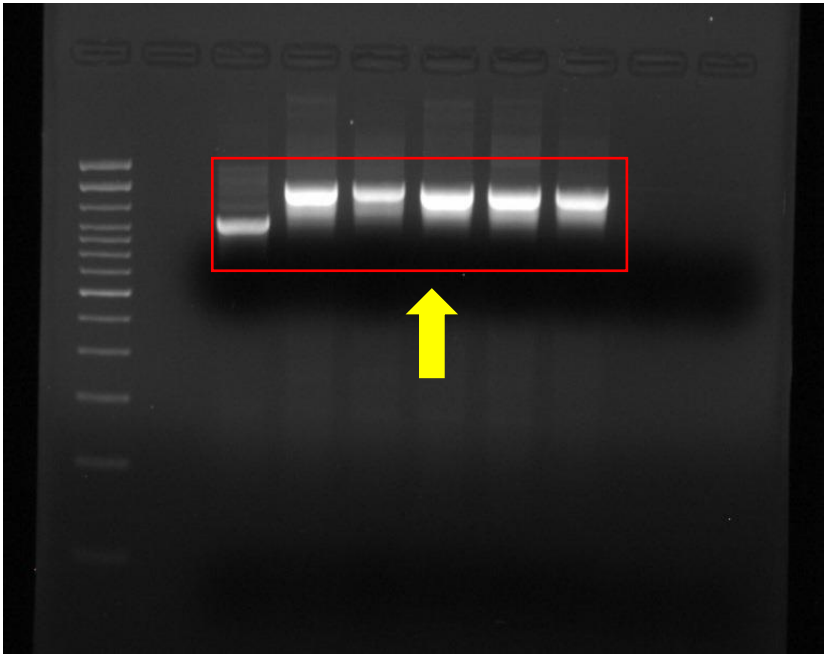
3. Extension

Tahap *extension* merupakan tahap pemanjangan untai DNA yang baru. Proses ini diawali dari primer yang telah berikatan dengan urutan basa nukleotida DNA target berjalan dari ujung 5' menuju 3'. Proses ini akan terus berlangsung dan berhenti pada stop kodon. Suhu yang diperlukan untuk proses *extension* adalah 70-72°C selama 30 detik tergantung panjang fragmen DNA yang diamplifikasi.

Setelah semua tahapan PCR selesai, maka terjadi pengulangan. Tujuan pengulangan siklus adalah tahapan ini kali untuk memperoleh *copy* DNA sesuai yang diharapkan.

Apabila *copy* DNA telah diperoleh, maka dilakukan analisis DNA menggunakan agar elektroforesis. Prinsip kerja elektroforesis adalah memisahkan fragmen DNA berdasarkan

berat molekul pada medium gel yang dialiri medan listrik. Visualisasi hasil elektroforesis menggunakan alat khusus yang disebut dengan *gel documentation system (geldoc)* transluminator. Prinsip kerja *geldoc transluminator* adalah memancarkan sinar UV dan akan dipendarkan oleh ethidium bromide (EtBr) yang berikatan dengan DNA. Dengan demikian DNA dapat diamati. DNA hasil elektroforesis akan terlihat seperti band/pita berwarna putih seperti pada Gambar 8.



Gambar 9.8. Visualisasi hasil elektroforesis gel. DNA ditunjukkan dengan tanda panah
(Sumber: Dokumen pribadi)

9.3.2 Pemeriksaan mikrobiologi untuk bahan pangan

Sampel untuk pemeriksaan mikrobiologi pada bahan pangan adalah makanan/minuman yang diduga tercemar oleh mikroorganisme seperti bakteri maupun jamur. Jenis pemeriksaan yang dilakukan meliputi uji most probably number (MPN), uji angka lempeng total (ALT) dan kultur mikroba pada medium spesifik.

1. Uji MPN

Uji MPN dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya kontaminasi oleh bakteri *Coliform*. Pada sampel air. Prinsip uji MPN adalah melakukan pengenceran bertingkat terhadap sampel untuk mendapatkan konsentrasi tertentu dan menginokulasi sampel pada medium cair spesifik untuk mendapatkan jumlah bakteri. Uji MPN memiliki 3 tahap dalam pengujiannya, yaitu tahap penduga (*presumptive test*), uji penegas (*confirmative test*) dan uji pelengkap (*complete test*).

a. Uji penduga

Pada tahap ini sampel diencerkan kemudian diinokulasi pada medium laktosa broth (LB) dan diinkubasi selama 24 jam. Apabila terjadi perubahan warna pada medium LB dan terbentuk gas pada tabung durham maka dapat dikatakan bahwa sampel yang diperiksa kemungkinan positif mengandung bakteri coliform.

b. Uji penegas

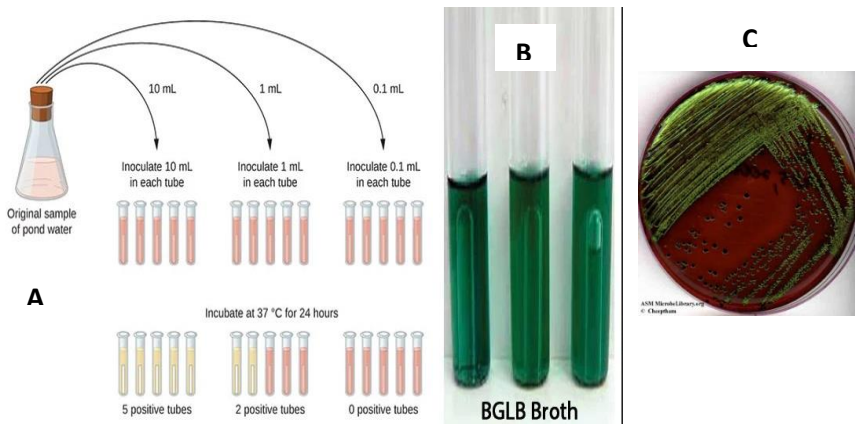
Tahap ini merupakan lanjutan dari tahap uji penduga. Sebanyak 1 ose sampel dari tabung yang positif mengandung coliform diinokulasikan pada medium cair spesifik yaitu medium Brilliant Green Lactose Bile (BGLB), yang mengandung laktosa dan garam empedu (bile salt) untuk pertumbuhan bakteri coliform. Hasil positif ditandai dengan perubahan warna pada medium menjadi keruh dan terbentuk gas pada tabung durham

c. Uji pelengkap

Pada tahap ini, sampel yang positif pada uji penegas diambil dan diinokulasi pada medium eosine methylene blue agar (EMBA). Setelah diinkubasi selama kurang lebih 24 jam, maka dilakukan pengamatan terhadap koloni yang tumbuh pada permukaan media EMBA. Apabila koloni bakteri yang tumbuh berwarna hijau metalik, maka bakteri tersebut adalah *Escherichia coli* (*E.coli*) yang merupakan anggota dari golongan coliform. Adanya *E.coli* dalam air merupakan indikator bahwa terjadi

pencemaran air oleh tinja. Bakteri *E.coli* yang tumbuh pada medium EMBA ditunjukkan oleh gambar 1

Apabila semua pengujian telah selesai dilakukan, maka dilakukan penentuan nilai MPN dengan cara mencocokkan antara hasil penelitian yang diperoleh dengan tabel MPN. Semakin sedikit nilai MPN coliform yang ditemukan maka kualitas air semakin bagus.



Gambar 9.9. Prosedur dan hasil pengamatan pada uji MPN.

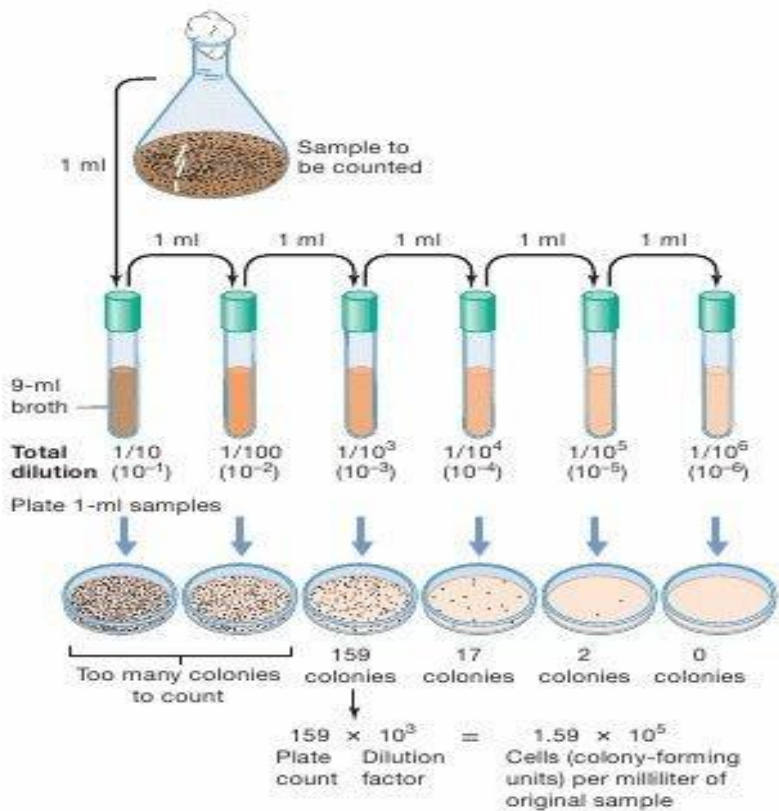
(A) Prosedur pengenceran pada uji MPN.

<https://microbenotes.com>. (B) Inokulasi sampel pada media BGLB. (C) *E.coli* yang tumbuh pada medium EMBA.

https://1.bp.blogspot.com/dMA8_0YmdOw/Vw7l6kooEQI/AAAAAAAAACI/hkOil6mju1QRnyqELMYykru-UyJmIDuTwCLcB/s1600/E_coli_EMB_fig1.jpg

2. Uji Angka Lempeng Total (ALT)

Untuk mengetahui kualitas cemaran mikroorganisme yang terdapat di dalam bahan pangan, minuman maupun kosmetik dapat dilakukan menggunakan uji ALT. Prinsip pemeriksaan ALT adalah menghitung jumlah koloni bakteri aerob yang tumbuh pada permukaan medium padat. Sampel yang diduga mengandung bakteri aerob diinokulasi pada medium padat menggunakan metode tuang dan diinkubasi selama 18-48 jam pada suhu 35°C - 37°C . Setelah tumbuh, maka dilakukan perhitungan jumlah koloni menggunakan *colony counter*. Syarat yang harus dipenuhi untuk perhitungan jumlah bakteri adalah jumlah koloni berkisar antara 30-300. Apabila jumlah koloni yang tumbuh dalam 1 cawan petri < 30 , dianggap tidak memenuhi syarat. Demikian juga apabila jumlah koloni > 300 koloni dalam 1 cawan petri juga dikategorikan tidak memenuhi syarat (Surahmaida, 2018). Untuk menghitung jumlah ALT bakteri digunakan rumus = jumlah bakteri dikalikan dengan 1/faktor pengenceran. Hasil perhitungan ALT dinyatakan dalam satuan *colony forming unit* (cfu)/ml. Nilai ALT yang tinggi menunjukkan bahwa terdapat kontaminasi pada sampel, sanitasi yang kurang baik dan proses produksi yang kurang sempurna. Prosedur untuk pengujian ALT diperlihatkan pada Gambar 2. Dalam prosesnya terdapat kesamaan antara uji ALT dengan uji MPN, dimana keduanya diawali dengan proses pengenceran dan selanjutnya diinokulasi pada medium. Jenis medium untuk uji ALT adalah medium padat sedangkan uji MPN menggunakan medium cair.



Gambar 9.10. Prosedur pengujian ALT pada sampel.
<https://media.licdn.com/dms/image/>

DAFTAR PUSTAKA

- Adriani, A. (2014). Identifikasi Keberadaan *Staphylococcus* Sp Pada Santan Kelapa Kemasan Yang Di Perdagangan Di Kota Makassar. *Jurnal Biotek*, 1(1), 31-34.
- Adriani, A., Pratiwi, E. R., Samsi, A. N., Muthmainnah, M., & Dagonala, U. (2023). Edukasi Kesehatan: Pemanfaatan Bakteri Dalam Berbagai Aspek Kehidupan. *Setawar Abdimas*, 2(1), 28-33.
- Adriani, Taskirah, A. (2017). Pemanfaatan Bakteri Selulolitik Dan Bakteri Penambat Nitrogen Untuk Dekomposisi Limbah Pertanian. *Jurnal Ilmiah Pena: Sains dan Ilmu Pendidikan*, 6(1), 17-23.
- Akihary, C. V., & Kolondam, B. J. (2020). Pemanfaatan gen 16s rRNA sebagai perangkat identifikasi bakteri untuk penelitian-penelitian di Indonesia. *pharmacon*, 9(1), 16-22.
- Alderwick, L. J., Harrison, J., Lloyd, G. S., & Birch, H. L. (2015). The mycobacterial cell wall—peptidoglycan and arabinogalactan. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 5(8).
- Antriana, N. (2014). Isolasi bakteri asal saluran pencernaan rayap pekerja (*Macrotermes* spp.). *saintifika*, 16(1).
- Fatchiyah, 2013. Dasar Tehnik Amplifikasi DNA. Brawijaya University. <http://fatchiyah.lecture.ub.ac.id/teaching-responsibility/general/bbbb/>. (akses tanggal 18 November 2023)
- Handoyo, D., & Rudiretna, A. (2000). Prinsip umum dan pelaksanaan polymerase chain reaction (PCR)[general principles and implementation of polymerase chain reaction]. *Unitas*, 9(1), 17-29.
- Ibrahim, R. F., Sjahrurachman, A., Yasmon, A., Budianti, A., Karuniawati, A., Kusumaningrum, A., ... & Sudiro, T. M. (2017). Buku Penanganan Spesimen Untuk Pemeriksaan Mikrobiologi.

- Idroes, R., Nurisma, N. W., Mawaddah, N., & Pradysta, R. R. G. (2019). *Skrining Aktivitas Tumbuhan yang Berpotensi sebagai Bahan Anti Mikroba di Kawasan Ie Brôk (Upflow Geothermal Zone) Aceh Besar*. Syiah Kuala University Press.
- Khariri, K., Amalia, N., Nursofiah, S., Muna, F., Rukminiati, Y., & Mursinah, M. (2020). Akankah Perkembangan Metode Deteksi Biomolekuler Era 4.0 Mampu Menggantikan Pemeriksaan Laboratorium Bakteri Secara Konvensional?. In *Seminar Nasional Riset Kedokteran* (Vol. 1, No. 1).
- Konieczna, I., Zarnowiec, P., Kwinkowski, M., Kolesinska, B., Fraczyk, J., Kaminski, Z., & Kaca, W. (2012). Bacterial urease and its role in long-lasting human diseases. *Current protein and peptide science*, 13(8), 789-806.
- Kusiyanto, G., Purwatiningsih, Kahar, M., 2019. Skrining dan Identifikasi Bakteri Pektinolitik Endosimbion dalam Sistem Pencernaan Serangga Penggerek Kopi (*Hypothenemus hampei* Ferr). *Biotropika : Jurnal of Tropical Biology*, Vol.7 No, 2. 44-51
- Kusnadi, J., & Arumingtyas, E. L. (2020). *Polymerase chain reaction (PCR): teknik dan fungsi*. Universitas Brawijaya Press.
- Noer, S. (2021). Identifikasi Bakteri secara Molekular Menggunakan 16S rRNA. *EduBiologia: Biological Science and Education Journal*, 1(1), 1-6.
- Ridhwan, M., Umarudin, U., Kurniawan, F. B., AK, M. D., Hansur, L., Asrinawaty, A. N., ... & Hartati, R. (2023). *Mikrobiologi dan Parasitologi*. Global Eksekutif Teknologi.
- Rinanda, T. (2011). Analisis sekuensing 16S rRNA di bidang mikrobiologi. *Jurnal Kedokteran Syiah Kuala*, 11(3), 172-177.
- Surahmaida, S., & Nurhatika, S. (2018). PERHITUNGAN ANGKA LEMPENG TOTAL BAKTERI PADA TELUR AYAM RAS. *STIGMA: Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Unipa*, 11(01), 33-36.

- Winarsih, S., Noorhamdani, N., Ardyati, T., & Adriani, A. (2022, November). Isolation and screening endophytic bacteria producing α -glucosidase inhibitor from Sanrego plant (*Lunasia amara* Blanco). In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2513, No. 1). AIP Publishing.
- Wulandari, K. K., Rodja, H. A., Urjiyah, U. G., Fibriani, E., & Putri, F. A. (2021). Teknik Diagnostik Konvensional Dan Lanjutan Untuk Infeksi Bakteri Dan Resistensi Antibakteri Di Indonesia. *Jurnal Widya Biologi*, 12(02), 98-116.
- Yanuar, V., Leto, K. T., Adriani, A., Alam, R. A. C., Kartina, D., Rasyid, N. Q., ... & Murti, P. D. B. (2023). BIOKIMIA PANGAN (TEKNOLOGI DAN KEAMANANNYA).
- Yanuhar, U., & Caesar, N. R. (2023). *Bioteknologi Lingkungan Perairan*. Universitas Brawijaya Press.

BAB 10

SEJARAH DAN CAKUPAN MIKROBIOLOGI

Oleh Eka Pratiwi Tenriawaru

10.1 Sejarah Mikrobiologi

Mikrobiologi merupakan cabang ilmu biologi yang mengkaji tentang mikroorganisme (Willey dkk., 2008). Ilmu Mikrobiologi mulai berkembang sejak Antony van Leeuwenhoek melaporkan kepada *Royal Society* pada awal tahun 1673 tentang adanya makhluk kecil di air yang terlihat dengan menggunakan mikroskop buatannya. Leeuwenhoek menyebut makhluk tersebut sebagai *animalculus* atau hewan kecil (Mayasari, 2020). Deskripsi tentang *animalculus* tersebut menunjukkan bahwa makhluk yang teramati oleh Leeuwenhoek adalah bakteri dan protozoa (Willey dkk., 2008). Akan tetapi, cikal bakal Ilmu Mikrobiologi telah dimulai sebelum masehi sebagaimana yang akan dideskripsikan sebagai berikut.

10.1.1 Pencarian Mikroorganisme

Pertanyaan-pertanyaan tentang keberadaan mikroorganisme dan hubungannya dengan penyakit telah muncul sejak sebelum masehi. Sekitar tahun 98-55 sebelum masehi, seorang filsuf Roman bernama Lucretius berpendapat bahwa penyakit disebabkan oleh makhluk hidup yang tidak dapat terlihat oleh mata. Pendapat serupa juga dikemukakan oleh Girolamo Fracastoro (1478-1553) pada tahun 1546 masehi. Selanjutnya, seiring dengan perkembangan komponen-komponen mikroskop dan terangkainya mikroskop sederhana yang digunakan untuk mengamati benda-benda tak kasat mata, Robert Hooke mempublikasikan gambar mikroorganisme yang diamati dengan menggunakan mikroskop sederhana buatannya pada tahun 1665. Gambar tersebut diberi nama *Micrographia*.

Pada tahun 1676, Antony van Leeuwenhoek mendeskripsikan makhluk kecil yang diberi nama *animalculus* secara akurat dan mempublikasikannya pada *Royal Society*. *Animalculus* teramati dengan menggunakan mikroskop buatan Leeuwenhoek. Mikroskop dapat memperbesar benda hingga pembesaran 50-300 kali, sampel diletakkan di antara dua kaca, dan penyinaran dilakukan pada sudut 45 ° sehingga menghasilkan latar hitam dan bakteri dapat terlihat dengan jelas (Willey dkk., 2008). Penemuan Leeuwenhoek tersebut penting bagi perkembangan ilmu Mikrobiologi dan menjadi awal konflik teori abiogenesis dan teori biogenesis (Willey dkk., 2008; Widodo, 2014). Meskipun penemuan Leeuwenhoek penting, namun perkembangan ilmu mikrobiologi terhenti hingga 200 tahun kemudian karena pengamatan mikroskopis tidak dapat menggambarkan mekanisme biologi dari *animalculus* dan membutuhkan ilmu terkait metode isolasi dan menumbuhkan mikroorganisme di laboratorium (Willey dkk., 2008).

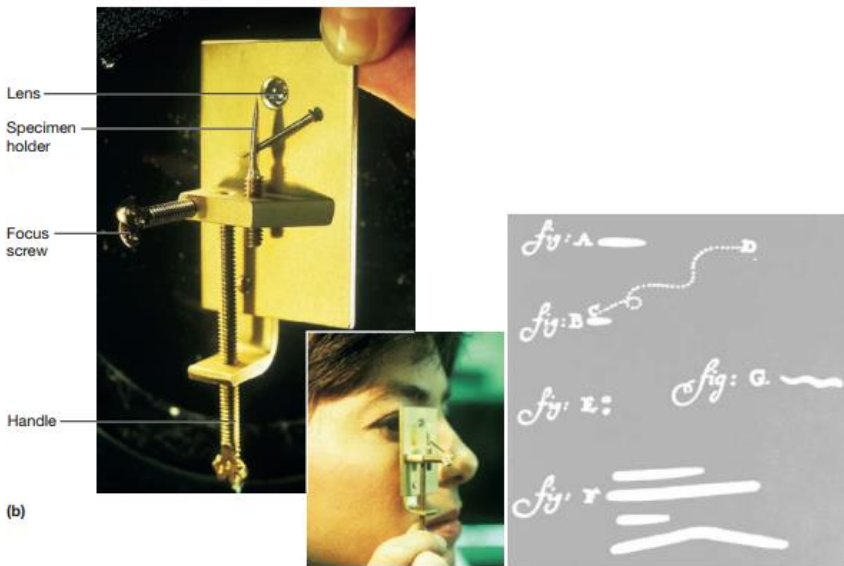
10.1.2 Konflik Antara Teori Abiogenesis dan Teori Biogenesis

Animalculus yang ditemukan oleh **Leeuwenhoek** menimbulkan perdebatan di kalangan ilmuwan tentang asal usul *animalculus* tersebut. Pendukung teori *abiogenesis* berpendapat bahwa *animalculus* muncul secara spontan (*generatio spontanea*). Sementara itu, pendukung teori *biogenesis* berpendapat bahwa seperti halnya organisme tingkat tinggi, *animalculus* tersebut berasal dari hewan kecil yang telah ada sebelumnya (Willey dkk., 2008; Widodo, 2014).

Teori *abiogenesis* (dikenal juga sebagai teori *generatio spontanea*) berasal dari tiga kata, yaitu *a*= tidak; *bios*= hidup; *genesis*= kejadian. Pendukung teori *abiogenesis* percaya bahwa makhluk hidup berasal dari benda mati (Mayasari, 2020). Teori ini diperkenalkan oleh Aristoteles (384-322 sebelum masehi). Salah satu ilmuwan yang mendukung teori *abiogenesis* adalah John Needham (1713-1781). Pada tahun 1748, Needham membuktikan teori *abiogenesis* dengan merebus kaldu daging kambing kemudian menutup botolnya dengan rapat. Kaldu

daging tersebut menjadi keruh (mengandung mikroorganisme) setelah beberapa hari sehingga Needham berpendapat bahwa bahan organik dapat memberikan sifat-sifat kehidupan pada benda mati (Willey dkk., 2008).

Setelah Leeuwenhoek mempublikasikan tentang *animalculus*, beberapa ahli yang menentang teori *abiogenesis* mulai bermunculan dan mengajukan teori *biogenesis*. Teori *biogenesis* (*bios*= hidup; *genesis*= kejadian) mempercayai bahwa makhluk hidup berasal dari makhluk hidup sebelumnya. Teori ini didukung oleh Francesco Redi (1626-1697), yang menentang teori *generatio spontanea* oleh Aristoteles melalui eksperimennya pada tahun 1688. Pada eksperimen Redi tersebut, daging yang ditempatkan pada toples terbuka ditumbuhi ulat setelah beberapa hari, sedangkan daging dalam toples yang ditutup dengan kain kasa dan kertas tidak ditumbuhi oleh ulat. Redi berkesimpulan bahwa ulat pada daging dan tutup toples berasal dari telur lalat (Willey dkk., 2008). Ilmuwan lain yang menentang teori *abiogenesis* adalah Lazzaro Spallanzani (1729-1799) pada tahun 1769. Eksperimen Spallanzani dilakukan dengan memodifikasi desain eksperimen Needham dengan cara merebus kaldu daging dan ditempatkan dalam toples yang tertutup rapat. Setelah beberapa hari, kaldu daging tidak menjadi keruh (tidak ditumbuhi mikroorganisme) (Widodo, 2014) selama tutup tidak dibuka sehingga Spallanzani berpendapat bahwa udara membawa mikroorganisme. Pendapat Spallanzani tersebut ditentang kembali oleh Needham dengan argumen bahwa panas merusak kemampuan bahan organik untuk mendukung kehidupan (Willey dkk., 2008) dan percobaan **Spallanzani** tidak berinteraksi langsung dengan udara (Widodo, 2014).



Gambar 10.1. Antony van Leeuwenhoek: Replika Mikroskop Leeuwenhoek dan Cara Penggunaannya (Kiri); Gambar Mikroba dari Mulut oleh Leeuwenhoek (Sumber : Willey dkk., 2008)

Konflik antara teori *abiogenesis* dan *biogenesis* terus berlangsung hingga hampir 100 tahun tanpa ujung dan menghambat perkembangan ilmu mikrobiologi (Widodo, 2014). Beberapa ilmuwan lain berusaha membuktikan kebenaran teori *biogenesis*, diantaranya adalah Franz Schulze (Mayasari, 2020; Widodo, 2014), Theodore Schwann (Willey dkk., 2008; Widodo, 2014), Georg Friedrich Schroder dan Theodor von Dusch (Willey dkk., 2008), Felix Archimede Pouchet (Widodo, 2014), dan Louis Pasteur (Willey dkk., 2008; Mayasari, 2020; Widodo, 2014).

Diantara ilmuwan tersebut, Pouchet merupakan pendukung teori *abiogenesis* dan mengklaim bahwa percobaannya membuktikan mikroorganisme dapat tumbuh tanpa kontaminasi dari udara (Willey dkk., 2008). Pouchet hidup di masa yang sama dengan Pasteur (Widodo, 2014). Teori Pouchet menginsiprasi Pasteur untuk melaksanakan serangkaian percobaan untuk membuktikan kebenaran teori *biogenesis* padatahun 1861. Percobaan Pasteur menggunakan bejana yang

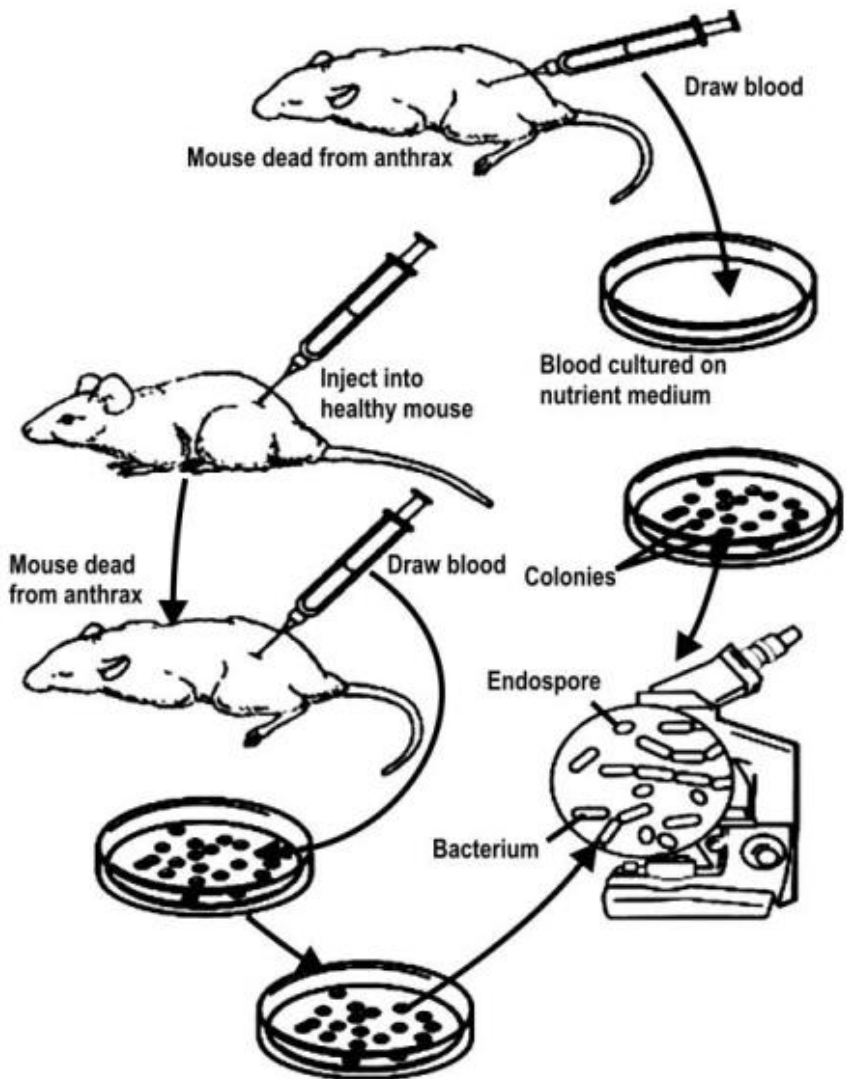
lehernya dipanaskan dan dibentuk dalam beberapa lengkungan dan dikenal dengan nama bejana leher angsa. Ujung leher angsa dibiarkan terbuka dan terpapar udara bebas. Larutan dalam bejana dipanaskan dan didiamkan hingga dingin. Hasilnya tidak ada mikroorganisme yang tumbuh. Tetapi pada saat leher bejana dipatahkan, mikroorganisme tumbuh. Berdasarkan hasil percobaan tersebut, Pasteur menyimpulkan bahwa debu dan mikroorganisme yang terbawa oleh udara terperangkap dalam leher bejana sehingga mikroorganism tidak dapat mencapai kaldu dalam bejana (Willey dkk., 2008). Percobaan Pasteur tersebut tidak dapat dibantah oleh Pouchet (Widodo, 2014) sehingga Pasteur berhasil membuktikan bahwa teori *abiogenesis* salah dan menjadi akhir konflik teori *abiogenesis* dan *biogenesis* (Willey dkk., 2008). Pasteur juga menyimpulkan bahwa *omne vivum ex ovo, omne ovo ex vivo* yang berarti semua kehidupan berasal dari telur, semua telur berasal dari sesuatu yang hidup. Teori tersebut dikenal dengan nama teori *biogenesis*. (Mayasari, 2020). Selain mencetuskan teori *biogenesis* dan memberikan solusi bagi konflik *abiogenesis*, percobaan Pasteur juga menghasilkan teori baru dalam bidang mikrobiologi, yaitu metode sterilisasi (Willey dkk., 2008) yang dikenal dengan nama metode Pasteurisasi.

Selama masa konflik teori *abiogenesis* dan *biogenesis*, beberapa temuan baru yang mendukung perkembangan ilmu mikrobiologi antara lain klasifikasi bakteri untuk pertama kali oleh Miller pada tahun 1786, fermentasi alkohol oleh Antoine Lavoisier pada tahun 1789 (Barnett, 2003), pengenalan vaksin Cowpox untuk Smallpox oleh Edward Jenner pada tahun 1798, penemuan Agostino Bassi tentang penyakit *silkworm* yang disebabkan oleh jamur pada tahun 1835, pengenalan antiseptik untuk mencegah penyakit oleh Ignaz Philipp Semmelweis pada tahun 1847 (Willey dkk., 2008; Opal, 2010), dan identifikasi jamur *Phytophthora infestans* sebagai penyebab penyakit *potato blight* oleh Anton de Bary (Opal, 2010).

10.1.3 Masa Keemasan Mikrobiologi

Perkembangan ilmu mikrobiologi mulai berkembang pesat setelah Louis Pasteur berhasil membuktikan bahwa makhluk hidup berasal dari makhluk hidup lainnya. Periode perkembangan pesat ini dikenal dengan istilah *Golden Age* dan berlangsung selama 60 tahun (1857-1914). Pada masa ini, banyak mikroba penyebab penyakit yang berhasil ditemukan, teknik untuk mengisolasi dan mengembangkan mikroorganisme mulai berkembang, metabolisme mikroorganisme mulai dipahami, pengaturan imunitas dalam mencegah dan mengontrol pertumbuhan mikroba, teknologi vaksin dan teknik untuk pencegahan infeksi selama operasi mulai dikembangkan (Willey dkk., 2008), serta pengelompokan bakteri berdasarkan karakter fenotipik (Maloy & Schaechter, 2006). Dikenal dua peneliti penting dalam masa ini, yaitu Louis Pasteur dan Robert Koch (Opal, 2010).

Pada tahun 1870, Robert Koch (1843-1910) melanjutkan penelitian terkait penyakit antraks dengan menggunakan kriteria yang diajukan oleh dosennya, Jacob Henle (1809-1885). Dalam penelitiannya, Koch menemukan bahwa penyakit antraks pada domba disebabkan oleh bakteri *Bacillus anthracis* dalam darahnya. Koch juga membuktikan bahwa bakteri *Bacillus anthracis* dapat menginfeksi hewan sehat. Bakteri tersebut dapat diisolasi dan dibiarkan bereproduksi. Ketika isolat bakteri dari hewan yang sakit tersebut disuntikkan ke tikus sehat, tikus tersebut menjadi sakit. Metode pembuktian tersebut dikenal dengan nama Postulat Koch. Hasil penelitian Koch dipublikasikan pada tahun 1876. Pada tahun 1884, Koch juga mempublikasikan bahwa penyakit TBC disebabkan oleh *Mycobacterium tuberculosis*, yaitu bakteri yang berbentuk batang pendek dan memperoleh nobel dalam bidang *Physiology or Medicine* pada tahun 1905.



Gambar 10.2. Ilustrasi Langkah-Langkah Postulat Koch
(Sumber : Widodo, 2014)

Selain menghasilkan beberapa penemuan terkait penyakit, **Koch** juga menghasilkan beberapa penemuan yang sangat berguna dalam pengembangan ilmu mikrobiologi. Beberapa penemuan penting oleh Koch bagi ilmu mikrobiologi

adalah penemuan metode kultur bakteri murni pada media padat dan cara penggunaan media padat untuk isolasi isolat murni pada cawan Petri. Cawan Petri ditemukan oleh kolega Koch, yaitu Richard Petri (Willey dkk., 2008; Opal, 2010), sedangkan penggunaan agar sebagai pematat berdasarkan saran dari istri asisten Koch, yaitu Fannie Eilshemius Hesse (Willet dkk., 2008). Media *nutrient agar* dan *nutrient broth* merupakan salah satu media yang dikembangkan oleh Koch dan masih digunakan hingga saat ini (Willey dkk., 2008). Koch bersama dengan Cohn mempopulerkan mikroskop *oil-immersion*, kemudian mengembangkan metode pewarnaan apusan bersama Carl Weigert dan metode fiksasi apusan bakteri. Koch juga memperkenalkan teknik mikrofotografi dengan menggunakan *heliostat* untuk pencahayaan (Drew, 2000).

Ketika Koch mengkulturkan bakteri dalam medium gelatin, Pasteur mengembangkan vaksin untuk mengobati penyakit antraks (dipublikasikan pada tahun 1881), rabies (dipublikasikan 1885), kolera, dan erisipelas babi dengan cara ditumbuhkan beruang kali pada media buatan pada suhu 42 °C (Drew, 2000; Opal, 2010). Selain vaksin, antitoksin untuk diptera dan tetanus juga dikembangkan oleh Emil von Behring (1854-1917) pada tahun 1890 (Willey dkk., 2008), Sakahiro Hata menemukan salvarsan untuk pengobatan sifilis, Shibasaburo Kitasato (1852-1931) berkontribusi terhadap penemuan terapi serum, Paul Ehrlich yang menemukan antibodi, antigen, dan kemoterapi untuk pengobatan penyakit, serta Richard Pfeiffer yang menemukan endotoksin bakteri dan mekanisme bakteriolisis (Opal, 2010), Ellie Metchnikoff (1845-1916) menemukan bahwa sel darah putih dapat memakan bakteri penyebab penyakit dan membuktikan bahwa sel darah berperan dalam imunitas (Willey dkk., 2008).

Penemuan lain pada era ini adalah penemuan fase termolabil (fase pertumbuhan dimana bakteri tidak tahan pada pemanasan) dan fase termoresisten (fase dimana bakteri tahan terhadap pemanasan), serta teknik sterilisasi untuk membunuh endospora bakteri yang dikenal dengan teknik Tyndallisasi pada tahun 1877 oleh John Tyndall (1820-1893) (Willey dkk., 2008;

Widodo, 2014). Di tempat yang berbeda, Ferdinand Cohn (1828-1898) menemukan bahwa bakteri dapat membentuk endospora yang bersifat termoresisten (Willey dkk., 2008; Widodo, 2014). Pada tahun 1867, Joseph Lister (1827-1912) mempublikasikan metode sterilisasi untuk mencegah luka operasi. Lister mendemonstrasikan alat-alat operasi disterilisasi dengan panas, luka ditutup dengan menggunakan fenol, area operasi disemprotkan dengan fenol (Willey dkk., 2008), dan konsentrasi pengenceran fenol yang dapat mempertahankan sterilisasi (Opal, 2010).

Virus pertama kali juga ditemukan pada masa *golden age* mikrobiologi ini oleh Dimitri Ivanowski dan Martinus Beijerinck, yaitu virus *tobacco mosaic virus*. Virus ini ditemukan dengan menggunakan filter porselin untuk bakteri yang dikembangkan oleh Charles Chamberland (1851-1908) pada tahun 1884 (Willey dkk., 2008). Chamberland juga merupakan penemu autoklaf dan vaksin *Pasteurella* (Opal, 2010). Pasteur juga menemukan bahwa dalam fermentasi alkohol, khamir berperan penting dalam mengubah gula menjadi alkohol (Barnett, 2003). Pasteur juga mengamati bahwa proses fermentasi ada yang membutuhkan oksigen (aerob) dan ada yang tidak memerlukan oksigen (anaerob) (Widodo, 2014).

10.1.4 Perkembangan Mikrobiologi setelah *Golden Age*

Perkembangan ilmu mikrobiologi setelah *golden age* (setelah tahun 1914) diwarnai dengan penemuan lisozim oleh Flemming pada tahun 1921, penemuan antibiotik penisilin oleh Flemming pada tahun 1929 dan streptomisin oleh Waksman pada tahun 1944, klasifikasi bakteri berdasarkan *Bergey's manual* dipublikasikan pada tahun 1923, serta transformasi bakteri oleh Griffith pada tahun 1928. Pada masa ini, mikroskop juga semakin berkembang dan mikroskop elektron mulai dikembangkan oleh Ruska pada tahun 1933. Sekitar 40 tahun kemudian, *scanning tunneling microscope* (STM) mulai dikembangkan untuk mengamati pada tingkat atom (Willey dkk., 2008). Perkembangan teknologi mikroskop ini memungkinkan ilmuwan untuk mengamati mikroorganisme dengan lebih detail. Teknologi yang

berkaitan dengan DNA juga mulai berkembang dengan pesat sejak Mendel mengemukakan prinsip pewarisan sifat pada pertengahan abad ke-19, serta Watson dan Crick mengajukan struktur DNA *double helix* pada tahun 1953 (Opal, 2010).

Seiring dengan perkembangan teknologi dan bidang genetika, genetika biokimia, serta pertukaran materi genetik menyebabkan perubahan paradigma pada ilmu mikrobiologi (Maloy & Schaechter, 2006; Opal, 2010). Pada tahun 1977, pengurutan basa nukleotida pada genom secara lengkap berhasil dilakukan untuk pertama kali pada virus bakteriofage *Haemophilus influenzae* dan diikuti dengan pengurutan basa nukleotida pada genom manusia pada tahun 2001 (Opal, 2010). Faktor F plasmid ditemukan oleh Jacob dan Wollman pada tahun 1955. Selanjutnya pada tahun 1961, Jacob dan Monod mengajukan hipotesis tentang *lac operon*. Pada tahun 1970, Arber dan Smith menemukan enzim endonuklease yang berperan dalam perbaikan DNA dan rekombinan DNA. Perkembangan teknologi rekombinan semakin pesat dan berhasil menghasilkan temuan baru, diantaranya adalah produksi hormon insulin hasil rekombinan DNA pada tahun 1979, vaksin hasil rekayasa genetika untuk manusia berhasil dikembangkan pada tahun 1986, dan pengujian terapi gen manusia pertama kali dilaksanakan pada tahun 1990 (Willey dkk., 2008).

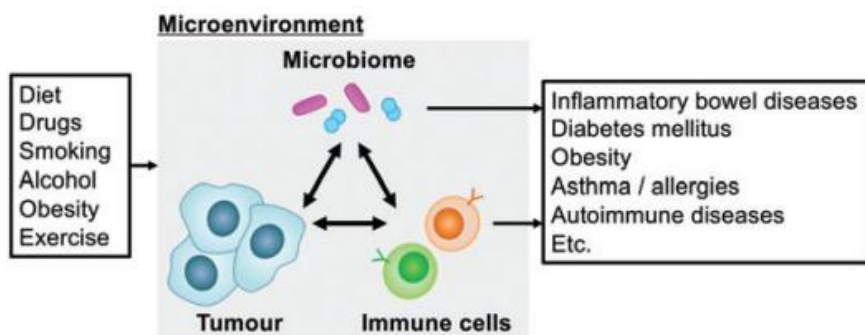
Memasuki abad ke-20, ilmu mikrobiologi mencakup teknologi rekombinan DNA, perbanyakan DNA menggunakan *Polimerase Chain Reaction* (PCR), antibodi monoklonal, dan memungkinkan diagnosis cepat terhadap penyakit yang disebabkan oleh mikroorganisme yang tidak dapat dikulturkan seperti hepatitis C (Opal, 2010). Pada separuh pertama abad ke-20, permasalahan terkait biokimia, kesehatan, dan lingkungan mikroorganisme yang belum terjawab pada abad sebelumnya akhirnya terjawab pada masa ini. Pada abad ke-20 ini, perkembangan ilmu mikrobiologi menyebabkan mikrobiologi terbagi menjadi bidang mikrobiologi kesehatan dan mikrobiologi lingkungan. Perkembangan ilmu rekombinan DNA dan ilmu pengetahuan tentang eukariotik yang menjanjikan analisis genetik terkait fenomena biologis menyebabkan penelitian

terkait bakteri dan *fag* mulai terbengkalai (Maloy & Schaechter, 2006).

Sekitar 30-40 tahun belakangan, ilmu mikrobiologi kembali dilirik dan menunjukkan peningkatan pesat. Perkembangan ini terjadi setelah banyak hasil penemuan yang menunjukkan bahwa mikroorganisme memainkan peran penting dan unik dalam kehidupan di dunia ini (Maloy & Schaechter, 2006). Era ini ditandai dengan hasil penelitian oleh Carl Woese dan rekannya yang mempelopori metode identifikasi mikroorganisme tanpa menumbuhkannya (Pace, 2009). Munculnya teknologi *High-Throughput Sequencing Technology* (HTS) atau *Next Generation Sequencing* (NGS) pada tahun 2004 memungkinkan pengkajian peran mikroorganisme di alam dan dalam tubuh makhluk hidup (de Filippis dkk., 2018). Metode ini menggunakan pendekatan metagenomik, yaitu mengisolasi total DNA dari lingkungan secara *real time* tanpa harus menumbuhkannya terlebih dahulu. Metode ini juga dapat mendeteksi mikroorganisme yang tidak dapat ditumbuhkan dalam kondisi laboratorium maupun yang hidup pada kondisi yang ekstrim (Tenriawaru dkk., 2021). Teknologi HTS memungkinkan akses yang lebih besar pada metagenomik dan data omiks lainnya seperti genomik, epigenomik, proteomik, dan metabolomik (Hamada dkk., 2019).

Mikroorganisme di alam, dapat ditemukan dalam kondisi bebas ataupun berasosiasi dengan tumbuhan, hewan, dan manusia (Stark, 2010). Mikroorganisme yang berasosiasi dengan tumbuhan, hewan, dan manusia masing-masing berperan dalam hubungan simbiosis yang saling menguntungkan dan saling bertukar metabolit. Hubungan asosiasi tersebut melahirkan konsep mikrobioma, hologenom, dan superorganisme (Singh dkk., 2018). Dalam tubuh manusia, terdapat triliun mikroorganisme yang bersimbiosis. Densitas dan komposisi mikroorganisme tersebut berbeda dan dipengaruhi oleh pola makan, gaya hidup, penyakit, obat-obatan, dan genetika inang. Beberapa mikroorganisme tersebut juga terkait dengan penyakit pada inangnya. Beberapa penyakit dan kelainan metabolisme seperti peradangan, tumor, obesitas, serta penyakit pada paru-

paru dan pembuluh darah menunjukkan perbedaan pada komposisi bakteri dalam tubuh. Komposisi bakteri juga menunjukkan perbedaan pada beberapa masalah kejiwaan dan saraf, seperti gangguan kecemasan, depresi, gangguan tidur, respon terhadap rasa takut, autisme, demensia dan *alzheimer* (Mousa dkk., 2022). Komposisi bakteri pada makanan fermentasi juga dilaporkan berpengaruh terhadap kualitas dan rasa pada produk makanan fermentasi. Komposisi bakteri pada makanan juga dapat mencegah penyebaran penyakit yang disebarkan melalui makanan (de Filippis dkk., 2018). Demikian halnya pada tumbuhan. Komposisi bakteri juga bervariasi bergantung pada karakter tanaman, faktor lingkungan, sifat masing-masing mikroorganisme, dan penggunaan pestisida. Interaksi mikroorganisme dan tanaman berperan dalam penyediaan nutrisi bagi tanaman, mengatur hormon pertumbuhan, dan meningkatkan toleransi terhadap stres karena pengaruh lingkungan (Tenriawaru dkk., 2021).

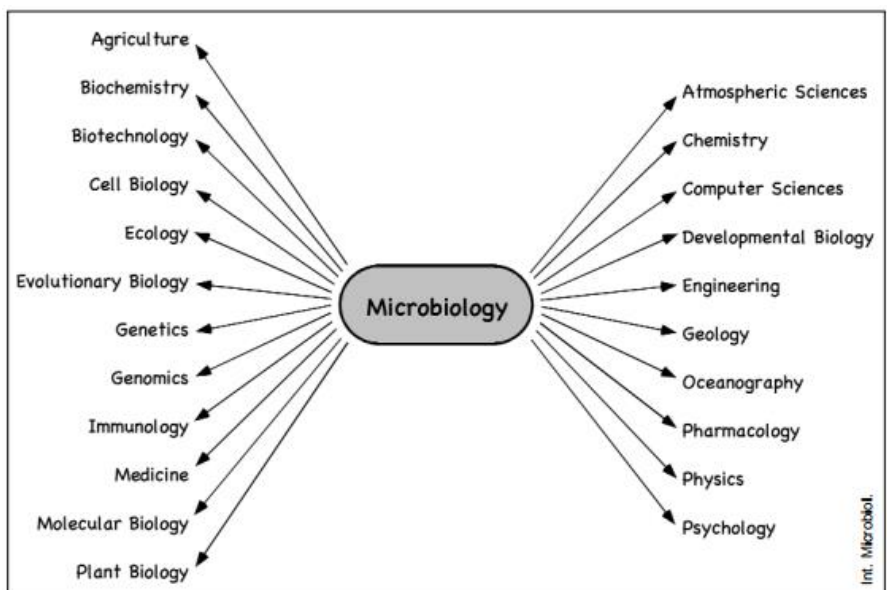


Gambar 10.3. Interaksi Mikrobiom, Sel Imun Inang, dan Tumor dalam Mikrolingkungan
(Sumber : Hamada dkk., 2019)

10.2 Cakupan Mikrobiologi

Seiring dengan perkembangan ilmu mikrobiologi saat ini, maka bidang mikrobiologi merupakan disiplin ilmu yang luas dengan berbagai bidang spesialisasi. Pada bidang ilmu dasar yang meliputi biologi mikroorganisme, bakteriologi (ilmu tentang bakteri), virologi (ilmu tentang virus), mycologi (ilmu tentang

fungi), phycologi atau algologi (ilmu tentang alga), protozoologi (ilmu tentang protozoa), sitologi mikroba, fisiologi mikroba, genetika mikroba dan biologi molekuler, ekologi mikroba dan taksonomi mikroba. Dalam bidang penerapan, mikrobiologi hadir untuk memecahkan masalah penyakit, air dan limbah, kerusakan makanan dan produksi makanan fermentasi, produksi obat-obatan dan enzim (Willey dkk., 2008). Mikrobiologi berperan dalam ilmu geologi, mempengaruhi iklim dan cuaca, dalam bidang kimia dan fisika, peternakan dan perikanan, pertanian, dan saat ini juga berkembang dalam bidang evolusi, perilaku hewan dan psikologi. Meskipun terdiri dari berbagai bidang, namun dalam penerapannya, mikrobiologi merupakan satu kesatuan bidang ilmu yang tidak dapat dipisahkan, baik antar bidang ilmu dasar maupun dengan bidang ilmu terapan. Dalam usaha penyelesaian masalah di bidang kesehatan dan lingkungan, mikrobiologi membutuhkan disiplin ilmu lainnya dan saling mempengaruhi (Maloy & Schaechter, 2006).



Gambar 10.4. Integrasi Ilmu Mikrobiologi dalam Berbagai Bidang yang Terkait
(Sumber : Maloy & Schaechter, 2006)

DAFTAR PUSTAKA

- Barnett, J. A. 2003. Beginnings of Microbiology and Biochemistry: the Contribution of Yeast Research. *Microbiology*, 149: 557-567.
- De Filippis, F., Parente, E., & Ercolini, D. 2018. Recent Past, Present, and Future of Food Microbiome. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, 9: 589-608.
- Drew, G. 2000. The Roots of Microbiology and the Influence of Ferdinand Cohn on Microbiology of the 19th Century. *FEMS Microbiology Review*, 24: 225-249.
- Hamada, T., Nowak, J. A., Milner Jr., D. A., Song, M., & Ogino, S. 2019. Integration of Microbiology, Molecular Pathology, and Epidemiology: a New Paradigm to Explore the Pathogenesis of Microbiome-Driven Neoplasms. *Journal of Pathology*, 247: 615-628.
- Maloy, S. & Schaechter, M. 2006. The Era of Microbiology: a Golden Phoenix. *International Microbiology*, 9: 1-7.
- Mayasari, U. 2020. *Mikrobiologi*. Medan: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam negeri Sumatera utara.
- Mousa, W. K., Chehadeh, F. & Husband, S. 2022. Recent Advance in Understanding the Structure and Function of the Human Microbiome. *Front. Microbiol.*, 13: 825338.
- Opal, S. M. 2010. A Brief History of Microbiology and immunology. In: Artenstein, A. W. *Vaccines: A Biography* (eds.). Springer Nature.
- Pace, N. R. 2009. Mapping the Tree of Life: Progress and Prospects. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 73: 565.
- Singh, N., Singh, J., & Singh, K. 2018. Small at Size, Big at Impact: Microorganisms for Sustainable Development. In: Singh, J., Sharma, D., Kumar, G., & Sharma, N. J. (eds.). *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development*. Singapore: Springer Singapore.
- Stark, L. A. 2010. Beneficial Microorganisms: Countering Microbophobia. *Life Sciences Education*, 9: 387-389.

- Tenriawaru, E. P., Suharjono, Ardyati, T., & Zubaidah, E. 2021. Diversity and the Potency of Indigenous Bacteria in Dengen Fruit (*Dillenia serrata*), Passion Fruit (*Passiflora edulis*), and Pineapple Fruit (*Ananas* sp.) of South Sulawesi, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 743: 012071.
- Widodo, L. U. 2014. Sejarah, Ruang Lingkup, dan Perkembangan Mikrobiologi. In: *Mikrobiologi* (eds.). Jakarta: Universitas Terbuka.
- Willey, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. 2008. *Prescott, Harley, and Klein's Microbiology Seventh Edition*. USA: McGraw-Hill.

BIODATA PENULIS



Dokter Dito Anurogo, M.Sc., Ph.D. (Candidate)

Dosen tetap di Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan
Universitas Muhammadiyah Makassar Indonesia

Dosen tetap di Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan Universitas Muhammadiyah Makassar Indonesia, dokter umum, pemerhati filsafat, penulis puluhan buku di penerbit ternama di Indonesia. *Magnum opus*-nya berjudul *The Art of Medicine* diterbitkan Penerbit Gramedia dan telah didistribusikan secara Internasional melalui Amazon.com. Karyanya berjudul "Ensiklopedia Penyakit dan Gangguan Kesehatan" diterbitkan oleh CV Pustaka Setia Bandung, setebal 448 halaman telah dikoleksi di berbagai perpustakaan dan sekolah di Indonesia. Mahakarya terbarunya, *The Art of Televasculobiomedicine 5.0* berbahasa Inggris, ditulis bersama Dr. dr. Niko Azhari Hidayat, Sp.BTKV(K).

Seorang kolumnis (penulis) tetap di berbagai media cetak online dan offline (misalnya: *Harian Fajar*, *Suara Merdeka*, *Antaranews.com*, *detik.com*), pelopor di bidang Nanoimmunobiotechnomedicine (NiBTM) dan hematopsikiatri, penggerak literasi digital, dan pemberdayaan masyarakat, pembelajar dan pemerhati psikologi dan ekonomi Islam. Beliau memiliki sertifikasi CME (*Continuing Medical Education*) dari berbagai universitas ternama dunia, seperti: Harvard, Oxford, dan John Hopkins University, dsb. Beliau juga memiliki berbagai

sertifikasi di bidang: kegawatdaruratan, trauma, dan neurologi (ATLS, ACLS, ANLS, TCD), herbal dan tanaman obat, grafologi dasar, jurnalisme, kepenulisan, dan training (pelatihan). Ia memiliki lebih dari 45 gelar non-akademik lintas-multidisiplin keilmuan. Dia juga seorang pembelajar seumur hidup. Saat ini ia sedang studi S3 di Taipei Medical University Taiwan. Di sela-sela kesibukannya, ia menjadi reviewer di puluhan jurnal nasional dan Internasional, termasuk reviewer tetap di *Journal of Translational Medicine* (terindeks Scopus Q1) penerbit Springer-Nature. Dokter Dito bersama tim ASPI (Asosiasi Sel Punca Indonesia) lainnya telah berkontribusi dalam merumuskan rancangan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2018 tentang Penyelenggaraan Pelayanan Sel Punca dan/ atau Sel.

Beliau memiliki pengalaman di lebih dari 20 organisasi nasional hingga Internasional (sebagai dewan penasihat/pelindung/pembina, CEO, pendiri, penggagas, ketua, anggota). Saat ini masih aktif menjabat sebagai Wakil Ketua Komisi Kesehatan Ditlitka PPI Dunia dengan program kerja "Telehealth - Telemedicine" sebagai andalannya.

Alumnus Ilmu Kedokteran Dasar (IKD) Biomedis Fakultas Kedokteran Universitas Gadjah Mada (FK UGM) Yogyakarta ini juga telah menerima berbagai penghargaan bergengsi tingkat internasional dan nasional, antara lain: *Reviewer of The Month* (April dan Oktober) 2023 dari *Biomedical and Pharmacology Journal* (Scopus Q4), Best paper Award kategori Best Idea 2023 dalam forum The 5th International Conference on Religious and Cultural Sciences, Duta Perdamaian dari World Wide Peace Organization (WWPO) di Indonesia 2022, International Scientist Awards 2022 di bidang Engineering, Science, and Medicine International Research Awards 2022 di bidang Science, Technology, and Management; The Best Position Paper of UN Women 2021 (kerja sama antara International Model United Nations, UNDP, UNESCO, dan Kedutaan Besar Australia), The Distinguished Proponent and Excellent Scientist 2022 at "First Generation of Cadre of Indonesian Islamic Thinkers" held by institute of Religious and Philosophical Studies in Collaboration with Universitas Paramadina, Indonesia. Gajah Mada Awards

2015 (kategori Mahasiswa Paling Inspiratif dan Mahasiswa Penulis Terbaik); Seed Grant Award Blended Learning batch II, 2015 Pusat Kebijakan Manajemen Kesehatan, Fakultas Kedokteran, Universitas Gadjah Mada; The Best Winner, kategori sains, lomba esai nasional, forum AGRINOVA, yang diselenggarakan oleh HIMMPAS IPB 2015; dan First Winner "2013 World Young Doctors' Organization (WYDO) Indonesia Essay Contest Award". Ia dapat dihubungi via email: dito.anurogo@med.unismuh.ac.id.

BIODATA PENULIS



Ayu Saka Laksmi W, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medik
Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Bali Internasional

Ayu Saka Laksmi W, lahir di Badung pada tanggal 17 Maret 1991. Menyelesaikan Pendidikan Sarjana (S1) di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana tahun 2013. Melanjutkan Magister (S2) Ilmu Biologi di Universitas Udayana tahun 2015. Beliau meraih beasiswa Karya Salemba Empat (KSE) saat program Pendidikan Sarjana dan Beasiswa *Bakrie Center Foundation* (BCF) selama Pendidikan Magister. Beliau merupakan salah satu dosen di Universitas Bali Internasional (2016-sekarang) dan pernah menjadi tenaga pengajar Ganesha Operation (GO) (2013-2018). Beliau pernah menjadi *volunteer Friends of National Parks Foundation* (FNPF) (2011-2012). Pemateri Modul Nusantara Kampus Merdeka Universitas Udayana (2021). Selain itu beliau juga berperan aktif dalam menulis buku yaitu berjudul *MIKROPLASTIK menjelajah dunia* (2023). Serta menjadi bagian dari ADPI (Asosiasi Dosen Pengabdian kepada Masyarakat Indonesia) sebagai koordinator ADPI provinsi Bali dan menjadi reviewer dalam jurnal AMPOEN (Akselerasi Merdeka Belajar dalam Pengabdian Orientasi Masyarakat).

BIODATA PENULIS



Dr. Hasria Alang, S.Si.,M.Kes.

Dosen Program Studi Bioteknologi
Institut Teknologi dan Kesehatan Muhammadiyah Kalimantan
Barat

Hasria Alang, lahir di Puundoho, 28 Maret 1985. Pendidikan S1 ditempuh pada Jurusan Biologi Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin Makassar, lulus 2006. Menempuh S-2 di konsentrasi Mikrobiologi Program Studi Biomedik Universitas Hasanuddin Makassar dan lulus 2010. Menempuh pendidikan program doktor pada prodi Biologi Universitas Brawijaya Malang dan lulus tahun 2019. Tahun 2011 sampai 2022 sebagai dosen pada Jurusan Biologi P. MIPA STKIP Pembangunan Indonesia Makassar mata kuliah Mikrobiologi, Biologi Sel dan Biologi Molekuler. Tahun 2023 kemudian tercatat sebagai dosen tetap di prodi Bioteknologi ITEKES MU Kalbar. Menulis artikel dan buku, juga aktif dilakukan oleh penulis untuk menunjang Tridharmanya. Buku Mikrobiologi merupakan buku kolaborasi ke-6 dari penulis. Semoga apa yang kita lakukan bernilai ibadah dihadapan Allah SWT.

BIODATA PENULIS



Rafika, S.Si.M.Kes

Dosen Program Studi Sarjana Terapan
Jurusan Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes Kemenkes
Makassar

Penulis lahir di Wotu. Kabupaten Luwu Timur tanggal 22 Maret 1984. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi dan S2 pada Program Studi Biomedik Konsentrasi Mikrobiologi di Universitas Hasanuddin Makassar Pernah bekerja sebagai dosen di Poltekkes Kemenkes Palu tahun 2010-2018. Penulis sebagai dosen tetap pada Jurusan Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes Kemenkes Makassar sejak tahun 2019 sampai saat ini. Penulis mengajar mata kuliah Bakteriologi, Parasitologi, Biologi Sel dan Molekuler, Virologi dan Mikologi. Aktif sebagai penulis artikel penelitian, *reviewer* jurnal nasional terakreditasi dan editor in chief Jurnal Media Analisis Kesehatan Poltekkes Kemenkes Makassar.

BIODATA PENULIS



Esti Rizkiana Pratiwi, S.Si., M.Si
Dosen Program Studi Mikrobiologi
Fakultas Ilmu Kesehatan
Universitas Maarif Hasyim Latif

Penulis lahir di Surabaya tanggal 11 Januari 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Mikrobiologi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Maarif Hasyim Latif. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Biologi dengan Bidang minat Mikrobiologi. Penulis menekuni bidang Mikrobiologi Molekuler. Saat ini, penulis aktif menjadi bagian dari Chief Editor Jurnal Sainhealth. Penulis juga tergabung dalam tim SPMI penjaminan mutu Fakultas.

BIODATA PENULIS



Helena Daten, S.Si, M.Si

Universitas Katolik Widya Mandira Kupang

Penulis lahir di Atulaleng tanggal 06 Oktober 1995. Penulis dibesarkan di Waikomo, Kelurahan Lewoleba Barat, Kota Lewoleba, Kabupaten Lembata, Nusa Tenggara Timur. Masa kecil penuh dengan kebahagiaan dihabiskan di kota kelahiran begitu pula pendidikan. Dimulai dari Sekolah Dasar Waikomo 2, kemudian SMP Negeri 1 Nubatukan, dan dilanjutkan ke SMA negeri 1 Nubatukan. Beranjak dari kampung halaman untuk mengejar cita-cita, penulis melanjutkan pendidikan di kota provinsi Jawa Timur yaitu Malang. Menyelesaikan studi sarjana (S1) Jurusan Biologi di Universitas Brawijaya Malang pada tahun 2018 dan Magister (S2) Jurusan Biologi di Pascasarjana Universitas Brawijaya Malang pada tahun 2020. Penulis saat ini bekerja di jurusan Biologi Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Katolik Widya Mandira Kupang, Nusa Tenggara Timur.

BIODATA PENULIS.



Dr. Adriani S.Si, M.Kes

Dosen Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu
Pendidikan
Universitas Patempo Makassar

Penulis lahir di Kota Ujung Pandang pada tanggal 4 Juni 1984. Penulis adalah dosen di jurusan Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Pendidikan (FKIP) Universitas Patempo Makasar. Menyelesaikan Pendidikan S1 di Jurusan Biologi FMIPA UNHAS (tahun 2007), S2 di Jurusan Biomedik Fakultas Kedokteran UNHAS (Tahun 2010) dan mendapatkan gelar Doktor dari Program Studi Ilmu Kedokteran di Universitas Brawijaya (Tahun 2022). Saat ini beliau tercatat sebagai dosen tetap dengan bidang keilmuan Mikrobiologi di FKIP Universitas Patempo Makasar. Penulis menekuni bidang penelitian mikrobiologi dan ilmu biologi lainnya. Beberapa hasil penelitian, pengabdian dan bookchapter yang telah berhasil dipublikasikan yaitu:

1. (2019) Molecular Docking Study from Lunacridine, Scopoletin and Skimmianine as Antidiabetes through α -Glucosidase Inhibitor (Publikasi pada Journal of Physics :IOP Proceeding Conference)
2. (2022) Non-targeted screening with LC-HRMS and In-Silico Study on Diabetic activity of ethyl acetate extract of Sanrego (Lunasia amara Blanco) (Publikasi pada Research Journal Pharmacy and Technology, Scopus Q3)

3. (2022) Isolation and screening endophytic bacteria producing α -glucosidase inhibitor from Sanrego plant (*Lunasia amara* Blanco) (Publikasi pada AIP Proceeding Conference, Scopus Q4)
4. (2022) Penapisan Virtual Basis Data Senyawa Tanaman Afrodisiak Asal Family Rutaceae Sebagai Inhibitor α -Amylase (Publikasi pada Journal Syifa Sciences and Clinical Research 4(2), sinta 5)
5. (2022) Perkembangan Dan Manfaat Obat Herbal Sebagai Fitoterapi. TOHAR MEDIA.
6. (2022) Pendampingan Kepada Masyarakat Mengenai Kesehatan Hewan Kurban Pada Pelaksanaan Pemotongan Sapi Kurban Idul Adha Tahun 2022 di Kelurahan Gunung Sari Kecamatan Rappocini Makasar. (Publikasi pada jurnal Setawar Abdimas)
7. (2023) MIKROBIOLOGI. Penerbit Lakeisha
8. (2023) BIODIVERSITAS (TEKNOLOGI DAN KEAMANANNYA). Penerbit Widina

BIODATA PENULIS



Eka Pratiwi Tenriawaru

Dosen Program Studi Biologi
Fakultas Sains Universitas Cokroaminoto Palopo

Penulis lahir di Bone tanggal 04 Mei 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Biologi Fakultas Sains Universitas Cokroaminoto Palopo. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Makassar, melanjutkan S2 pada Jurusan Pendidikan Biologi Program Pascasarjana Universitas Negeri Makassar, dan Pendidikan S3 pada Program Doktor Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya. Penulis menekuni bidang Biologi dengan kekhususan Mikrobiologi.