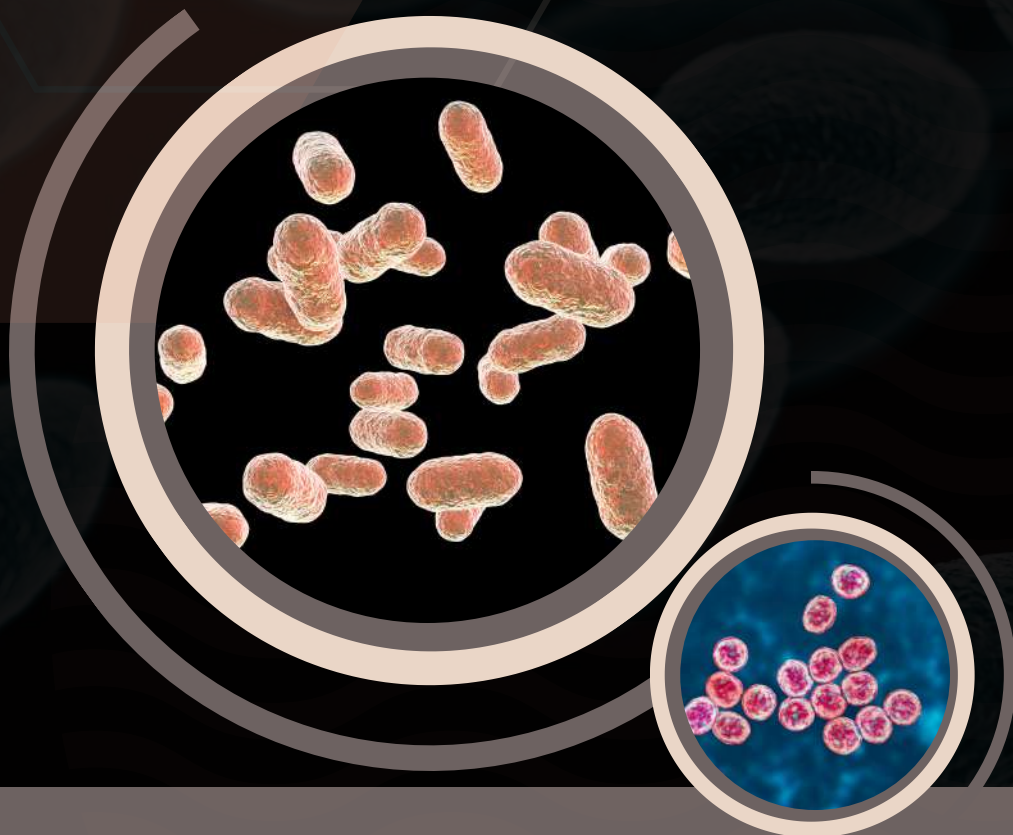


BAKTERIOLOGI

Mustika Sari H Hutabarat, Dito Anurogo, Andi Fatmawati,
Revita Permata Hati, Indas Wari Rahman, Nurfitri Arfani,
Meri, Marsino O. R. O Rondo, Dewi Peti Virgianti,
Qurrota A'yun, Rochmanah Suhartati



BAKTERIOLOGI

Mustika Sari H Hutabarat

Dito Anurogo

Andi Fatmawati

Revita Permata Hati

Indas Wari Rahman

Nurfitri Arfani

Meri

Marsino O. R. O Rondo

Dewi Peti Virgianti

Qurrota Aýun

Rochmanah Suhartati



GETPRESS INDONESIA

BAKTERIOLOGI

Penulis : Mustika Sari H Hutabarat

Dito Anurogo

Andi Fatmawati

Revita Permata Hati

Indas Wari Rahman

Nurfitri Arfani

Meri

Marsino O. R. O Rondo

Dewi Peti Virgianti

Qurrota Aýun

Rochmanah Suhartati

ISBN :

Editor : Dr. Oktavinis, M.Biomed.

Tri Putri ahyuni, S.Pd.

Penyunting: Dr. Neila Sulung, N.S., S.Pd. , M.Kes.

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

Penerbit: GETPRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi:

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah

Kecamatan Koto Tangah, Padang, Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id

email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Desember 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang

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

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan Judul Bakteriologi dapat diselesaikan dengan baik atas kerjasama tim penulis. Buku ini dibuat untuk mahasiswa yang mempelajari mengenai Bakteriologi. Buku ini bertujuan untuk memahami konsep dasar mikrobiologi, taksonomi (klasifikasi) bakteri, sel dan bagian-bagian dari bakteri, pertumbuhan dan perkembangan bakteri, genetika bakteri, flora normal mikroba tubuh manusia, imunitas terhadap infeksi, infeksi nosokomial, mekanisme kerja antibiotik dan mekanisme resistensi, sterilisasi dan biopsida, pemeriksaan bakteri.

Buku ini masih banyak kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan dan kesempurnaan buku ini selanjutnya. Kami mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Buku ini. Semoga Buku ini dapat menjadi sumber referensi dan literatur yang mudah dipahami.

Padang, November 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL	viii
BAB I KONSEP DASAR MIKROBIOLOGI.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Sejarah	1
1.3 Asal Mikroba.....	4
1.4 Pengelompokan Mikroorganisme	5
1.5 Hubungan Mikroorganisme dengan penyakit.....	9
1.6 Penemuan Vaksin dan Antibiotik	12
1.7 Mikrobiologi	13
1.8 Habitat dan Hubungan Mikroorganisme dengan Lingkungan	14
1.9 Kegunaan Mempelajari Mikrobiologi.....	16
DAFTAR PUSTAKA	17
BAB 2 TAKSONOMI (KLASIFIKASI) BAKTERI.....	19
2.1 Pendahuluan.....	19
2.2 Prinsip Dasar Taksonomi Bakteri.....	22
2.3 Sistem Klasifikasi Bakteri.....	29
2.4 Metode dan Teknik Identifikasi Bakteri.....	70
2.5 Studi Kasus dan Aplikasi dalam Identifikasi dan Klasifikasi Bakteri.....	77
2.5 Konklusi dan Rekomendasi	79
DAFTAR PUSTAKA	82
BAB 3 SEL DAN BAGIAN-BAGIAN DARI BAKTERI	85
3.1 Pendahuluan.....	85
3.2 Sel Bakteri.....	87
3.3 Struktur Sel Bakteri	92
DAFTAR PUSTAKA	109
BAB 4 PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN BAKTERI	111
4.1 Pendahuluan.....	111
4.2 Perkembangan Bakteri.....	112
4.3 Pertumbuhan Bakteri	122
DAFTAR PUSTAKA	138

BAB 5 GENETIKA BAKTERI	145
5.1 Pendahuluan.....	145
5.2 Unsur-unsur dan Perubahan Genetik	146
DAFTAR PUSTAKA.....	163
BAB 6 FLORA NORMAL MIKROBA TUBUH MANUSIA.....	165
6.1 Pendahuluan.....	165
6.2 Klasifikasi Flora Normal/Mikroflora Normal	169
6.3 Jenis-Jenis Flora Normal dalam Tubuh.....	171
6.4 Dampak Positif dan Negatif Flora Normal	177
DAFTAR PUSTAKA.....	179
BAB 7 IMUNITAS TERHADAP INFEKSI	181
7.1 Pendahuluan.....	181
7.2 Imunitas	181
7.3 Penutup	196
DAFTAR PUSTAKA.....	197
BAB 8 INFEKSI NOSOKOMIAL.....	199
8.1 Pendahuluan.....	199
8.2 Faktor Risiko dan Etiologi.....	200
8.3 Patofisiologi dan Klasifikasi	203
8.4 Manifestasi Klinis	206
8.5 Diagnosis.....	207
8.6 Penatalaksanaan	212
8.7 Prognosis dan Komplikasi	213
DAFTAR PUSTAKA.....	214
BAB 9 MEKANISME KERJA ANTIBIOTIK DAN MEKANISME RESISTENSI	217
9.1 Pendahuluan.....	217
9.2 Mekanisme Resistensi Antimikroba	224
DAFTAR PUSTAKA.....	231
BAB 10 STERILISASI DAN BIOPSIDA.....	235
10.1 Pendahuluan	235
10.2 Sterilisasi.....	236
10.3 Biopsida (<i>Biopsy</i>)	243
DAFTAR PUSTAKA.....	248
BAB 11 PEMERIKSAAN BAKTERI	251
11.1 Pemeriksaan Morfologi dan Struktur Bakteri.....	252
11.2 Pemeriksaan Gerak/Motilitas bakteri.....	265
11.3 Pemeriksaan Kultur	266
11.4 Pemeriksaan Biokimia	268

11.5 Pemeriksaan Uji Sensitivitas Antibiotik.....	269
11.6 Pemeriksaan Molekuler	269
DAFTAR PUSTAKA	271

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Pohon filogenetika yang didasarkan pada rRNA	3
Gambar 3. 1. Sel Prokariotik dan eukariotik	88
Gambar 3. 2. Bentuk Sel Bakteri	90
Gambar 3. 3. Ukuran Sel.....	91
Gambar 3. 4. Struktur Sel Bakteri	92
Gambar 3. 5. Struktur dasar peptidoglikan bakteri dan struktur dinding sel bakteri Gram positif dan Gram negatif.....	97
Gambar 3. 6. Struktur Membran Plasma Model Mozaik.....	103
Gambar 4. 1. Alur kerja untuk mengisolasi mikroorganisme baru untuk kultur menggunakan pendekatan keluaran atau deretan tinggi atau bertarget.....	116
Gambar 4. 2. Metode inovatif untuk isolasi dan kulturisasi mikroorganisme baru.	118
Gambar 4. 3. Diagram pembelajaran mendalam yang diterapkan pada deteksi dan identifikasi mikroorganisme pada gambar mikroskopis.	120
Gambar 4. 4. Siklus hidup <i>Bacillus subtilis</i>	125
Gambar 4. 5. Hubungan evolusi organisme model dan bakteri yang menunjukkan strategi reproduksi yang tidak biasa. ...	127
Gambar 4. 6. Populasi meningkat secara eksponensial seiring dengan pembelahan sel. Mikroba dengan bentuk berbeda membelah dengan cara yang sama	129
Gambar 4. 7. Pertumbuhan sel baru menggunakan tunas.....	130
Gambar 4. 8. Sporulasi dan siklus perkecambahan <i>B. subtilis</i>	131
Gambar 4. 9. Struktur bakteri pembentuk spora.	132
Gambar 4. 10. Mikroba tumbuh dengan baik dalam kisaran kondisi tertentu untuk berbagai variabel lingkungan (SITN, 2020).....	134
Gambar 4. 11. Representasi grafis dari kurva pertumbuhan bakteri yang khas dalam media kultur.	135
Gambar 5. 1. Kromosom Bakteri. (a) Kromosom dilepaskan dari sel <i>E.coli</i> yang dilisiskan secara perlahan, (b) DNA Sirkular dengan Supercoil (c) Kromosom DNA dengan daerah supercoil, (d) Gambar kontras fase dan fluoresensi simultan dari <i>E. coli</i> yang memperlihatkan lok.	146
Gambar 5. 2. Genom Bakteri. DNA heliks berserat ganda tampak sebagai dua lingkaran konsentrik.....	148
Gambar 5. 3. Region fungsional dari R-Plasmid.....	150
Gambar 5. 4. Pasangan basa normal pada DNA	151

Gambar 5. 5. Gambar Skematik Struktur DNA memperlihatkan tulang punggung gula-fosfat heliks pada dua untai yang terikat bersama dengan ikatan hidrogen antara basa-basanya.	152
Gambar 5. 6. Proses Replikasi DNA.....	153
Gambar 5. 7. Perbedaan struktur molekul DNA dan RNA	154
Gambar 5. 8. Struktur ribosom prokariot dan komposisi suatu ribosom yang terdiri dari satu salinan untuk masing-masing RNA 16S, 23S dan 5S.....	155
Gambar 5. 9. Struktur Transfer RNA (tRNA), struktur dua dimensi dari tRNA triptopan.....	156
Gambar 5. 10. Transkripsi dan Translasi. (a) Transkripsi dari DNA ke RNA, (b) Translasi dari RNA ke protein.	157
Gambar 5. 11. Mutasi pada pasangan basa. Substitusi basa (kiri) dan Penambahan atau insersi (kanan).....	158
Gambar 5. 12. Proses Konjugasi. Transfer plasmid (atas), transfer DNA (Bawah)	161
Gambar 5. 13. Proses transduksi.....	162
Gambar 5. 14. Proses transformasi	162
Gambar 6. 1. Sebaran Mikroflora Normal pada Tubuh Manusia.....	166
Gambar 6. 2. Bakteri <i>Staphylococcus epidermidis</i> pada Kulit	172
Gambar 6. 3. Flora Normal pada Saluran Pencernaan.....	174
Gambar 6. 4. Bakteri <i>Escherchia coli</i> di Usus Besar	175
Gambar 7. 1. Sel imun pada Imunitas Alamiah	183
Gambar 7. 2. Sel Imun Pada Sistem Imunnitas	186
Gambar 7. 3. Respon Antibodi Primer dan Sekunder	186
Gambar 7. 4. TLR dan Lokasi TLR di dalam dan luar	188
Gambar 7. 5. TRL yang dapat mengenali PAMP Bakteri (A), TLR yang mengenali Virus dan Parasit (B).....	189
Gambar 7. 6. Mekanisme pengeluaran sinyal dari bakteri yang telah difagosit	190
Gambar 7. 7. Respon Sel terhadap Bakteri.....	191
Gambar 7. 8. Tahapan Infeksi Bakteri dalam Tubuh menuju Peredaran Darah.....	192
Gambar 7. 9. Gambaran Klinis Badai Sitokin.....	193
Gambar 7. 10. Jenis Sitokin, Sel Penghasil Sitokin dan Fungsinya	194
Gambar 7. 11. Mekanisme Sitokirn Storm.....	195
Gambar 9. 1. Struktur dinding sel bakteri	218
Gambar 9. 2. Mekanisme aksi antibiotik	219
Gambar 9. 3. Mekanisme aksi dari antibiotik yang menarget dinding sel	220

Gambar 9. 4. Mekanisme aksi antibiotik yang menghambat biosintesis protein.....	221
---	-----

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Perbandingan organisme yang penting secara medis.....	12
Tabel 5. 1. Jenis Unsur Genetik.....	147
Tabel 5. 2. Perbandingan antara konjugasi, transduksi dan transformasi.....	160
Tabel 6. 1. Mikroflora normal pada tubuh manusia.....	168
Tabel 8. 1. Bakteri yang paling sering menyebabkan infeksi nosokomial MDR dan antibiotik yang resisten terhadap bakteri	202

BAB I

KONSEP DASAR MIKROBIOLOGI

Oleh Mustika Sari H Hutabarat

1.1 Pendahuluan

Konsep dasar mikrobiologi diawali dengan adanya tanda penemuan mikroorganisme. Dimana dalam kehidupan kita sehari-hari aktivitas mikroorganisme kerap kali kita jumpai, namun banyak kita yang tidak menyadari adanya keberadaan mikroorganisme atau jasad renik akibat minimnya pengetahuan kita akan hal tersebut. Adapun contoh kecil aktivitas mikroorganisme yang sering kita temukan di kehidupan kita sehari-hari antara lain adalah:

1. Makanan yang akan menjadi busuk jika dibiarkan terbuka dalam waktu lama.
2. Air dalam tempayan yang dapat menjadi apak setelah beberapa lama dibiarkan atau ditempatkan dalam tempayan kotor
3. Luka pada bagian tubuh akibat trauma fisik yang tidak dibersihkan dan diberi obat akan menyebabkan infeksi menghasilkan nanah dan koreng.

1.2 Sejarah

Keberadaan mikroorganisme sudah diduga ada sebelum orang belum dapat melihat secara langsung. Mikroorganisme baru dapat dilihat setelah ditemukannya mikroskop dengan kaca pembesar yang memadai, yakni dengan pembesaran 300 kali. Bukti adanya mikroorganisme ini pertama kali dilaporkan oleh

Antoni van Leeuwenhoek seorang ahli lensa pada tahun 1675 dengan menggunakan mikroskop berlensa tunggal temuannya.

Antoni van Leeuwenhoek menemukan mikroorganisme dari air, lumpur, saliva kotoran gigi, isi susu orang. sehat, dan menamakannya ***animalcules*** yang artinya suatu makhluk kecil berbentuk speris, cerutu atau spiral. Hasil temuannya ini lalu diterbitkan dalam serangkaian surat kepada **Royal Society of London**, yang kemudian dipublikasi dalam bahasa Inggris pada tahun 1684. Berkat penemuannya dikemudian hari Antoni van Leeuwenhoek disebut sebagai Bapak Bakteriologi (Alimsardjono, 2017).

Tidak sampai disitu saja, setelah hasil pengamatan Antoni van Leeuwenhoek diterbitkan, seorang ilmuwan asal Jerman Christian Gottfried Ehrenberg pada tahun 1838 memperkenalkan kata *bacterium*. Kata ini berasal dari romanisasi Bahasa Yunani yakni βακτηρι (*Bakterion*), Bentuk Diminutif dari Βακτηρία (*Bakteria*) yang memiliki Arti "Batang" Atau "Tongkat" hal ini karena bakteri pertama yang ditemukan berbentuk batang (Sinaga, 2008).

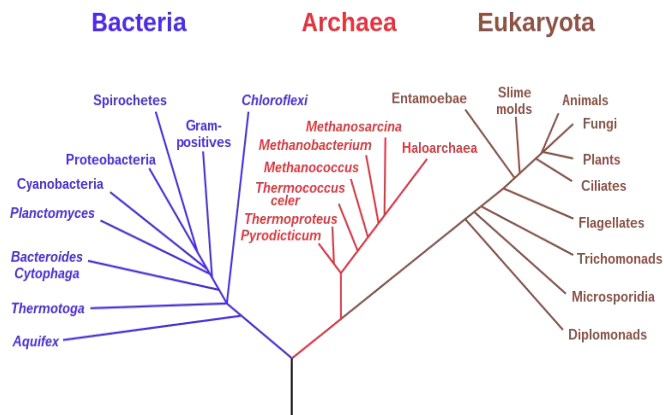


Pertengahan abad ke-19 seorang ahli botani berasal Breslau, Prusia Ferdinand Cohn yang merupakan salah satu pendiri bakteriologi dan mikrobiologi yang kemudian menemukan bakteri yang dapat membentuk endospore yang resisten terhadap suhu tinggi dan beliau menginisiasi pengelompokan bakteri berdasarkan bentuknya (bulat, batang, filament, dan spiral) serta mengembangkan beberapa metode yang digunakan untuk mencegah terjadinya kontaminasi pada kultur bakteri, seperti

penggunaan kapas steril sebagai penutup pada tabung reaksi (Sinaga, 2008).

Ilmuwan Louis Pasteur, seorang ahli kimia asal Prancis dimana berhasil dia menemukan bahwa dengan pemanasan dapat membunuh atau membuat bakteri dan mikroorganisme tidak aktif. Pasteur dan Robert Koch berhasil membantah konsep pembentukan spontan (*generation spontanea*) dan Robert Koch mengemukakan 'teori kuman penyakit' yaitu Postulat Koch (bapak bakteriologi modern), berkat dari penemuan ini Koch menerima penghargaan Nobel Kedokteran pada 1905 (Inggris, 2006). Selanjutnya sekitar tahun 1910, Paul Ehrlich bersama rekan-rekannya mengembangkan antibiotik sintetis pertama, yaitu Salvarsan (Arsfenamin) dimana antibiotik ini digunakan untuk mengobati penyakit sifilis (Schwartz, 2004).

Pada tahun 1977 perkembangan besar dalam dunia bakteriologi terjadi ketika Carl Woese berhasil membagi taksonomi filogenetik berdasarkan urutan RNA ribosomal 16S dan membagi prokariot dari dua domain menjadi sistem tiga domain yaitu membagi menjadi domain *Arcaebacteria* (archaea), *Eubacteri* (bakteri), dan eukariota.



Gambar 1. 1. Pohon filogenetika yang didasarkan pada rRNA
Sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/Sistem_tiga_domain

1.3 Asal Mikroba

Awal mula setelah ditemukannya mikroorganisme ini menimbulkan pertanyaan terkait dari mana asal mikroorganisme. Dahulu orang mengatakan bahwa mikroba ada begitu saja dari benda mati. Pendapat ini dianut oleh Aristoteles (300 tahun sebelum masehi), pendapat yang mengatakan bahwa mikroba timbul begitu saja dikenal dengan teori *Generation Spontanea* atau teori abiogenesis. Namun teori ini mulai ditinggalkan setelah para peneliti menemukan bukti melalui penelitian mereka, bahwa mikroba tidak timbul begitu saja. Beberapa percobaan yang telah dilakukan seperti, pada kardus daging yang telah direbus berjam-jam dalam botol dan ditutup dengan kapas, dan pada air kaldu tersebut tidak ditemukan adanya pertumbuhan mikroorganisme ditandai dengan air yang tidak keruh (Irianto, 2014).

Para ilmuwan yang membantah teori abiogenesis antara lain Louis Jablot (1718), John Needham (1749), Lazzaro Spallanzani (1768), Schultze (1836), T Schwann (1837), H.Schroeder dan Th von Dusch (1854), Louis Pasteur (1860 - 1864). Dari percobaan dapat dibuktikan bahwa pertumbuhan terjadi karena mikroorganisme yang terdapat dalam udara. Penelitian lain Louis Pasteur (1822-1895) membuktikan fermentasi dan peragian susu diakibatkan oleh mikroorganisme hidup. Dari hasil-hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa semua kehidupan berasal dari telur dan semua telur berasal dari sesuatu yang hidup "*Omne vivum ex ovo, Omne ovum ex vivo*" dan konsep ini dikenal dengan teori **biogenesis**. Namun, pendapat Louis Pasteur tersebut belum dapat menjawab pertanyaan asal mikroba. Hal ini identik dengan pertanyaan "**dari mana asal kehidupan?**", yang sampai sekarang belum terjawab dengan pasti. Walaupun fosil bakteri dalam bentuk stromatolit dapat ditemukan namun morfologi yang tidak khas membuat tidak dapat disimpulkan riwayat

evolusi bakteri atau mengetahui spesies bakteri yang muncul pertama kali (J. Tarigan, 1998).

1.4 Pengelompokan Mikroorganisme

Mikroorganisme dimasukkan dalam kelompok makhluk ini, hal ini dikarenakan memenuhi ciri organisem hidup antara lain, memiliki struktur gentika, mengadakan metabolisme, memperbanyak diri, dapat bergerak meskipun tidak selalu makhluk hidup dapat bergerak.

Pada mulanya semua organisme hidup dikelompokkan dalam dunia tumbuhan atau dunia hewan. Melalui pengelompokan ini, maka mikroorganisme ada yang dimasukkan ke dalam dunia tumbuhan atau hewan. Perbedaan antara hewan dengan tumbuhan adalah hewan dapat bergerak (mobilisasi) sementara tumbuhan tidak dapat bergerak. Perbedaan lain pada sel tumbuhan bentuk tetap atau kaku, dinding sel terbuat dari selulosa, sel tumbuhan memiliki vakuola, mampu menyusun zat makanan dari bahan anorganik. Mikroorganisme sendiri ada yang dapat bergerak dan yang tidak dapat bergerak.

Pengelompokan mikroorganisme dapat dilakukan setelah ditemukanya mikroskop moderen oleh Josep J Lister (1830). Ehrenberg (1838) merupakan ilmuwan pertama yang melakukan pengelompokkan mikroorganisme, mikroorganisme dikelompokkan menjadi *bacterium* dan *spirillum* Namun dalam pengelompokan ini tidak dapat menjawab apakah mikroorganisme masuk dunia tumbuhan atau dunia hewan. Pada tahun 1866 Haeckel mengusulkan agar mikroorganisme yang uniseluler dimasukkan dalam kelompok "**Protista**" dan yang masuk dalam kelompok Protista adalah algae, protozoa, jamur dan bakteri (Martinench, 2014).

Tahun 1932 mikroskop electron berhasil ditemukan sehingga penelitian lebih lanjut tentang mikroorganisme memberi gambaran struktur seluler dan organel pada sel mikroorganisme. Dari hasil penelitian-penelitian yang dilakukan didapat bahwa algae, protozoa, dan jamur memiliki struktur yang berbeda dari bakteri. Algae, protozoa dan jamur memiliki struktur sel yang lebih maju seperti halnya dengan sel tumbuhan dan hewan. Sementara kuman memiliki struktur sel yang lebih primitif. Dengan penemuan ini, protista kemudian dibagi menjadi protista tingkat tinggi atau **Protista-eukariot** (mengandung nukleus yang terbungkus oleh suatu membrane) dan protista tingkat rendah atau **Protista-prokariot** (bahan nukleus tidak terbungkus oleh membran) (Martinench, 2014).

Seperti pada penjelasan diatas bahwa sel prokariot memiliki perbedaan dengan sel eukariot dalam hal tidak adanya ruang (inti dan sitoplasma) yaitu membrane inti, organel mitokondria, reticulum, endoplasma, Golgi, fagosom, dan lisosom. Prokariot memiliki kromosom tunggal sirkuler yang terikat khusus di membrane yang disebut mesosom. Ribosom prokariot 70S, Ribosom eukariot 80S.

Semua mikroorganisme berupa sel kecuali virus yang terdiri dari Protista eukariot yaitu algae, protozoa, dan jamur, dan Protista prokariot yaitu bakteri (*eubacteria*, *archaebacterial*), jamur/fungi (*yeast*, *molds*), sianobakteri (dulu disebut algae biru hijau) dan arhaebakteri. Virus merupakan mikroorganisme yang bersifat nonseluler, berdasarkan kriteria dan morfologinya virus termasuk dalam kelompok mikroorganisme yang bersifat parasit obligat, dengan ukuran yang lebih kecil sehingga virus hanya dapat dilihat dengan mikroorganisme elektron. Virus sangat berbeda dengan kelompok mikroorganisme lain, oleh karena itu virus dimasukkan dalam kelompok tersendiri, tidak dimasukkan dalam eukariot atau prokariot. Organisme nonseluler ini berupa partikel bukan sel, tidak mempunyai inti, tidak dapat membentuk energi sendiri dan tidak dapat berkembang biak dengan

menggunakan jasad sendiri tetapi mempunyai materi genetik, asam nukleat DNA atau RNA didalam partikel. Virus memperbanyak diri di dalam sel hospes dengan memperbanyak asam nukleat, protein atau komponen lain, lalu disusun kembali menjadi partikel virus (B, 2012).

Kuman atau bakteri tidak memiliki membran inti, disebut uniseluler, dan beberapa bakteri memiliki organ tambahan untuk bergerak yaitu flagella, serta tidak memiliki klorofil. Ukuran bakteri bervariasi dengan diameter antara 0,1-600 μm . Bakteri terdapat dimana-mana, ada yang hidup saprofit, fototrop, kemolitrop, dan ada yang heterotrop. Bakteri berkembangbiak secara pembelahan biner (*binary fission*). Bakteri ada yang di dalam tubuh dan alam yang masing-masing bakteri ada yang menguntungkan. Pada tubuh ada bakteri atau mikroorganisme yang bersifat menguntungkan (flora normal), yang dapat merugikan (patogen), dan bersifat *oportunistik*. Dialam ada bakteri yang dapat menghancurkan sampah, digunakan dalam proses fermentasi, dimanfaatkan dalam industry pangan atau kimia dan banyak lagi.

Sianobakteri merupakan organisme prokariotik fotosintetik yang mampu melakukan fotosintesis karena mengandung klorofil dan pigmen. Mikroorganisme ini memiliki ukuran lebih besar dari bakteri, masuk dalam sel uniseluler, bereproduksi secara pembelahan biner, dan salah satu keuntungan dari organisme ini dapat berperan sebagai produsen dan penghasil senyawa nitrogen (N) di dalam air.

Arkhaebakteri merupakan mikroorganisme yang dapat hidup pada lingkungan yang ekstrim, seperti pada suasana yang kadar garam tinggi, suhu yang tinggi ($>100^{\circ}\text{C}$), tidak semua arkhaebakteri memiliki dinding sel yang mengandung peptidoglikan.

Algae atau ganggang memiliki klorofil dan pigmen untuk melakukan fotosintesis, ukurannya beragam dari beberapa micrometer (μm) sampai bermeter panjangnya, uniseluler dan multiseluler. Alga mendapat makanan atau energy melalui proses fotosintesis, yakni dengan bantuan sinar matahari. Alga uniseluler ukurannya antara 5 – 10 μm , yang multiseluler panjangnya dapat sampai 3 meter (m). Alga ditemukan hampir disemua tempat yang terkena sinar matahari, terutama di air segar, air laut (misal *fitoplankton*) dan ditanah. Alga berkembangbiak secara seksual dan aseksual. Perkembangan aseksual seperti yang terjadi pada bakteri yakni binaryfission atau pembelahan biner. Alga ada yang menguntungkan dan ada yang merugikan. Alga yang menguntungkan dapat memproduksi vitamin A, B1, C, D dan vitamin K, selain itu pada saat Alga melakukan fotosintesis dilepas oksigen. Alga oleh orang Jepang juga dimanfaatkan sebagai makanan, misal ganggang merah, dapat dibuat menjadi agar-agar, bahan pengemulsi. Alga yang menyebabkan penyakit juga ada, namun sedikit, antara lain *Prototheca wickerhamii*, menyebabkan infeksi sistemik, infeksi subkutan, bursitis (radang sendi), dan ada beberapa alga dapat menghasilkan toksin yang mematikan ikan dan hewan-hewan lain (Brooks, Butel and Morse, 2010).

Protozoa merupakan mikroorganisme yang tidak mengandung klorofil dan dinding sel, uniseluler, ada yang berflagella, bersilia atau kaki palsu (pseudopodia). Ukurannya bervariasi antara 1 mikrometer sampai ratusan micrometer, bentuknya juga bervariasi ada yang bulat, bentuk buah peer dan lain-lain. Protozoa mendapat makanan melalui cara fotosintetik, menyerap nutrient terlarut atau dengan menelan partikel-partikel makanan. Protozoa di alam berperan sebagai mata rantai makanan akuatik. Misal *zooplankton* (organisme seperti hewan, konsumen primer) menggunakan *fitoplankton* (organisme seperti tumbuhan, produsen primer) sebagai sumber makanan, kemudian *zooplankton* dimakan oleh *karnivora* (konsumen

sekunder). Protozoa berkembang biak secara seksual dan aseksual. Reproduksi aseksual terjadi secara *binary fission* atau *multiple fission*, sedang reproduksi seksual antara lain terjadi melalui konjugasi atau reproduksi yang rumit. Protozoa yang menyebabkan penyakit pada manusia antara lain amoeba, siliata, flagelata dan sporozoa (Brooks, 2013).

Jamur atau cendawan (*Molds*) terdiri dari kapang (berbentuk filamentus) dan ragi (*Yeast*). Jamur tidak mengandung klorofil, memerlukan senyawa organik untuk sumber makanannya, mempunyai dinding sel yang kaku, uniseluler sampai multiseluler, bentuknya lurus atau bercabang, ukurannya bervariasi dengan lebar antara 1- 5 μm dan panjang antara 5 – 30 μm . Bentuknya sangat bervariasi ada yang bulat atau memanjang atau seperti bola. Jamur bereproduksi secara aseksual (pembelahan, penguncupan/ pembentukan kuncup atau budding, pembentukan spora) dan seksual (penggabungan nucleus dari kedua induknya kemudian membelah). Jamur di alam ada yang menguntungkan dan ada yang merugikan. Yang menguntungkan, jamur dapat digunakan untuk menghasilkan bir, anggur, antibiotik dan banyak jamur mendegradasi sampah. Yang merugikan adalah jamur yang menyebabkan penyakit pada manusia.

1.5 Hubungan Mikroorganisme dengan penyakit

Pada mulanya hubungan antara mikroorganisme dengan penyakit belum dapat dibuktikan adanya hubungan antar keduanya yang dapat menyebabkan penyakit. Menurut Hipocrates penyakit dapat terjadi karena dua hal, antara lain 1), Adanya gangguan faktor internal, yakni adanya gangguan yang ada di dalam tubuh sendiri dan 2). Gangguan faktor eksternal, terjadinya penyakit dikarenakan adanya faktor yang berasal dari luar tubuh, kemudian Benjamin Marten (1720) menyatakan, jika ada seseorang yang menjadi sakit pasca mengkonsumsi sesuatu

menunjukkan bahwa di dalam makan itu terdapat makhluk kecil yang kemudian hari dikenal sebagai mikroba. Teori bahwa mikroorganisme dapat menyebabkan penyakit (*germ theory of disease*) yang digagas oleh Louis Pasteur dalam penelitiannya yang berhasil membuktikan adanya mikroorganisme penyebab kontaminasi melalui percobaan *anti-spontaneous generation* dan penemuan vaksin, kemudian Ignaz Semmelweis (1840-an) seorang dokter yang mengajarkan tentang *hand washing* yang terbukti sangat efektif dalam mencegah kontaminasi atau penularan penyakit dan Joseph Lister (1860) orang pertama yang memproduksi dan menggunakan antiseptik. Kemudian Robert Koch (1876) dalam penelitiannya membuktikan bahwa bakteri Anthrax yang dibiakan murni menggunakan media perbenihan dapat menimbulkan penyakit yang sama bila dimasukkan ke dalam tubuh hewan percobaan (Irianto, 2014).

Berdasarkan percobaan ini Koch (abad 19) merumuskan kriteria yang menyatakan hubungan penyakit dengan mikroba dimana harus memenuhi kriteria 'Koch's Postulates', rumusan ini menjadi panduan umum untuk mengidentifikasi patogen yang dapat diisolasi dengan teknik tertentu, dimana isi dari postulat ini adalah:

1. Mikroorganisme harus dapat diisolasi dari penderita dan tidak ada pada orang yang sehat.
2. Mikroorganisme harus dapat dipisahkan dari mikroorganisme lain dan dapat ditumbuhkan atau dimurnikan in-vitro
3. Mikroorganisme yang dimurnikan jika diinokulasi harus dapat menyebabkan penyakit yang sama pada orang sehat atau pada hewan uji.
4. Mikroorganisme yang diinokulasi pada hewan uji/ orang sehat itu harus dapat diisolasi kembali

Dengan ditemukannya penemuan ini menjadi awal mula berkembang pesatnya mikrobiologi dan semakin banyaknya mikroorganisme patogen yang menjadi penyebab infeksi ditemukan.

Mikroorganisme patogen adalah mikroorganisme yang dapat beradaptasi terhadap mekanisme pertahanan inang, dan dapat menginvasi jaringan dimana mikroorganisme itu akan tumbuh berkembang dalam jaringan, menghasilkan substansi beracun (toksin), merusak jaringan, dan menyebabkan penyakit.

Penyakit yang diakibatkan oleh mikroorganisme disebut penyakit infeksi. Infeksi sendiri diartikan sebagai proses mikroorganisme menginvasi tubuh sampai menimbulkan gejala dan penyakit pada tubuh. Penyakit infeksi pada umumnya mudah untuk ditularkan dari orang ke orang sehingga disebut infeksius atau *contagious* dan disebut dengan penyakit menular.

Ilmuwan Girolamo Fracstoro (1545) menyebutkan 3 cara penularan penyakit:

1. Kontak langsung, misalnya dengan menyentuh tubuh pasien
2. Kontak dengan media penularan/vektor, seperti nyamuk, kain dan spreng yang terkontaminasi dari orang sehingga dapat menyebabkan sakit
3. Melalui udara atau yang sekarang dikenal dengan droplet

Semua mikroorganisme adalah sel kecuali virus. Teori tentang sel menyatakan bahwa makhluk hidup dapat berupa organisme uniseluler (sel tunggal) dan multisel. Virus termasuk dalam mikroorganisme namun bukan organisme seluler. Berdasarkan tabel 1.1 dapat dilihat bahwa virus harus berproses terlebih dahulu untuk menghasilkan asam nukleat dan protein sehingga akhirnya dapat menjadi sel virus dan akhirnya dapat menginvasi jaringan yang sesuai dengan reseptornya.

Tabel 1. 1. Perbandingan organisme yang penting secara medis

Sifat	Virus	Bakteri	Jamur	Protozoa dan cacing
Jenis Sel	Bukan	Uniseluler	Uniseluler dan Multiseluler	Ya
Diameter (u)	0,02-0,2	1 – 5	3 - 5 (ragi)	15-25 (tropozoit)
Materi genetik	DNA atau RNA	DNA & RNA	DNA & RNA	DNA & RNA
Jenis inti	Tidak ada	Prokariotik	Eukariotik	Eukariotik
Ribosom	Tidak ada	70S	80S	80S
Mitokondria	Tidak ada	Tidak ada	Ada	Ada
Sifat permukaan Luar	Protein kapsid dan lipoprotein envelope	Dinding sel kaku Mengandung Peptidoglikan	Dinding sel kaku Mengandung Kitin	Membran yang lentur
Motilitas	Tidak ada	beberapa (+)	tidak ada	Kebanyakan (+)
Cara replikasi	Bukan binary fission *	binary fission	binary fission or budding	Binary fission

1.6 Penemuan Vaksin dan Antibiotik

Setelah diketahui hubungan mikroorganisme dengan penyakit dapat dibuktikan, selanjutnya dilakukan pengembangan atau penelitian terkait pengobatan penyakit infeksi. Penemuan antibiotik diawali dengan percobaan yang dilakukan oleh Alexander Flemming (1929), dimana beliau mengisolasi bakteri *Stahphylococcus sp* pada media kultur di cawan petri. Kemudia setelah beberapa lama, Flemming kemudian melihat hasil pertumbuhan bakteri ini pada salah satu cawan petri terdapat

pertumbuhan yang beda. Fleming melihat ada pertumbuhan jamur yang tumbuh pada cawan petri selain *Staphylococcus spp* dan hal yang menarik perhatian adalah tidak ada pertumbuhan bakteri disekitarnya. Pengobatan dengan antibiotik dilakukan oleh Florey dan Chain (1940). Kemudian di tahun 1935 Domagk menemukan Protosil (Sulfanilamida) untuk pengobatan infeksi yang disebabkan bakteri *Streptococcus*.

Adanya penemuan antibiotik semakin membantu dalam mengatasi penyakit yang disebabkan oleh mikroorganisme khususnya bakteri, namun satu sisi lain adanya antibiotik menimbulkan permasalahan baru. Setelah dilakukan pengembangan melalui penelitian yang dilakukan didapati bahwa terdapat beberapa antibiotik yang awalnya dapat membunuh bakteri karena adanya ketidaktepatan dalam penggunaan antibiotik menyebabkan bakteri menjadi kebal terhadap antibiotik. Hal ini mendorong dilakukannya pengembangan dan penelitian lebih lanjut dari aspek mikroorganisme dan antibiotik.

1.7 Mikrobiologi

Tidak ada satupun ilmu yang dapat menggambarkan keanekaragaman biologi sebaik mikroorganisme, yaitu makhluk hidup yang tak terlihat oleh mata telanjang (Brooks, 2013). Mikrobiologi merupakan salah satu cabang ilmu biologi yang mempelajari tentang mikroorganisme, yakni protozoa, algae, jamur (fungi), bakteri, virus. Dalam ilmu mikrobiologi dipelajari tentang metabolisme mikroba, pertumbuhan, faktor lingkungan, komposisi molekuler sel, sifat fisiologis, sifat biokimia, kekerabatan dengan sesamanya dan kelompok organisme lainnya seperti; habitat, ekologi, pengendalian, keuntungan dan kerugian yang ditimbulkan mikroorganisme pada manusia serta peran mikroorganisme yang ada. Namun Biokimia, biologi molekuler dan genetika merupakan perangkat atau wahana yang

dibutuhkan untuk menganalisa berbagai macam mikroba, sehingga dapat ditemukan beragam mikroorganisme.

Semakin majunya teknologi kedokteran dan semakin lengkapnya pemahaman tentang segala hal dari mikroorganisme, maka penelitian tidak hanya dilakukan untuk mengetahui bahwa mikroorganisme dapat menjadi penyebab terjadinya penyakit (infeksi), namun telah sampai dengan rekayasa genetika yang akhirnya dapat digunakan dalam perindustrian makanan, minuman, tekstil, pengobatan, dan masih banyak lagi.

1.8 Habitat dan Hubungan Mikroorganisme dengan Lingkungan

Mikroorganisme dapat dijumpai dimana saja, baik dalam udara, air, tanah, tumbuhan, dalam tubuh, makanan, dan minuman. Habitatnya dan contoh mikroorganismenya seperti berikut:

Tanah

Mikroorganisme menjadi lingkungan tempat mikroorganisme berkembang biak, selain itu berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa mikroba memiliki peran terhadap perubahan kimiawi yang terjadi di dalam tanah. Mikroba memiliki peran yang cukup penting dalam beberapa siklus hara seperti: siklus terbentuknya Karbon, Nitrogen, Sulfur.

Menurut Winogradsky, bakteri memiliki fisiologi khusus berdasarkan kebutuhannya terhadap energi yang disebut bakteri autotrof. Bakteri ini memperoleh energi dari hasil oksidasi senyawa anorganik tereduksi, dan menggunakan CO₂ sebagai sumber karbon.

Umumnya bakteri yang dijumpai pada tanah bersifat patogen terhadap manusia, seperti: *Clostridium tetani*, *Cl. perfringens*, *Cl. botulinum* (*food poisoning*), *Bacillus anthracis* (*anthrax*). Kelompok jamur patogen ditanah antara lain: *Coccidioides immitis* (*Coccidioidomycosis*), *Histoplasma capsulatum* (*Histoplasmosis*), *Sporotrichum* sp (*Sporotrichosis*), *Blastomyces* sp. Tidak hanya patogen bakteri dalam tanah juga ada yang menguntungkan, contohnya bakteri-bakteri yang dapat menguraikan sampah dan mikroorganisme yang membantu menyuburka tanah.

Air

Mikroorganisme, air, dan bakteri patogen merupakan komponen yang saling terkait. Pada umumnya mikroorganisme yang berasal dari berbagai tempat seperti udara, tanah, sampah, lumpur, tanaman, bangkai, kotoran hewan, dan manusia serta bahan organik lainnya menjadi sumber dari mikroorganisme yang ada di dalam tanah. Namun dalam air sendiri mempunyai daya membersihkan diri sendiri sebab pada air sendiri memiliki:

1. Antagonisme kuman

Antibiotik atau toksin yang terdapat di air dapat membunuh kuman. Protozoa air memfagosit kuman, bakteriofaga membunuh kuman.

2. Aliran air

Cahaya matahari mengandung ultra-violet (UV) yang dapat membunuh mikroorganisme atau kuman.

3. Bahan-bahan kimia

Ada bahan-bahan kimia yang dapat membunuh kuman, misal bahan kimia bakterisid.

Dalam air dapat mengandung kuman patogen yang berasal dari feses manusia atau binatang atau dari urine manusia atau hewan lain. Contoh mikroorganisme patogen yang dapat ditemukan dalam air, yang menyebabkan water borne disease

antara lain: Salmonella, Shigella, Vibrio, Hepatitis virus, Poliovirus, Enterovirus, Protozoa dan jamur.

Udara

Udara tidak mengandung komponen nutri yang penting untuk mikroorganisme. Adanya mikroorganisme di udara kemungkinan terbawa oleh debu, tetesan uap air kering ataupun hembusan angin. Mikroorganisme yang disebarkan bersamaan dengan angin adalah dalam bentuk spora, ataupun mikroorganisme yang terperangkap didalam droplet. Mikroorganisme di udara dapat mati jika dalam keadaan kering, efek sinar ozon dan UV.

1.9 Kegunaan Mempelajari Mikrobiologi

Pengetahuan terhadap mikrobiologi dapat dimanfaatkan dalam membantu menegakkan diagnosis baik itu bagi para dokter, bidan, dan keperawatan dalam merencanakan, pelaksanaan, dan evaluasi asuhan keperawatan. Menurut (Sinaga, 2008): Dalam bidang kedokteran sendiri ilmu mikrobiologi dapat digunakan untuk: 1). Diagnostik (isolasi dan identifikasi organisme), 2). Prognostik (menilai kemajuan atau perjalanan penyakit), 3). Panduan terapi (uji kepekaan mikroorganisme terhadap obat antimikroba), 4). Pencegahan (pembuatan vaksin), 5) Penentu sumber infeksi. Isolasi dan identifikasi organisme dilakukan untuk mengetahui penyebab terjadinya suatu penyakit.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimsardjono, L. (2017) 'Buku Ajar Pemeriksaan Mikrobiologi pada Penyakit Infeksi', *Jakarta : Cv Sagung Seto* [Preprint].
- B, S. (2012) *Bakteriologi Dasar*. Indonesia: Nusantara Press Jogjakarta.
- Brooks, et al (2013) *Mikrobiologi Kedokteran Jawetz, Melnick, & Adelberg, EGC 1648*. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Brooks, G.F., Butel, J.S. and Morse, S.A. (2010) 'Mikrobiologi kedokteran Jawetz, Melnick, dan Adelberg edisi 25', *Jakarta: EGC, 288(3), pp. 263–275*. Available at: <https://doi.org/10.1002/ar.a.20307>.
- Ehrenberg, Christian Gottfried; Carlgren, Oskar; Hemprich, W. F.; Hilgendorf, Franz; Klug, Fr.; Klug, Fr.; Martens, Eduard von; Matschie, Paul; Schumann, K. (1828). "Symbolae Physicae: Animalia Evertebrata Exclusis Insectis"
- Hafsan. (2011). *Mikrobiologi Umum*. Makassar: Alauddin University Press.
- Vallery-Radot, René (1919). *The Life of Pasteur*. Diterjemahkan oleh Devonshire, R.L. London: Constable & Company. hlm. 113.
- Irianto, K. (2014) 'Bakteriologi, Mikologi, Virologi Panduan Medis dan Klinis', *Bandung : Cv. Alfabeta.2014*. [Preprint].
- Inglis TJ (November 2007). "Principia aetiologica: taking causality beyond Koch's postulates". *Journal of Medical Microbiology*.
- J. Tarigan (1998) 'Pengantar Mikrobiologi Umum.', *Politeknik Negeri Malang (Polinema).Malang, Jawa Timur*. [Preprint].

Louisiana State University Law Center's Medical and Public Health Law Site, Historic Public Health Articles. Diarsipkan dari versi asli tanggal 18 Desember 2006. Diakses tanggal 23 November 2006.

Martinech, A. (2014) *Bakteriologi Medis, Mikologi Medis, dan Virologi medis, Pontificia Universidad Catolica del Peru*.

Sinaga, H. (2008) 'BAB I Asal Mikroorganisme', in *Pengantar Mikrobiologi*, pp. 1–15.

Suryani Yani, Taupiqurrahman. 2021. *Mikrobiologi Dasar*. Bandung: LP2M UIN Sunan Gunung Djati Bandung.

Schwartz RS (Maret 2004). "Paul Ehrlich's magic bullets". *The New England Journal of Medicine*. **350** (11): 1079–1080. doi:10.1056/NEJMp048021. PMID 15014180.

https://id.wikipedia.org/wiki/Sistem_tiga_domain

BAB 2

TAKSONOMI (KLASIFIKASI)

BAKTERI

Oleh Dito Anurogo

2.1 Pendahuluan

2.1.1 Definisi Taksonomi

1. Penjelasan umum mengenai taksonomi

Taksonomi merupakan pilar fundamental dalam ilmu biologi yang berfokus pada klasifikasi, penamaan, dan penentuan hubungan kekerabatan antarmakhluk hidup. Konsep ini didirikan pada prinsip-prinsip ilmiah untuk mengatur keragaman bentuk kehidupan ke dalam sistem yang teratur, memungkinkan ilmuwan untuk mengidentifikasi, mengelompokkan, dan menamai organisme — termasuk bakteri — berdasarkan kesamaan dan perbedaan intrinsik mereka. Hal ini melibatkan analisis morfologi, genetika, perilaku, dan interaksi ekologi makhluk hidup. Dalam konteks bakteri, taksonomi mengacu pada pengelompokan mikroorganisme ini ke dalam kategori seperti famili, genus, dan spesies berdasarkan ciri-ciri fisiologis, biokimia, dan genetik.

2. Pentingnya taksonomi dalam memahami keberagaman bakteri

Taksonomi bakteri memiliki signifikansi yang mendalam dalam memahami biodiversitas mikrobial dan mengelola pengetahuan biologis yang berlimpah.

Mengingat bakteri merupakan komponen penting dalam hampir semua ekosistem di bumi dan memiliki peran krusial dalam proses-proses seperti siklus nutrisi, produksi oksigen, dan patogenesis, memahami taksonomi bakteri memungkinkan peneliti untuk melacak evolusi bakteri, mengidentifikasi jalur evolusioner, serta memahami interaksi kompleks antara mikroba dan lingkungan, termasuk inangnya. Ini menjadi kunci dalam berbagai aplikasi praktis, termasuk pengembangan antibiotik, pengolahan limbah, bioteknologi, dan penelitian kesehatan masyarakat. Di era genetika modern, taksonomi juga telah berkembang dengan menggunakan alat bioinformatika untuk mengurai genom bakteri, yang membuka cakrawala baru dalam memahami keberagaman genetik dan fungsional bakteri serta potensi aplikasi mereka di masa depan.

2.1.2 Sejarah

1. Evolusi dalam sistem klasifikasi bakteri

Sejarah taksonomi bakteri dapat ditelusuri kembali ke era ilmuwan Swedia, Carolus Linnaeus, yang meletakkan dasar klasifikasi biologis. Namun, taksonomi bakteri berkembang secara signifikan pada abad ke-19 ketika para ilmuwan mulai membedakan bakteri berdasarkan bentuk dan karakteristik pewarnaan Gram. Di masa lalu, klasifikasi bakteri didominasi oleh morfologi dan karakteristik biokimia, tetapi kemajuan dalam bioteknologi dan analisis molekuler telah mengubah paradigma ini secara drastis. Teknologi sekuens DNA, terutama metode sekuensing generasi baru, telah memberi kita pemahaman yang lebih luas dan mendalam tentang diversitas genetik bakteri. Kita kini dapat melacak garis keturunan evolusi bakteri dengan lebih akurat dan menggambarkan pohon filogenetik yang kompleks dengan sejuta cabang diversifikasi yang

sebelumnya tak terbayangkan. Sistem klasifikasi modern tidak hanya mempertimbangkan fenotipe, tetapi juga genotipe dan hubungan filogenetik, menggiring kita ke era sistem klasifikasi polifasetik yang lebih dinamis dan berkelanjutan.

2. Tokoh dan kontribusi mereka dalam taksonomi bakteri

Tokoh-tokoh penting dalam dunia taksonomi bakteri telah memberikan sumbangsih yang tidak terukur dalam memahami keragaman mikrobial. Robert Hooke dan Antonie van Leeuwenhoek adalah di antara ilmuwan pertama yang menggambarkan mikroorganisme menggunakan mikroskop. Louis Pasteur dan Robert Koch memberikan kontribusi metodologis dan konseptual yang membantu membedakan spesies bakteri berdasarkan karakteristik patogenik dan bukan patogenik. Selanjutnya, Ernst Haeckel memperkenalkan kerajaan Protista, yang awalnya digunakan untuk mengklasifikasikan bakteri. Namun, kontribusi paling penting datang dari Carl Woese dan George Fox yang, pada tahun 1977, mendefinisikan domain Archaea, yang memisahkan kelompok ini dari bakteri berdasarkan perbedaan dalam struktur ribosom. Metode modern, seperti analisis sekuens 16S rRNA yang mereka kembangkan, terus membentuk kerangka kerja taksonomi bakteri dan menjadi titik tolak dalam pemahaman kita mengenai evolusi kehidupan di bumi.

Dengan bertambahnya pengetahuan, konsep taksonomi bakteri kini mengintegrasikan ilmu genomika, proteomika, dan metabolomika, memasuki dimensi baru di mana integrasi data multi-omics menjadi penting. Pendekatan futuristik dalam taksonomi bakteri tidak hanya menjanjikan pemahaman yang lebih baik tentang fisiologi dan metabolisme mikrobial, tetapi juga membuka peluang untuk aplikasi revolusioner dalam kesehatan manusia,

industri pangan, dan lingkungan. Misalnya, penggunaan teknologi CRISPR-Cas9 dalam mengedit genom bakteri memungkinkan kita untuk menciptakan strain bakteri dengan sifat-sifat yang diinginkan atau mengeliminasi jalur-jalur yang menyebabkan penyakit. Ini dapat memacu evolusi taksonomi bakteri menuju era baru di mana kita tidak hanya mengklasifikasikan, tetapi secara aktif merancang kehidupan mikrobial untuk manfaat manusia dan planet ini. Pendekatan filosofis yang lebih dalam dalam taksonomi bakteri juga mendesak kita untuk merenungkan bagaimana kita menghargai dan memanfaatkan keanekaragaman mikrobial sebagai aset biologi yang tak ternilai, mencerminkan penghargaan kita terhadap semua bentuk kehidupan.

2.2 Prinsip Dasar Taksonomi Bakteri

2.2.1 Ciri Morfologi

1. Bentuk dan struktur sel bakteri

Dalam kerangka taksonomi bakteri, morfologi sel menawarkan kanvas pertama yang mendasar untuk pengklasifikasian. Bentuk sel bakteri beragam, mulai dari bentuk sferis yang dikenal sebagai kokus, batang atau basil, spiral seperti spiroset, hingga bentuk yang lebih kompleks seperti filamen atau heliks. Selain itu, struktur fisik seperti keberadaan flagela, pilus, dan kapsul memberikan karakteristik tambahan yang penting untuk identifikasi. Struktur ini tidak hanya penting dalam menentukan taksonomi, tetapi juga mempengaruhi ekologi dan patogenisitas bakteri. Misalnya, flagela berkaitan dengan kemampuan bakteri untuk bergerak dan mendukung virulensi, sedangkan kapsul memainkan peran dalam perlindungan terhadap fagositosis.

Pengamatan terhadap bentuk dan susunan sel, seperti rantai kokus atau klaster, dapat membantu dalam klasifikasi awal. Struktur internal sel bakteri, termasuk lokasi DNA dalam nukleoid, ukuran dan distribusi ribosom, serta detail struktur membran internal dan dinding sel, semuanya memberikan informasi vital dalam menentukan hubungan filogenetik dan klasifikasi bakteri. Dengan berkembangnya mikroskop elektron dan teknologi pencitraan canggih lainnya, kita dapat mengungkap struktur ultra-mikroskopis yang dahulu terlalu halus untuk diamati, memberikan dimensi baru dalam pemahaman struktural bakteri.

2. Pewarnaan Gram

Metode pewarnaan Gram, yang ditemukan oleh ilmuwan Denmark Hans Christian Gram, merupakan salah satu teknik paling fundamental dan masih relevan dalam mikrobiologi. Teknik ini membedakan bakteri menjadi dua kelompok besar: Gram-positif dan Gram-negatif, berdasarkan komposisi kimia dinding sel yang mempengaruhi kemampuan bakteri untuk menahan atau kehilangan warna kristal violet selama proses dekolonisasi dengan alkohol atau aseton.

Bakteri Gram-positif memiliki lapisan peptidoglikan tebal yang menahan kristal violet, sedangkan bakteri Gram-negatif memiliki lapisan peptidoglikan yang lebih tipis dan membran luar yang menyebabkan mereka kehilangan warna saat dekolonisasi dan kemudian diwarnai merah atau merah muda oleh safranin atau fuchsin. Perbedaan ini tidak hanya penting dalam klasifikasi, tetapi juga memiliki implikasi dalam pengobatan infeksi bakteri, karena struktur dinding sel mempengaruhi sensitivitas terhadap antibiotik.

Melihat ke masa depan, kita dapat membayangkan pengembangan metode pewarnaan yang lebih canggih yang memanfaatkan nanopartikel atau probe fluoresensi untuk

target spesifik, sehingga memungkinkan identifikasi bakteri pada tingkat lebih presisi. Penggunaan pewarnaan berbasis molekuler dan analisis citometri alir dapat menyediakan cara yang lebih cepat dan otomatis untuk klasifikasi bakteri, sambil mengintegrasikan informasi genotipik yang memberikan gambaran yang lebih lengkap dari identitas bakteri. Selanjutnya, kemajuan dalam teknologi bioinformatika dan pengolahan gambar dapat memungkinkan analisis otomatis hasil pewarnaan, menyederhanakan proses identifikasi taksonomi bakteri dan mengurangi kesalahan manusia.

2.2.2 Ciri Fisiologis

1. Metabolisme bakteri

Metabolisme bakteri merupakan kumpulan proses kimia yang kompleks dan terdiversifikasi yang berlangsung di dalam sel bakteri, yang memungkinkan mereka untuk mempertahankan kehidupan, bertumbuh, dan bereproduksi. Proses metabolisme ini meliputi jalur biosintetis yang mengubah nutrisi menjadi komponen sel dan jalur bioenergetik yang menghasilkan energi. Keanekaragaman proses metabolisme ini, termasuk respirasi aerob dan anaerob, fermentasi, fotosintesis, dan kemolitotrofi, merupakan faktor penting dalam taksonomi bakteri.

Bakteri dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber energi yang mereka gunakan (fototrof versus kemotrof), sumber karbon (autotrof versus heterotrof), dan mekanisme pengelolaan energi (respirasi versus fermentasi). Pemahaman mendalam tentang metabolisme bakteri membantu dalam menentukan jalur evolusi dan hubungan ekologis yang mereka miliki dengan organisme lain. Dengan kemajuan teknologi, seperti spektrometri massa dan analisis metabolomik, kita sekarang dapat

mengidentifikasi profil metabolit spesifik yang tidak hanya membantu dalam taksonomi tetapi juga dalam memahami peran bakteri dalam ekosistem dan potensi bioteknologi mereka.

Keberagaman bakteri yang luar biasa ini, tercermin dalam klasifikasi mereka berdasarkan metabolisme, merupakan saksi bisu akan adaptasi evolusioner yang memukau sepanjang sejarah kehidupan di Bumi. Fototrof, bakteri yang mendapatkan energi mereka dari cahaya melalui fotosintesis, memainkan peran krusial dalam siklus karbon global dengan mengonversi energi matahari menjadi energi kimia. Di sisi lain, kemotrof mendapatkan energi mereka dari reaksi kimia, sering kali melalui oksidasi senyawa anorganik atau organik, dan berperan penting dalam siklus biogeokimia, seperti siklus nitrogen dan sulfur.

Autotrof, yang dapat memanfaatkan karbon dioksida sebagai sumber karbon utama mereka, menjadi dasar jaringan makanan di banyak ekosistem, memungkinkan kehidupan untuk berkembang di lingkungan yang tidak mendukung kehidupan heterotrof yang harus mengandalkan bahan organik sebagai sumber karbon. Di antara autotrof, beberapa bakteri yang paling menarik adalah yang mengandalkan proses kimolitotrofi, dimana mereka mengoksidasi senyawa anorganik untuk mendapatkan energi, sering kali di lingkungan yang ekstrem seperti sumber hidrotermal di dasar laut.

Dalam hal pengelolaan energi, respirasi dan fermentasi menandai dua jalur utama. Respirasi, baik aerobik maupun anaerobik, mengacu pada penggunaan penerima elektron eksternal untuk memproduksi energi, sementara fermentasi melibatkan produksi energi dalam lingkungan tanpa oksigen, dengan menggunakan penerima elektron internal. Bakteri fermentatif sering kali dijumpai

dalam industri makanan, dimana mereka bertanggung jawab atas produksi yoghurt, keju, dan banyak makanan fermentasi lainnya.

Teknologi seperti spektrometri massa memungkinkan analisis presisi tinggi dari molekul kecil yang diproduksi atau dikonsumsi oleh sel selama metabolisme. Sementara itu, analisis metabolomik menyediakan snapshot komprehensif dari semua metabolit dalam sel pada waktu tertentu, memungkinkan peneliti untuk mengonstruksi jaringan metabolik yang kompleks dan memahami bagaimana bakteri bereaksi terhadap perubahan lingkungan.

Penerapan pemahaman ini dapat ditemukan dalam berbagai sektor industri, dari pengembangan antibiotik baru yang menargetkan jalur metabolik spesifik, hingga desain konsorsium mikroba untuk pengolahan limbah yang efisien. Dalam bioteknologi, manipulasi jalur metabolisme bakteri untuk produksi bahan kimia dan farmasi terbaru telah membuka jalan bagi "pabrik selular" yang dapat menyediakan alternatif ramah lingkungan untuk proses kimia tradisional.

Selain itu, dalam konteks perubahan iklim, bakteri autotrofik dan kemotrofik mungkin memiliki peran penting dalam sekuensing karbon dan mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Karena itu, mempelajari dan memanfaatkan metabolisme bakteri tidak hanya mendorong batas-batas pengetahuan ilmiah kita tetapi juga memiliki potensi yang besar dalam mengatasi beberapa masalah lingkungan dan kesehatan yang paling mendesak di dunia saat ini.

2. Pertumbuhan dan reproduksi

Pertumbuhan dan reproduksi bakteri merupakan aspek kunci dalam siklus kehidupan mereka dan menawarkan indikator penting untuk taksonomi bakteriologi. Bakteri umumnya berkembang biak secara asexual melalui pembelahan biner, suatu proses di mana satu sel membelah menjadi dua sel anak yang genetiknya identik dengan sel induk. Namun, ada variasi dalam mekanisme ini, termasuk sporulasi, yang merupakan strategi adaptif untuk bertahan hidup dalam kondisi yang keras, dan mekanisme pertumbuhan lain seperti gemmation atau fragmentasi filamen. Pertumbuhan bakteri dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu, pH, dan konsentrasi nutrisi, yang semuanya bisa menjadi dasar untuk diferensiasi taksonomi.

Dalam era modern, dengan bantuan bioinformatika dan teknik biologi molekuler, kita mampu mengamati dinamika reproduksi bakteri pada level genomik. Analisis sekuens DNA telah mengungkapkan mekanisme genetika di balik variabilitas dan adaptasi bakteri, termasuk transfer gen horizontal, yang menantang konsep tradisional tentang 'pohon kehidupan' yang linier. Ke depannya, kita mungkin melihat integrasi lebih lanjut antara data genetika, fisiologi, dan lingkungan dalam taksonomi bakteri, yang akan memungkinkan identifikasi dan klasifikasi yang lebih presisi, serta pemahaman yang lebih baik tentang evolusi dan ekologi mikroorganisme ini.

Pada akhirnya, perluasan pengetahuan kita tentang ciri-ciri fisiologi bakteri melalui metode-metode canggih ini tidak hanya memperkaya taksonomi bakteri tetapi juga membuka jalan untuk aplikasi yang berpotensi merubah paradigma dalam kesehatan manusia, industri, dan perlindungan lingkungan, dengan memanfaatkan bakteri dalam cara-cara yang lebih berkelanjutan dan inovatif.

Penerapan bioinformatika dalam mikrobiologi telah memungkinkan kita untuk mengkonstruksi peta interaksi genetik yang kompleks, memberikan gambaran yang lebih rinci tentang bagaimana bakteri beradaptasi dengan lingkungan mereka, berevolusi, dan kadang-kadang menjadi resisten terhadap antibiotik. Penemuan baru dalam genetika bakteri sering kali menunjukkan keberadaan gen-gen yang belum pernah teridentifikasi sebelumnya, yang mungkin memiliki fungsi krusial dalam ketahanan hidup bakteri atau dalam interaksi mereka dengan makhluk hidup lain, termasuk manusia.

Transfer gen horizontal, khususnya, mengungkapkan bahwa bakteri dapat bertukar materi genetik secara lateral, tidak hanya secara vertikal dari generasi ke generasi. Fenomena ini menjelaskan bagaimana resistensi antibiotik dapat menyebar dengan cepat di antara populasi bakteri yang berbeda, dan menunjukkan bahwa evolusi mikroorganisme ini jauh lebih dinamis daripada yang diperkirakan sebelumnya.

Taksonomi bakteri yang terintegrasi dengan data genetik, fisiologis, dan lingkungan juga memfasilitasi pengembangan strategi baru dalam pengelolaan penyakit infeksi, dengan menargetkan jalur atau proses biologis tertentu yang khas untuk patogen. Dengan demikian, bisa tercipta terapi yang lebih efektif dan berkurangnya kemungkinan resistensi obat berkembang.

Selain itu, pemahaman yang mendalam tentang fisiologi bakteri telah membantu kita merancang probiotik yang dapat memperbaiki atau mempertahankan kesehatan mikrobiota usus, yang telah terbukti memainkan peran penting dalam kesehatan manusia. Juga, dalam industri, kita menggunakan bakteri dalam fermentasi untuk menghasilkan berbagai produk, dari bahan kimia hingga

biofuel, dengan efisiensi yang lebih tinggi dan dampak lingkungan yang lebih rendah.

Dalam bidang lingkungan, pemanfaatan bakteri untuk bioremediasi merupakan strategi penting dalam upaya memperbaiki kerusakan yang disebabkan oleh polusi. Bakteri yang mampu mendegradasi plastik, memetabolisme senyawa beracun, atau mengkonversi polutan menjadi bentuk yang kurang berbahaya, kini menjadi fokus dalam pengembangan teknologi pembersihan lingkungan yang berkelanjutan.

Dengan teknologi yang terus berkembang, kita mungkin melihat bakteri yang direkayasa secara genetis tidak hanya untuk melawan penyakit tetapi juga untuk mengatasi tantangan global seperti kelangkaan sumber daya, ketahanan pangan, dan perubahan iklim. Masa depan akan menyaksikan integrasi lebih lanjut dari biologi sintetis, bioteknologi, dan bioinformatika dalam mengeksplorasi potensi penuh bakteri demi kepentingan umat manusia dan bumi.

2.3 Sistem Klasifikasi Bakteri

2.3.1 Klasifikasi Berdasarkan Bentuk dan Struktur

1. Kokus (bakteri bulat atau hampir bulat)

Bakteri kokus menampilkan morfologi yang paling sederhana namun beragam dalam kelompok bakteri, yakni bentuk bulat atau sferis. Mereka mungkin berada dalam konfigurasi yang berbeda, seperti diplokokus yang berpasangan, streptokokus yang membentuk rantai, atau stafilokokus yang teratur seperti buah anggur. Morfologi ini bukan sekadar refleksi dari preferensi estetik, tetapi mempunyai konsekuensi ekologis dan patogenik yang

signifikan. Misalnya, *Staphylococcus aureus* yang berkelompok seperti buah anggur memudahkan mereka untuk menahan serangan fagositik dari sistem imun. Dalam praktek klinik, bentuk ini dapat memberi petunjuk pada dokter mengenai agen penyebab infeksi dan pilihan terapi yang tepat.

Pada tingkatan lebih dalam, struktur sferis bakteri kokus memengaruhi mekanisme adhesi mereka pada permukaan inang atau substrat, memainkan peran kunci dalam pembentukan biofilm, yang merupakan lapisan pelindung bagi komunitas mikroba. Biofilm meningkatkan ketahanan terhadap agen antimikroba dan sering kali terlibat dalam penyebaran infeksi nosokomial (infeksi yang didapat di rumah sakit). *Streptococcus pneumoniae*, diplokokus yang bertanggung jawab atas pneumonia, meningitis, dan infeksi telinga, adalah contoh bagaimana pengelompokan dalam rantai dapat memfasilitasi pergerakan bakteri melalui mukosa, mempermudah kolonisasi dan invasi ke jaringan lebih dalam.

Pengetahuan mengenai morfologi bakteri kokus turut mempengaruhi pengembangan vaksin. Sebagai contoh, vaksin pneumokokus memanfaatkan polisakarida kapsul dari strain patogen yang berbeda untuk menginduksi respons imun spesifik yang mampu memberikan perlindungan terhadap infeksi. Hal ini menegaskan pentingnya memahami variasi struktural pada level selular bakteri dalam pengembangan strategi pencegahan penyakit.

Penelitian terbaru dalam genomika (studi tentang gen) dan proteomika telah mengungkap bagaimana perbedaan genetik pada bakteri kokus menyebabkan variasi dalam faktor virulensi, yaitu komponen atau strategi yang digunakan oleh mikroorganisme patogen untuk

menyerang inang dan menghindari respons imun. Sebagai contoh, variabilitas genetik pada stafilokokus bertanggung jawab atas kemunculan strain methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), yang saat ini menjadi masalah kesehatan global karena ketahanannya terhadap banyak antibiotik umum.

Dengan mengintegrasikan pemahaman ini dalam konteks kesehatan masyarakat, ilmuwan dan klinisi berusaha mengembangkan metode diagnostik yang lebih canggih, terapi yang lebih ditargetkan, dan langkah-langkah pencegahan yang lebih efektif. Memahami bakteri kokus tidak hanya pada level morfologi tetapi juga pada interaksi molekuler dan genetiknya memberikan kita wawasan yang luas untuk mengatasi tantangan kesehatan yang terus berkembang seiring dengan evolusi mikroba tersebut.

2. *Bacillus* (bakteri batang)

Bakteri *bacillus*, atau yang sering disebut sebagai bakteri batang, merupakan kelompok yang luas dan beragam. Mereka mungkin bersifat aerob atau anaerob, dan dapat ditemukan di hampir semua habitat di bumi. Bentuk batang mereka memberi keuntungan dalam absorpsi nutrisi dan efisiensi pergerakan. Dalam taksonomi, genus *Bacillus* adalah contoh penting, dengan spesies seperti *Bacillus anthracis* yang dikenal karena kepatogenannya. Ke depan, penelitian lebih lanjut mengenai pola ekspresi gen pada bakteri bentuk batang dapat memberikan wawasan baru mengenai adaptasi dan evolusi mereka dalam berbagai lingkungan. Beberapa basil membentuk spora yang tahan terhadap kondisi ekstrem. Contoh: *Escherichia coli* dan *Bacillus anthracis*.

Keunikan bakteri *bacillus* tidak hanya terletak pada kemampuan adaptasi mereka yang luar biasa, tetapi juga pada peranan vital yang mereka mainkan dalam berbagai

proses industri dan ekologi. Misalnya, *Bacillus subtilis* dikenal atas kapasitasnya untuk menghasilkan enzim yang digunakan dalam industri deterjen. Sementara itu, *Bacillus thuringiensis* memproduksi toksin yang spesifik terhadap serangga dan telah menjadi alat penting dalam pengendalian biologis terhadap hama tanaman.

Dalam konteks medis, *Bacillus anthracis* adalah agen penyebab antraks, suatu penyakit yang dapat mematikan. Struktur sel bacillus yang memungkinkan pembentukan spora memberikan keuntungan dalam bertahan hidup pada kondisi yang tidak menguntungkan, termasuk kekeringan, panas, dan kehadiran desinfektan. Kemampuan unik ini juga mengimplikasikan tantangan dalam pengendalian infeksi, memerlukan pendekatan khusus untuk dekontaminasi dan terapi.

Aspek futuristik lain dari penelitian bakteri bacillus adalah penggunaannya dalam teknologi pengeditan gen, seperti CRISPR-Cas9, yang telah direvolusi dengan mengadopsi mekanisme pertahanan alami bakteri ini terhadap virus. Teknologi ini membuka kemungkinan untuk pengembangan genetika yang presisi pada hampir semua organisme, termasuk potensi untuk menciptakan tanaman yang lebih tahan terhadap penyakit dan perubahan iklim.

Penelitian terbaru juga menunjukkan potensi *Bacillus* spp. dalam produksi bioplastik, mengurangi ketergantungan kita pada plastik berbasis minyak bumi dan memberikan solusi yang lebih berkelanjutan. Bakteri ini bisa mengkonversi substrat organik menjadi polihidroksi-alkanoat (PHA), yang merupakan polimer biodegradable yang dapat digunakan untuk membuat bahan plastik yang ramah lingkungan.

Selanjutnya, genomika dan proteomika bakteri bacillus terus mengungkapkan rahasia adaptasi mereka pada lingkungan ekstrem, seperti yang ditemukan pada *Bacillus halodurans* yang mampu bertahan dalam kondisi salinitas tinggi. Kajian mendalam mengenai mekanisme molekuler bakteri bacillus tidak hanya meningkatkan pemahaman kita tentang kehidupan mikroba, tetapi juga memberikan peluang untuk aplikasi yang inovatif dalam bidang kedokteran, pertanian, dan teknologi lingkungan.

Dengan terus menggali lebih dalam tentang bakteri bacillus, kita dapat memperluas cakrawala ilmu pengetahuan dan menemukan solusi-solusi kreatif untuk berbagai tantangan yang dihadapi umat manusia. Studi tentang bakteri ini, yang merupakan entitas sederhana namun sangat adaptif, merupakan jembatan antara pemahaman kita tentang kehidupan di tingkat mikroskopis dan aplikasi praktis yang dapat mengubah dunia menjadi lebih baik.

3. Spirillum (bakteri spiral)

Bakteri dengan bentuk spiral seperti *Spirillum* memiliki sel yang melengkung atau berbentuk heliks. Ini adalah adaptasi yang mungkin membantu mereka dalam bergerak melalui media yang kental atau berlendir dengan lebih efisien. Selain itu, bakteri spiral juga dikaitkan dengan beberapa patogen manusia, seperti *Treponema pallidum*, agen penyebab sifilis. Pengenalan mereka melalui morfologi telah memainkan peran penting dalam mikrobiologi diagnostik dan terus menjadi penting dalam identifikasi cepat di laboratorium klinis. Contoh lainnya: *Vibrio cholerae* (berbentuk koma) dan *Spirillum minus*.

Bakteri spirillum, dengan morfologi spiral mereka yang khas, menghadirkan suatu dimensi tambahan dalam memahami diversitas mikrobial dan interaksi mereka

dengan lingkungan. Bentuk spiral yang unik ini bukan hanya merupakan karakteristik penting dalam pengklasifikasian mikroorganisme, tetapi juga mempengaruhi cara mereka berinteraksi dengan sel inang dan lingkungan mikroba lainnya.

Kapasitas bergerak (motilitas) yang dimiliki oleh bakteri spiral, yang sering dikaitkan dengan struktur flagela, memberikan keunggulan evolusi dalam kondisi lingkungan yang menantang. Kemampuan ini memungkinkan mereka untuk bermigrasi ke arah sumber nutrisi atau menjauhi kondisi berbahaya, seperti pH ekstrem atau keberadaan senyawa toksik. Selain itu, bentuk spiral dapat memfasilitasi proses penempelan (adesi) dan invasi sel inang, yang merupakan langkah awal yang kritis dalam patogenesis penyakit.

Di bidang kesehatan, bakteri spiral berperan sebagai agen penyebab beberapa penyakit serius. Sebagai contoh, *Treponema pallidum* yang menyebabkan sifilis, adalah subjek penting dalam penelitian medis, terutama dalam pengembangan metode diagnostik dan strategi pengobatan yang lebih efektif. Penemuan bahwa *Treponema pallidum* tidak dapat tumbuh di media kultur in vitro telah memicu pencarian teknik alternatif, seperti penggunaan PCR (Polymerase Chain Reaction) untuk deteksi DNA bakteri ini pada pasien.

Di sisi lain, *Vibrio cholerae* adalah contoh lain dari bakteri spiral yang memiliki dampak besar pada kesehatan manusia. Penyebab kolera, penyakit yang bisa berakibat fatal, *Vibrio cholerae* menunjukkan betapa pentingnya pemahaman ekologi mikroba dan hubungan mereka dengan manusia. Wabah kolera yang terjadi di berbagai belahan dunia telah menggarisbawahi perlunya surveilans

kesehatan masyarakat yang kuat dan pengolahan air minum yang aman.

Pada level ekologi, bakteri spiral berkontribusi pada siklus nutrisi dan dinamika ekosistem. Studi tentang bakteri ini telah membantu memahami proses-proses biogeokimia dan mengidentifikasi peran mereka dalam siklus nitrogen dan karbon di lingkungan alam. Mereka juga berperan dalam simbiosis dengan organisme lain, seperti dalam kasus bakteri yang berkoloni dalam saluran pencernaan serangga, dimana mereka membantu dalam pencernaan atau memperoleh nutrisi dari inang mereka.

Kedepannya, dengan memanfaatkan perkembangan teknologi sekuensing dan metagenomik, kita dapat mengharapkan penemuan baru tentang keanekaragaman genetik dan fungsional bakteri spiral. Hal ini akan membuka peluang untuk mengeksplorasi aplikasi potensial mereka lebih lanjut, seperti dalam bioremediasi atau sebagai bioindikator untuk kesehatan ekosistem.

Secara keseluruhan, bakteri spiral memberikan jendela ke dalam kompleksitas adaptasi biologis dan pentingnya morfologi mikroba dalam menentukan nasib dan peranan mereka dalam biosfer. Studi lebih lanjut akan mengembangkan pemahaman kita tentang prinsip-prinsip evolusi kehidupan dan mungkin memberikan kunci untuk memecahkan beberapa tantangan terbesar yang dihadapi oleh dunia dalam bidang kesehatan dan keberlanjutan lingkungan.

4. Bakteri Spiroset (Spirochetes)

Bakteri spiroset merupakan suatu kelas mikroorganisme yang memiliki bentuk spiral yang panjang dan tipis, dengan pergerakan yang khas dan lincah, berkat flagela endoflagela yang terletak di dalam periplasma

(ruang antara membran luar dan sitoplasma). Kategori ini termasuk beberapa genus yang memiliki relevansi klinis tinggi, seperti *Treponema*, *Borrelia*, dan *Leptospira*. *Treponema pallidum*, patogen (penyebab penyakit) yang terkenal karena menyebabkan sifilis, adalah contoh klasik dari spiroset yang telah banyak dipelajari dalam konteks medis. Sementara itu, *Borrelia burgdorferi* adalah agen etiologi (penyebab) dari Lyme disease, dan *Leptospira* spp. bertanggung jawab atas leptospirosis.

Kajian mendalam pada bakteri spiroset menawarkan peluang penting dalam pengembangan antibiotik dan terapi yang lebih spesifik, sekaligus memberi pemahaman baru dalam mekanisme patogenesis mereka. Penelitian genetik dan proteomik (studi tentang semua protein yang diekspresikan oleh suatu organisme) pada bakteri ini dapat membantu dalam identifikasi target obat potensial untuk intervensi medis. Karena karakteristik morfologi yang unik dan kompleksitas perilaku yang ditunjukkan oleh spiroset, mereka juga memberikan wawasan ke dalam adaptasi evolusioner mikroorganisme pada umumnya.

Spiroset, dengan bentuk heliks atau spiral yang khas, memang menjadi fokus utama dalam penelitian mikrobiologi dan patologi. Grup bakteri ini, yang mencakup patogen penting seperti *Treponema pallidum* (penyebab sifilis) dan *Borrelia burgdorferi* (penyebab penyakit Lyme), menantang komunitas ilmiah untuk mengembangkan metode terapi yang lebih canggih dan terfokus untuk melawan infeksi yang mereka sebabkan.

Dengan kemajuan teknologi sekuensing dan analisis bioinformatika, kemungkinan untuk menguraikan genom spiroset dan memetakan ekspresi proteom mereka telah meningkat secara signifikan. Pemahaman mendalam tentang kode genetik dan repertoar proteomik spiroset

dapat mengungkap rahasia adaptasi mereka yang memungkinkan kelangsungan hidup dalam lingkungan inang yang sering kali tidak ramah. Ini termasuk mekanisme untuk menghindari sistem imun inang, seperti mengubah protein permukaan sel mereka untuk menghindari deteksi atau meniru komponen inang untuk 'menyamar' dalam sistem biologis inang.

Kemampuan unik spiroset untuk berpindah antar sel inang dengan lincah, seringkali dengan menggunakan flagela internal yang memberi mereka motilitas di dalam medium yang kental, adalah area penelitian yang potensial untuk mengembangkan strategi antimikroba baru. Menghambat mekanisme motilitas ini dapat mengurangi kemampuan spiroset untuk menyebarkan infeksi atau meningkatkan efektivitas respons imun inang.

Selain itu, spiroset telah menunjukkan kemampuan luar biasa untuk bertahan hidup dalam keadaan berdiam diri atau latent dalam jangka waktu yang lama, sering kali menyebabkan infeksi kronis. Menguraikan mekanisme dormansi ini bisa membuka jalan untuk mengembangkan obat-obatan yang mampu membunuh bakteri ini saat berada dalam keadaan tidak aktif, atau mencegah transisi ke fase dorman.

Pada akhirnya, penelitian lebih lanjut tentang spiroset tidak hanya akan memberikan manfaat dalam konteks kesehatan manusia tetapi juga akan memperkaya pengetahuan kita tentang ekologi mikrob dan interaksi mereka dengan spesies lain. Dapat juga membantu dalam memahami dinamika penyakit zoonosis, yang merupakan penyakit yang ditularkan dari hewan ke manusia, mengingat bahwa banyak spiroset adalah parasit pada berbagai hewan.

Dengan memperdalam kajian pada spiroset, kita dapat mengantisipasi kemunculan pendekatan baru dalam pengobatan penyakit infeksi dan mungkin menemukan strategi inovatif untuk mengendalikan penyebaran penyakit yang disebabkan oleh patogen ini. Penelitian ini, yang terintegrasi dan komprehensif, akan terus menjadi komponen penting dari ilmu kedokteran modern, menyatukan perspektif genetik, molekuler, dan ekologis untuk melawan penyakit dan meningkatkan kesehatan umat manusia.

5. Bakteri Filamen (Filamentous Bacteria)

Bakteri filamen merupakan organisme yang tumbuh dalam bentuk benang atau filamen. Struktur ini memungkinkan mereka untuk memperoleh keuntungan dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk peningkatan kapasitas untuk menyerap nutrisi dari media yang lebih encer dan melindungi diri dari predator mikroskopis. Dalam sistem pengolahan limbah, misalnya, bakteri filamen seperti *Actinomyces* sangat penting karena kemampuannya untuk menguraikan zat organik kompleks menjadi komponen yang lebih sederhana yang kemudian dapat diambil oleh organisme lain dalam siklus biogeokimia.

Secara ekologis, keberadaan bakteri filamen di alam terbukti vital dalam membentuk simbiosis dengan tumbuhan, seperti dalam pembentukan mikoriza yang memperkaya tanah dengan nutrisi dan meningkatkan pertumbuhan tanaman. Penelitian terhadap bakteri filamen juga mengarah pada pengembangan teknologi bioremediasi, dimana kemampuan unik mereka dalam menangani polutan dapat digunakan untuk membersihkan lingkungan yang tercemar.

Bakteri filamen, yang menunjukkan morfologi berupa rangkaian sel yang terhubung seperti benang, memegang peranan signifikan dalam keseimbangan ekosistem dan telah menjadi subjek utama dalam berbagai bidang penelitian lingkungan dan bioteknologi. Keberadaan bakteri ini dalam sistem perakaran tanaman memfasilitasi proses biokonversi nutrisi, yang mana mereka mengubah unsur-unsur tidak larut menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi dan berkontribusi pada pertumbuhan vegetatif yang lebih kuat.

Dalam konteks bioremediasi, kemampuan bakteri filamen untuk mengkolonisasi dan memperkaya struktur tanah menunjukkan potensi mereka dalam dekontaminasi tanah yang terpolusi oleh logam berat, hidrokarbon, dan senyawa organik persisten. Bakteri ini, melalui proses metabolisme spesifik, mampu mendetoksifikasi atau mengubah polutan menjadi senyawa yang lebih kurang berbahaya. Hal ini tidak hanya membantu dalam pemulihan habitat yang terdegradasi tetapi juga dalam peningkatan kualitas tanah untuk pertanian berkelanjutan dan rehabilitasi lahan.

Perkembangan teknologi rekayasa genetika dan sintesis biologi memberikan kemungkinan untuk mengoptimalkan kapasitas bakteri filamen dalam bioremediasi. Melalui modifikasi genetik, kita bisa meningkatkan kemampuan mereka untuk menoleransi konsentrasi polutan yang lebih tinggi, meningkatkan efisiensi metabolisme mereka, atau bahkan menciptakan jalur metabolik baru yang tidak ada secara alami. Teknologi semacam ini dapat menghasilkan galur bakteri yang dapat digunakan untuk membersihkan limbah industri secara lebih efektif atau untuk menciptakan sistem perawatan limbah yang lebih berkelanjutan.

Selain aplikasi lingkungan, penelitian bakteri filamen juga memberikan kontribusi pada industri fermentasi. Dengan kemampuan mereka untuk memproduksi enzim dan metabolit sekunder, mereka diintegrasikan dalam proses produksi antibiotik, asam amino, dan vitamin. Kecakapan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi industri tetapi juga mengurangi biaya dan dampak lingkungan yang terkait dengan proses sintetik.

Memahami ekologi mikroba dan interaksi antara bakteri filamen dengan lingkungan mereka menjadi aspek kunci dalam mengembangkan strategi yang lebih baik untuk pelestarian lingkungan. Dengan penelitian terus menerus dan penerapan ilmu pengetahuan yang berkelanjutan, potensi bakteri filamen dapat diharapkan menjadi solusi masa depan untuk sejumlah tantangan lingkungan global dan meningkatkan kualitas hidup manusia.

6. Bakteri lainnya

Di luar kategori utama ini, terdapat berbagai bentuk bakteri lain yang memiliki struktur unik yang memengaruhi interaksi mereka dengan lingkungan. Misalnya, bakteri berbentuk bintang dan bakteri berbentuk persegi mengindikasikan keanekaragaman taksonomi yang jauh lebih besar daripada yang diperkirakan sebelumnya. Penelitian terkini dalam mikrobiologi menggali lebih dalam bagaimana bentuk-bentuk ini berkembang dan apa arti mereka bagi kehidupan bakteri itu sendiri.

Bakteri juga dapat memiliki variasi struktural lain, seperti keberadaan flagela (untuk pergerakan), pili (untuk melekat pada permukaan atau pertukaran genetik), dan kapsul (lapisan pelindung ekstraselular). Struktur ini tidak hanya membantu dalam identifikasi dan klasifikasi bakteri

tetapi juga berperan penting dalam mekanisme patogenisitas dan interaksi lingkungan.

Dalam konteks futuristik, penemuan bentuk bakteri baru dan pemahaman lebih dalam mengenai hubungan antara morfologi dan fungsi bakteri terus berkembang dengan bantuan teknologi canggih seperti mikroskop krioelektron dan analisis citometri alir tiga dimensi. Ini memungkinkan para ilmuwan untuk melihat bakteri dalam resolusi yang belum pernah terjadi sebelumnya, serta menggabungkan data struktural dengan informasi genetik dan proteomik untuk klasifikasi yang lebih terperinci dan akurat. Ke depannya, penggunaan kecerdasan buatan dalam analisis morfologi bakteri dapat memungkinkan pengenalan pola dan klasifikasi otomatis, yang akan membawa kita ke era baru pemahaman mikrobial.

2.3.2 Klasifikasi Berdasarkan Fungsi dan Peran

1. Bakteri Patogen (Penyebab Penyakit)

Bakteri patogen merupakan agen mikrobiologis yang berkaitan dengan penyakit pada inangnya. Mereka memiliki kemampuan untuk menyerang organisme hidup dan mengganggu sistem biologisnya, menghasilkan manifestasi penyakit yang terkadang mematikan. Sebagai contoh, bakteri genus *Mycobacterium* bertanggung jawab atas penyakit seperti tuberkulosis. Penelitian terkini mengarah pada pengembangan teknologi genomik dan proteomik untuk memahami mekanisme patogenitas bakteri secara lebih detail, yang pada gilirannya dapat membuka jalan bagi terapi yang lebih tepat sasaran dan individualistik.

a. Pengertian dan Mekanisme Patogenitas Bakteri

Bakteri patogen, yang dikenal sebagai agen etiologi penyakit, merupakan mikroorganisme yang mengakibatkan gangguan pada proses fisiologis inang. Mereka memiliki strategi khusus untuk menembus

pertahanan inang, seperti menghasilkan toksin atau enzim yang merusak jaringan dan menghindari respon imun. Mekanisme ini memungkinkan bakteri untuk kolonisasi, invasi, dan akhirnya menimbulkan patologi dalam inang. Kemampuan adaptasi mereka terhadap lingkungan inang sangatlah penting dalam proses patogenesis dan ini terus menjadi fokus penelitian ilmiah.

b. Aplikasi Teknologi Genomik dan Proteomik dalam Studi Bakteri Patogen

Perkembangan bioteknologi, khususnya teknologi genomik dan proteomik, telah mengubah cara kita memahami interaksi antara bakteri patogen dan inang. Genomik melibatkan analisis DNA bakteri untuk mengidentifikasi gen-gen yang bertanggung jawab atas virulensi dan resistensi antibiotik. Sementara itu, proteomik mengeksplorasi ekspresi protein yang dihasilkan oleh bakteri, yang berperan dalam proses infeksi dan imunitas. Pendekatan integratif kedua teknologi ini menjanjikan pemetaan yang lebih komprehensif terhadap strategi yang digunakan bakteri untuk menginfeksi dan bertahan dari sistem kekebalan tubuh.

c. Inovasi Terapi Berbasis Penelitian Bakteri Patogen

Dengan pemahaman yang diperdalam melalui teknologi genomik dan proteomik, kita dapat mengembangkan terapi yang lebih spesifik. Misalnya, penggunaan antibiotik yang ditargetkan berdasarkan profil genetik bakteri tertentu dapat mengurangi fenomena resistensi antibiotik. Terapi individualistik juga menjadi mungkin dengan adanya teknologi CRISPR-Cas9, yang berpotensi untuk memodifikasi atau menghambat ekspresi gen-gen tertentu yang terlibat dalam patogenitas bakteri.

d. Masa Depan Penelitian Bakteri Patogen dan Pengaruhnya pada Kesehatan Masyarakat

Penelitian yang berorientasi ke depan pada bakteri patogen tidak hanya mengarah pada pengembangan terapi, tetapi juga pada pembuatan vaksin yang lebih efektif. Selain itu, dengan memanfaatkan big data dan kecerdasan buatan, kita dapat meramalkan munculnya strain bakteri patogen yang baru serta mendeteksi pola penyebaran penyakit secara global. Dengan demikian, kita dapat mempersiapkan strategi pencegahan yang lebih baik dan respons yang lebih cepat dalam menghadapi wabah penyakit.

Bakteri patogen terus menjadi tantangan besar dalam bidang medis dan kesehatan masyarakat. Namun, dengan pendekatan yang semakin komprehensif, detail, dan integratif, serta memanfaatkan teknologi canggih, kita memiliki peluang lebih besar untuk mengatasi penyakit yang disebabkan oleh mikroorganisme ini. Masa depan penelitian dalam bidang ini sangat penting untuk mewujudkan terapi yang lebih efisien dan individualistik, serta untuk memperkuat sistem kesehatan dalam menghadapi penyakit infeksi.

2. Bakteri Simbiotik (Bersifat Mutual dengan Organisme Lain)

Bakteri simbiotik menggambarkan sebuah harmonisasi kehidupan mikrobiologis dengan inangnya, dimana kedua belah pihak memperoleh keuntungan. *Rhizobium*, yang berkolaborasi dengan tanaman leguminosa untuk mengkonversi nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang bisa diserap tanaman, merupakan salah satu contoh fenomenal. Penelitian masa depan diharapkan dapat meningkatkan efisiensi proses simbiosis

ini untuk mendukung produksi tanaman secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kehadiran bakteri simbiotik dalam dunia biologi kontemporer bukan sekadar fenomena, melainkan suatu aspek krusial yang merentang luas dalam kancah interaksi biotik. Pada tataran molekuler, bakteri seperti *Rhizobium* memegang peranan penting dalam proses fiksasi nitrogen (konversi nitrogen atmosferik menjadi senyawa amonia yang dapat digunakan oleh tumbuhan). Interaksi simbiotik ini mengandung potensi yang monumental dalam mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada pupuk anorganik yang kerap menimbulkan implikasi negatif bagi ekosistem.

Simbiosis antara *Rhizobium* dan tanaman leguminosa terjadi melalui suatu proses kompleks, di mana bakteri menginfiltrasi akar tanaman dan menginduksi pembentukan nodul (pembengkakan pada akar yang menjadi lokus aktivitas bakteri). Dalam nodul tersebut, *Rhizobium* mengubah nitrogen bebas (N_2) yang tak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tanaman menjadi senyawa yang kaya akan nitrogen, seperti amonia (NH_3), melalui serangkaian reaksi biokimia yang kompleks. Tanaman, di sisi lain, menyediakan karbohidrat dan lingkungan protektif bagi bakteri untuk berkembang. Kolaborasi ini menghasilkan simbiosis mutualistik (hubungan saling menguntungkan) yang mereduksi kebutuhan akan input nitrogen sintesis, yang seringkali berasal dari proses industri yang energi-intensif dan berpotensi merusak lingkungan.

Penelitian masa depan terarah pada peningkatan efisiensi dari simbiosis ini. Mengingat tantangan perubahan iklim dan kebutuhan akan pertanian yang lebih berkelanjutan, peneliti mencari metode untuk

mengoptimalkan interaksi antara bakteri dan tanaman inangnya. Hal ini melibatkan pemahaman yang lebih dalam tentang genetika, fisiologi, dan ekologi dari bakteri simbiotik serta tanaman inang. Sebagai contoh, pemetaan genetik pada *Rhizobium* dapat mengungkapkan gen-gen kunci yang berperan dalam proses fiksasi nitrogen. Melalui teknik rekayasa genetika, kita bisa meningkatkan atau memodifikasi ekspresi gen-gen tersebut untuk meningkatkan kapasitas fiksasi nitrogen.

Tak hanya itu, pendekatan futuristik lainnya meliputi penggunaan teknologi nano untuk merancang vektor yang efisien dalam mengantarkan bakteri ke akar tanaman. Nanoteknologi dapat menyediakan metode untuk melindungi bakteri selama proses infiltrasi ke dalam akar dan membantu pembentukan nodul yang lebih efektif. Pendekatan integratif yang melibatkan bioinformatika, bioteknologi, dan ekologi sistem juga menjanjikan dalam mendesain pola tanam yang mendukung interaksi simbiotik optimal.

Dengan mengintegrasikan pengetahuan dari berbagai disiplin ilmu, kita dapat menciptakan sebuah sistem pertanian yang tidak hanya menjamin kecukupan produksi tanaman tetapi juga menjaga keseimbangan ekologis. Hal ini berpotensi memainkan peran kunci dalam mengatasi masalah kelaparan global dan memperkuat ketahanan pangan, sekaligus mengurangi jejak karbon dari sektor pertanian. Pada akhirnya, penelitian dan pengembangan terhadap bakteri simbiotik ini mungkin akan menjadi tonggak sejarah baru dalam peradaban manusia, di mana kita tidak hanya menjadi pengambil dari alam, melainkan juga sebagai pelindung yang memastikan kelangsungan hidup planet ini untuk generasi yang akan datang.

3. Bakteri Pengurai (Dekomposer)

Kelompok bakteri ini memiliki tugas esensial dalam siklus materi di ekosistem dengan memecah sisa-sisa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Bakteri seperti spesies dalam genus *Pseudomonas* berperan vital dalam recycling nutrisi, dan membantu dalam menjaga keseimbangan ekologis. Dalam konteks futuristik, potensi bakteri pengurai dalam mengolah limbah menjadi sumber daya yang berharga adalah fokus utama penelitian lingkungan dan keberlanjutan.

Bakteri pengurai, yang juga dikenal sebagai dekomposer, bertindak sebagai agen vital dalam siklus nutrisi, memainkan peran sentral dalam mengembalikan elemen ke tanah dengan cara menguraikan materi organik yang telah mati atau merupakan limbah. Spesies dalam genus *Pseudomonas*, misalnya, memiliki kemampuan enzimatis (kemampuan untuk menghasilkan enzim) yang kompleks untuk memecah berbagai polutan organik menjadi komponen yang lebih kecil, yang kemudian dapat dimanfaatkan kembali oleh organisme lain dalam ekosistem. Fungsi ini tidak hanya mengurangi volume limbah di lingkungan tapi juga memfasilitasi regenerasi kesuburan tanah dan produksi biomassa.

Dalam konteks keberlanjutan dan masa depan, peran bakteri pengurai mendapat sorotan khusus seiring dengan peningkatan volume limbah yang dihasilkan oleh aktivitas manusia. Meningkatnya akumulasi limbah organik dari industri pertanian dan rumah tangga, jika tidak dikelola dengan tepat, dapat mengakibatkan penurunan kualitas ekosistem dan berpotensi menimbulkan kerusakan lingkungan yang luas. Di sini, bakteri pengurai menawarkan solusi biologis yang inovatif untuk pengolahan limbah, mengubahnya menjadi produk yang berguna seperti biogas,

yang merupakan sumber energi terbarukan, atau kompos, yang menyediakan nutrisi bagi tanaman.

Penelitian di bidang ini mengeksplorasi penggunaan rekayasa genetika untuk memperkuat kapasitas alami bakteri pengurai. Teknik ini melibatkan modifikasi genetik bakteri untuk meningkatkan efisiensi mereka dalam menguraikan komponen limbah yang spesifik atau yang sulit diurai. Selain itu, pendekatan bioremediasi, yaitu penggunaan organisme hidup untuk memulihkan lingkungan yang telah terkontaminasi, telah menjadi bidang penelitian yang menjanjikan. Menggunakan bakteri pengurai yang telah dioptimalkan untuk mengeliminasi kontaminan tertentu dari tanah dan air dapat mengurangi ketergantungan pada metode kimia yang sering kali mahal dan dapat menyebabkan dampak negatif lainnya.

Integrasi teknologi informasi dan biologi molekuler membuka peluang bagi pemantauan dan kontrol yang lebih baik terhadap proses dekomposisi. Sistem penginderaan pintar berbasis IoT (Internet of Things) bisa dikembangkan untuk memantau kondisi lingkungan dan aktivitas mikrobiologis secara real-time, memungkinkan penyesuaian proses penguraian sesuai kebutuhan spesifik limbah. Pendekatan holistik ini, yang menggabungkan ilmu komputer dan mikrobiologi, dapat mengoptimalkan pengolahan limbah menjadi proses yang lebih efektif dan efisien.

Dari perspektif sosioekonomi, teknologi pengolahan limbah yang memanfaatkan bakteri pengurai dapat mengurangi biaya operasional pengolahan limbah dan, pada saat yang sama, menciptakan sumber daya berharga yang mendukung ekonomi sirkular. Ini berarti bahwa produk dan bahan yang dihasilkan dari proses dekomposisi

dapat kembali digunakan dalam siklus ekonomi, mengurangi pemborosan dan mendukung keberlanjutan.

Bakteri pengurai tidak hanya merupakan entitas biologis yang menopang ekosistem, tetapi juga pilar penting dalam desain sistem pengolahan limbah yang berkelanjutan dan efisien di masa depan. Penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini dapat menyediakan solusi yang kreatif dan inovatif untuk masalah global seperti pengelolaan limbah, keamanan pangan, dan perubahan iklim, sembari mendukung pemulihan dan pemeliharaan kesehatan lingkungan global.

4. Bakteri Fiksasi Nitrogen

Spesies bakteri ini berperan dalam mengubah nitrogen gas yang tidak reaktif di atmosfer menjadi bentuk amonia, yang merupakan nutrisi esensial bagi kebanyakan organisme. Studi genetika terbaru terhadap bakteri fiksasi nitrogen seperti *Azotobacter* dan *Clostridium* menjanjikan optimisasi proses fiksasi nitrogen, yang berpotensi mengurangi ketergantungan pada pupuk nitrogen sintetis.

Proses fiksasi nitrogen yang dilakukan oleh bakteri seperti *Azotobacter* dan *Clostridium* merupakan salah satu mekanisme alamiah paling penting yang menopang keberlangsungan ekosistem. Melalui konversi nitrogen atmosfer (N_2), yang memiliki dua atom nitrogen yang terikat sangat kuat dan tidak reaktif, menjadi amonia (NH_3), suatu senyawa yang memiliki atom nitrogen yang dapat dengan mudah diambil oleh tumbuhan, bakteri ini menyediakan blok bangunan dasar dari protein dan asam nukleat yang diperlukan oleh sebagian besar bentuk kehidupan.

Perkembangan terbaru dalam genetika mikroba membuka peluang untuk mengoptimalkan bakteri fiksasi nitrogen ini, sehingga mereka dapat bekerja lebih efisien

dibandingkan dengan cara kerja alami mereka saat ini. Hal ini dapat dicapai dengan mengidentifikasi dan kemudian memodifikasi gen-gen yang terlibat dalam proses fiksasi nitrogen, sehingga meningkatkan rasio konversi nitrogen gas menjadi amonia. Jika ini berhasil, dampaknya akan sangat signifikan: penurunan ketergantungan terhadap pupuk nitrogen sintetis yang sering kali mahal dan memiliki dampak negatif terhadap lingkungan karena proses pembuatannya yang menghasilkan emisi gas rumah kaca.

Pupuk sintetis, walaupun efektif dalam meningkatkan produktivitas pertanian, sering kali menyebabkan permasalahan lingkungan seperti eutrofikasi (peningkatan nutrisi dalam badan air yang menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan dan dapat merusak ekosistem air) dan penurunan kualitas tanah. Peningkatan keefektifan bakteri fiksasi nitrogen dapat mengurangi fenomena-fenomena negatif ini dengan menyediakan alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kemajuan dalam bidang bioteknologi, khususnya teknik rekayasa genetika seperti CRISPR-Cas9 (teknik molekuler yang digunakan untuk melakukan modifikasi genetik dengan presisi tinggi), dapat memungkinkan peningkatan ekspresi gen-gen yang terlibat dalam sintesis enzim nitrogenase, yang bertanggung jawab atas proses fiksasi nitrogen. Pengembangan bakteri yang direkayasa ini harus dipandu oleh pemahaman yang mendalam tentang regulasi genetik dan metabolisme bakteri agar dapat menciptakan strain yang tidak hanya efisien dalam fiksasi nitrogen tetapi juga mampu bertahan hidup dan berkompetisi di lingkungan tanah yang kompleks.

Selain itu, integrasi bakteri fiksasi nitrogen yang telah dioptimalkan ke dalam sistem pertanian dapat dilakukan melalui inokulasi benih (penambahan bakteri ke benih

sebelum tanam) atau melalui aplikasi langsung ke tanah. Pemanfaatan teknologi informasi untuk memonitor kondisi tanah dan kebutuhan tanaman secara real-time juga akan memainkan peran penting dalam memastikan bahwa bakteri ini dapat bekerja secara sinergis dengan kondisi lingkungan yang ada.

Pendekatan futuristik ini tidak hanya akan membantu dalam mengurangi jejak lingkungan dari pertanian konvensional tetapi juga berpotensi meningkatkan ketahanan pangan dengan menjamin ketersediaan nitrogen yang cukup untuk pertumbuhan tanaman. Lebih jauh, ini juga dapat mendorong penciptaan ekonomi sirkular dalam pertanian, di mana limbah satu proses dapat menjadi input untuk proses lainnya, mengurangi pemborosan dan meningkatkan keefisienan penggunaan sumber daya. Pendekatan holistik ini membutuhkan kolaborasi multidisiplin yang mencakup biologi molekuler, ekologi, teknologi informasi, dan ilmu tanah, yang bersama-sama akan menentukan masa depan pertanian yang berkelanjutan.

5. Bakteri Fotosintetik

Mirip dengan tumbuhan, bakteri fotosintetik, termasuk kelompok Cyanobacteria, memiliki kemampuan untuk mengubah energi matahari menjadi energi kimia. Kajian terhadap bakteri fotosintetik dapat memberikan wawasan baru dalam pengembangan sumber energi terbarukan dan berkelanjutan.

Bakteri fotosintetik, seperti yang ditemukan dalam kelompok Cyanobacteria, berperan penting dalam ekosistem dunia karena mereka melakukan proses fotosintesis proses konversi cahaya matahari menjadi energi kimia dengan menghasilkan glukosa (gula sederhana) dan melepaskan oksigen sebagai produk

sampingan. Proses biologis ini mirip dengan yang terjadi pada tumbuhan hijau, dengan perbedaan utama terletak pada pigmen yang digunakan dan beberapa rincian mekanistik. Dalam bakteri fotosintetik, pigmen seperti fikobiliprotein (pigmen yang membantu dalam penangkapan cahaya) dan klorofil berperan vital dalam penyerapan cahaya.

Dari perspektif futuristik, eksplorasi lebih lanjut terhadap bakteri fotosintetik berpotensi untuk mendefinisikan paradigma energi terbarukan. Dengan memahami dan memanipulasi jalur fotosintesis mereka, ilmuwan dapat mengembangkan sistem yang meniru atau bahkan melampaui efisiensi fotosintesis alami untuk produksi bahan bakar bio atau bahan kimia yang penting lainnya. Hal ini menjadi sangat relevan di tengah meningkatnya permintaan akan energi bersih dan berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil, yang menyumbang emisi karbon dioksida (CO₂) penyebab perubahan iklim.

Dengan kemajuan teknologi sintesis biologi, yang melibatkan rekayasa genom bakteri untuk menambah atau mengubah jalur metabolisme mereka, kita bisa menciptakan varian Cyanobacteria yang mampu menghasilkan bahan bakar seperti etanol atau hidrogen dengan efisiensi yang jauh lebih tinggi. Selain itu, teknologi biofotovoltaik, yang memanfaatkan kemampuan bakteri fotosintetik untuk menghasilkan arus listrik secara langsung dari cahaya, menawarkan kemungkinan untuk pengembangan sel surya biologis yang lebih murah dan lebih ramah lingkungan daripada opsi berbasis silikon saat ini.

Pemahaman mendalam tentang mekanisme fotosintesis pada tingkat molekuler dan fisiologi bakteri ini akan sangat mendukung upaya rekayasa genetika. Melalui

penelitian interdisipliner yang menggabungkan biologi molekuler, fisika, dan teknik kimia, dapat dikembangkan sistem yang mampu memaksimalkan penggunaan spektrum cahaya yang tersedia dan meningkatkan aliran elektron untuk memproduksi energi.

Prospek mengintegrasikan bakteri fotosintetik yang dimodifikasi ini ke dalam sistem energi masa depan mungkin melibatkan konsep-konsep seperti bioreaktor yang dirancang khusus, yang dapat mengatur kondisi seperti cahaya, suhu, dan nutrisi untuk memaksimalkan produksi bahan bakar bio. Selanjutnya, memadukan teknologi semacam ini dengan infrastruktur cerdas yang dapat menyesuaikan dengan permintaan energi secara real-time dapat membentuk fondasi bagi grid energi yang dinamis dan berkelanjutan.

Penerapan teknologi ini tidak hanya akan membatasi emisi gas rumah kaca, tetapi juga dapat mendukung ekonomi sirkular dengan memanfaatkan CO₂ yang dihasilkan oleh industri dan aktivitas manusia sebagai salah satu sumber nutrisi untuk bakteri fotosintetik. Pendekatan terpadu dan holistik seperti ini, yang menggabungkan inovasi dalam bioteknologi dengan strategi keberlanjutan, dapat secara signifikan mengubah lanskap energi global dan memainkan peran krusial dalam memerangi perubahan iklim.

6. Bakteri Fermentatif

Bakteri fermentatif seperti *Lactobacillus* berperan dalam proses pembuatan produk makanan fermentasi, seperti yogurt dan kimchi, yang memiliki manfaat probiotik. Pemanfaatan bakteri fermentatif ini juga meluas ke produksi bahan bakar bio seperti etanol, dimana penelitian mendatang dapat meningkatkan efisiensi fermentasi pada skala industri.

Bakteri fermentatif, yang terwakili oleh genus *Lactobacillus*, adalah agen biologis yang berperan penting dalam fermentasi, suatu proses metabolik di mana zat organik dipecah secara anaerob (tanpa oksigen) menjadi alkohol, asam, gas, atau tipe energi lainnya. Dalam konteks industri pangan, *Lactobacillus* bertanggung jawab atas transformasi produk susu menjadi yogurt, di mana laktosa (gula dalam susu) diubah menjadi asam laktat, memberikan tekstur dan rasa yang khas, sekaligus menciptakan lingkungan yang kurang ramah bagi mikroorganisme patogen (penyebab penyakit). Keberadaan produk fermentasi ini di pasaran bukan hanya memenuhi kebutuhan konsumsi yang menyenangkan secara sensorik, tetapi juga memberikan manfaat probiotik, yaitu meningkatkan jumlah bakteri baik dalam mikrobioma usus, yang terkait dengan sejumlah manfaat kesehatan, termasuk peningkatan fungsi imun dan pencernaan yang lebih baik.

Meluasnya aplikasi bakteri fermentatif ke sektor energi, khususnya dalam produksi bahan bakar bio, menjadi fokus riset terkini. Fermentasi etanol, misalnya, merupakan proses biokimia di mana glukosa dari sumber karbohidrat seperti jagung atau tebu diubah menjadi etanol dan CO₂ oleh bakteri fermentatif. Etanol yang dihasilkan menjadi bahan bakar bio yang dapat digunakan sebagai pengganti atau tambahan untuk bensin dalam mesin pembakaran internal. Mengingat tantangan lingkungan yang kita hadapi, peningkatan efisiensi fermentasi bakteri pada skala industri tidak hanya menjadi agenda penting untuk ketahanan energi, tetapi juga untuk mitigasi perubahan iklim.

Penelitian mendatang diharapkan dapat menggali lebih dalam tentang optimasi kondisi fermentasi, termasuk pengaturan pH, suhu, dan konsentrasi nutrisi, serta

rekayasa genetika bakteri untuk meningkatkan laju produksi dan ketahanan terhadap by-product yang biasanya menghambat fermentasi. Penerapan metagenomik (analisis materi genetik yang diambil dari lingkungan) dan bioinformatika dalam studi ini memungkinkan pemahaman komprehensif tentang interaksi kompleks dalam mikrobioma yang terlibat dalam fermentasi, sehingga memfasilitasi perancangan strategi yang lebih target untuk meningkatkan proses ini.

Dalam skala yang lebih luas, pengintegrasian bakteri fermentatif ke dalam sistem bioreaktor yang lebih efisien dapat mengubah sisa pertanian dan limbah organik lainnya menjadi sumber energi terbarukan, mengurangi limbah dan menutup siklus produksi secara berkelanjutan. Kemajuan ini, ketika diintegrasikan dengan teknologi seperti biorefinery (fasilitas yang mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar dan kimia), dapat menandai era baru dalam produksi energi yang lebih bersih dan lingkungan yang lebih sehat.

Pemanfaatan bakteri fermentatif yang inovatif ini, yang memanfaatkan kemampuan alami mereka dalam aplikasi teknologi yang canggih, menjanjikan pergeseran paradigma dalam industri pangan dan energi, dengan konsekuensi positif yang signifikan bagi kesehatan manusia, keberlanjutan lingkungan, dan ekonomi global. Penelitian yang berkelanjutan dan kolaboratif antara ahli mikrobiologi, bioteknologi, dan rekayasa lingkungan, disertai dengan dukungan dari kebijakan yang berwawasan ke depan, akan menjadi kunci dalam mewujudkan potensi penuh bakteri fermentatif untuk masa depan yang lebih berkelanjutan.

7. Bakteri Kemoautotrof

Ini adalah bakteri yang memperoleh energi dengan mengoksidasi senyawa anorganik. Proses ini tidak hanya penting dalam siklus biogeokimia tetapi juga dalam penciptaan habitat yang bisa didiami oleh mikroorganisme lain. Inovasi terbaru dalam bidang ini termasuk penggunaan bakteri kemoautotrof untuk penambangan biologi, menghasilkan logam dari mineral dengan dampak lingkungan yang lebih rendah.

Bakteri kemoautotrof, yang memanfaatkan proses kimia untuk mendapatkan energi dan membangun biomassa mereka dari karbon dioksida (CO_2), adalah entitas biologis yang luar biasa dalam kerangka kerja ekosistem planet kita. Melalui oksidasi senyawa anorganik seperti besi (Fe), belerang (S), atau nitrogen (N), bakteri ini tidak hanya melanjutkan siklus-siklus biogeokimia yang mendukung kehidupan di bumi, tetapi juga menghasilkan energi yang memungkinkan mereka untuk bertahan di lingkungan yang ekstrem, tempat bentuk kehidupan lain mungkin tidak mampu bertahan.

Salah satu aplikasi yang paling menjanjikan dari bakteri kemoautotrof adalah dalam bidang biomineralisasi - sebuah proses di mana mikroorganisme dapat mengendapkan atau melarutkan mineral. Inovasi ini memiliki potensi untuk merevolusi industri penambangan dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip biologi ke dalam ekstraksi logam. Teknik ini, sering disebut 'penambangan biologis' atau 'biomining', menggunakan kemampuan bakteri untuk melarutkan mineral dan memisahkan logam dari bijih, yang dapat menyebabkan penurunan yang signifikan dalam dampak lingkungan yang dihasilkan oleh proses penambangan tradisional.

Konsep biomining ini juga menginspirasi eksplorasi aplikasi teknologi yang lebih futuristik, seperti penggunaan bakteri kemoautotrof dalam remediasi lingkungan. Ini bisa melibatkan penggunaan mikroorganisme ini untuk membersihkan situs yang terkontaminasi oleh logam berat, mengubah mereka menjadi bentuk yang lebih stabil dan kurang berbahaya. Penelitian terkini menunjukkan bahwa bakteri ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengkonversi CO₂, gas rumah kaca utama, menjadi biomassa atau bahan bakar yang dapat digunakan, dengan cara mengintegrasikan proses biologis mereka ke dalam sistem yang dirancang untuk menangkap dan mengkonversi gas ini.

Tantangan utama yang dihadapi dalam menerapkan teknologi ini adalah skala dan efisiensi. Untuk biomining, skala operasional yang diperlukan untuk membuatnya ekonomis dapat sangat besar, dan prosesnya sering kali lebih lambat daripada metode penambangan konvensional. Namun, kemajuan dalam rekayasa genetika dan bioreaktor (wadah yang digunakan untuk melakukan reaksi biokimia) berpotensi meningkatkan kecepatan dan efisiensi proses ini. Terlebih lagi, pemahaman yang lebih mendalam tentang genetika dan biokimia dari bakteri kemoautotrof, diperoleh melalui teknik-teknik seperti sekuen genom (penentuan urutan DNA) dan proteomik (analisis keseluruhan protein yang diekspresikan oleh suatu organisme), dapat membuka pintu untuk optimisasi lebih lanjut dari potensi mereka.

Dengan memperhatikan semua faktor ini, dapat dipahami bahwa bakteri kemoautotrof memiliki peranan strategis dalam masa depan keberlanjutan lingkungan dan teknologi penambangan. Kemajuan dalam rekayasa mikroba dan bioteknologi dapat membantu kita memanfaatkan bakteri ini secara lebih efisien, dengan potensi untuk mengurangi dampak ekologis dari aktivitas

manusia dan membantu menciptakan siklus produksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

8. Bakteri Ekstremofil

Ekstremofil adalah bakteri yang bertahan hidup di kondisi ekstrem, seperti suhu tinggi, keasaman, atau tekanan yang tinggi. Penelitian mengenai ekstremofil tidak hanya memperluas pemahaman kita tentang keanekaragaman kehidupan di Bumi, tetapi juga memiliki aplikasi potensial dalam bioteknologi dan astrobiologi. Bakteri ekstremofil mampu bertahan hidup di lingkungan yang akan cepat membunuh sebagian besar bentuk kehidupan lainnya. Sebagai contoh, beberapa ekstremofil, dikenal sebagai termofil, tumbuh paling baik pada suhu yang sangat tinggi, sering kali di atas 45°C. Yang lain, yang disebut asidofil, berkembang dalam kondisi sangat asam yang mungkin merusak DNA dan protein pada mikroorganisme lain.

Dalam bioteknologi, enzim yang diekstrak dari ekstremofil sering kali disebut ekstremozim dapat digunakan dalam proses industri yang membutuhkan kondisi keras, seperti suhu tinggi atau pH ekstrem. Misalnya, taq polimerase, enzim yang digunakan dalam reaksi rantai polimerase (PCR), awalnya diisolasi dari *Thermus aquaticus*, termofil yang ditemukan di sumber air panas. Kemampuan enzim ini untuk bertahan pada suhu tinggi yang diperlukan untuk PCR telah merevolusi bidang genetika molekuler.

Selain itu, ekstremofil juga menjadi subjek penelitian dalam astrobiologi, ilmu yang mempelajari kemungkinan kehidupan di luar Bumi. Penemuan ekstremofil di lingkungan Bumi yang keras memberi petunjuk kepada para ilmuwan tentang jenis kehidupan yang mungkin ada di planet atau satelit lain di tata surya kita dan di luar.

Misalnya, penemuan mikroorganisme di danau bawah tanah Antartika yang gelap dan terisolasi membantu para ilmuwan memahami bagaimana kehidupan mungkin bertahan di bawah permukaan es Europa, salah satu bulan Jupiter.

Studi tentang ekstremofil juga berkontribusi pada pengembangan teknologi pembersihan lingkungan. Beberapa ekstremofil mampu mendetoksifikasi limbah berbahaya dan memetabolisme polutan. Ini menawarkan cara potensial untuk bioremediasi di lokasi yang terkontaminasi dengan kondisi yang biasanya menghambat aktivitas mikroba.

Riset tentang bakteri ekstremofil memberikan wawasan yang berharga tentang adaptasi biologis dan potensi kehidupan dalam ekstrem. Dengan memanfaatkan mekanisme kelangsungan hidup yang unik ini, kita dapat mengembangkan teknologi baru dan mencari tahu lebih banyak tentang kemungkinan kehidupan di alam semesta.

Memang benar, penelitian tentang ekstremofil telah membuka pintu ke aplikasi bioremediasi, dimana mikroorganisme ini digunakan untuk mengurai polutan dari lingkungan yang terkontaminasi. Ini bukanlah konsep yang sepenuhnya baru; namun, ekstremofil menawarkan keunggulan khusus karena mereka mampu bertahan dan berfungsi dalam kondisi yang sangat berat, di mana mikroorganisme biasa tidak dapat bertahan, apalagi bekerja secara efektif. Metabolisme khusus ekstremofil memungkinkan mereka untuk mengubah bahan berbahaya seperti logam berat dan zat kimia organik yang toksik menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau bahkan tidak berbahaya sama sekali.

Dari sudut pandang biologis, ekstremofil adalah contoh adaptasi evolusioner yang luar biasa. Studi tentang ekstremofil membuka wawasan baru mengenai fleksibilitas dan ketangguhan kehidupan. Mereka menunjukkan bahwa kehidupan dapat berkembang di bawah kumpulan tekanan selektif yang beragam, dari suhu ekstrem hingga kondisi asam atau basa yang intens. Kajian lebih lanjut tentang cara ekstremofil melakukan adaptasi pada tingkat molekuler—bagaimana mereka melindungi dan memperbaiki DNA mereka, bagaimana enzim mereka tetap stabil dan aktif—dapat menginspirasi desain sistem biologi sintetis dan perkembangan material baru yang memiliki kemampuan serupa untuk bertahan dalam kondisi ekstrem.

Tidak kalah pentingnya, ekstremofil yang mampu beroperasi pada kondisi yang ekstrem secara alami menarik bagi industri yang bekerja di bawah kondisi serupa. Proses-proses yang melibatkan suhu tinggi, tekanan tinggi, atau pH ekstrem dapat memanfaatkan ekstremozim dalam skala industri. Hal ini bisa membawa efisiensi dan keberlanjutan yang lebih besar dalam proses-produksi, seperti dalam pembuatan bahan kimia, pengolahan limbah, dan bahkan dalam pengeboran minyak dan gas.

Dari perspektif astrobiologi, ekstremofil memberikan model yang berharga bagi para ilmuwan untuk memahami dan mengeksplorasi kehidupan di lingkungan planet lain. Kehidupan di Bumi—terutama dalam bentuk ekstremofil—menunjukkan kepada kita bahwa batas-batas yang dulu dianggap sebagai pembatas bagi kehidupan mungkin tidak seketat yang diperkirakan. Kehadiran ekstremofil mempromosikan konsep bahwa kehidupan bisa berkembang dan bertahan dalam berbagai kondisi, membuka kemungkinan untuk keberadaan organisme hidup di planet lain yang memiliki kondisi ekstrem seperti di Bumi.

Penelitian terhadap ekstremofil tidak hanya memperluas pemahaman kita tentang kehidupan di Bumi tetapi juga melangkah lebih jauh dalam membantu kita mempersiapkan masa depan di mana kita mungkin berinteraksi atau bahkan menemukan bentuk kehidupan ekstraterestrial. Dengan memanfaatkan dan meniru kemampuan adaptasi yang ditunjukkan oleh ekstremofil, kita mungkin dapat mengembangkan teknologi yang lebih baik untuk melindungi kehidupan manusia di lingkungan yang keras, baik di Bumi maupun di luar angkasa. Pengetahuan ini, yang didasarkan pada biologi yang paling tangguh di planet kita, memberikan landasan bagi inovasi teknologi yang dapat mengubah cara kita hidup, bekerja, dan menjelajahi alam semesta.

9. Bakteri Bioremediasi: sang Penyelamat Lingkungan

a. Definisi Bioremediasi

Bioremediasi merupakan sebuah proses biologis yang memanfaatkan kapasitas intrinsik mikroorganisme, terutama bakteri, dalam menetralkan dan mengurai kontaminan di berbagai ekosistem. Proses ini menandai langkah revolusioner dalam upaya memulihkan lingkungan yang telah tercemar oleh aktivitas antropogenik. Bakteri, sebagai agen bioremediasi, memiliki mekanisme adaptif yang memungkinkan mereka untuk bertahan dan berkembang dalam lingkungan yang dipenuhi berbagai macam polutan, mulai dari hidrokarbon yang berasal dari tumpahan minyak, logam berat yang meracuni perairan, hingga residu bahan kimia industri yang terakumulasi dalam tanah.

b. Mekanisme Bioremediasi oleh Bakteri

Secara mekanistik, bakteri memainkan peran utama dalam proses bioremediasi melalui berbagai cara. Pertama, melalui degradasi, mereka menguraikan polutan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Proses ini seringkali melibatkan serangkaian reaksi enzimatik yang kompleks. Selanjutnya, melalui biokonversi, bakteri mengubah struktur kimia pencemar, mengurangi toksisitas dan kadang kala menghasilkan produk yang bermanfaat. Bioakumulasi terjadi ketika mikroorganisme mengumpulkan zat pencemar dalam sel-sel mereka, sedangkan detoksifikasi merujuk pada konversi racun menjadi senyawa yang tidak beracun atau kurang beracun, seringkali melalui reaksi redoks atau hidrolisis.

c. Jenis Bakteri dalam Bioremediasi

Terdapat beberapa jenis bakteri yang telah diidentifikasi sebagai agen bioremediasi yang efektif. *Pseudomonas* sp. dikenal akan keahliannya dalam mendegradasi hidrokarbon dan logam berat, menjadikannya sebagai pilihan utama dalam penanganan tumpahan minyak dan rehabilitasi lahan industri. *Bacillus* sp. adalah genus lain yang dikenal karena kemampuannya dalam mengurai polutan organik dan anorganik, mendukung proses sanitasi tanah dan pengolahan air limbah. *Deinococcus radiodurans*, disebut juga sebagai "*Conan the Bacterium*", memiliki ketahanan yang fenomenal terhadap radiasi dan potensial besar dalam menangani limbah radioaktif.

d. Aplikasi Bakteri Bioremediasi

Dalam penanganan tumpahan minyak, bakteri pengurai hidrokarbon telah berhasil mengurangi dampak lingkungan dari kecelakaan seperti tumpahan minyak. Mereka beroperasi dengan mengubah hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih ramah lingkungan. Untuk sanitasi tanah, teknologi ini mampu mengembalikan kesuburan dan kualitas tanah yang telah terkontaminasi. Dalam pengolahan air limbah, penggunaan bakteri spesifik membantu memurnikan air dari polutan industri dan domestik, menjadikan air tersebut aman untuk dialirkan kembali ke lingkungan.

e. Tantangan dan Inovasi dalam Bioremediasi

Meskipun potensinya besar, bioremediasi menghadapi tantangan, seperti adaptasi bakteri terhadap kondisi pencemaran yang ekstrem. Inovasi seperti rekayasa genetika membuka jalan untuk pengembangan strain bakteri dengan efisiensi lebih tinggi dan kemampuan degradasi yang lebih luas. Integrasi teknologi nano menjanjikan pendekatan yang lebih efektif dan selektif dalam bioremediasi, dengan nanopartikel yang dapat meningkatkan aktivitas dan stabilitas enzim bakteri.

f. Masa Depan Bioremediasi

Masa depan bioremediasi terlihat cerah dengan pemanfaatan kecerdasan buatan (AI) dalam pemodelan, pemantauan, dan optimisasi proses bioremediasi. Kemajuan dalam bioteknologi, dikombinasikan dengan kerjasama internasional dalam penanganan isu lingkungan, menjanjikan perluasan skala dan efektivitas teknologi bioremediasi. Kebijakan dan regulasi yang mendukung riset dan aplikasi inovasi dalam

bioteknologi bakteri akan memainkan peran kunci dalam memastikan bahwa bioremediasi dapat diadopsi secara luas sebagai solusi bagi permasalahan pencemaran global.

10. Bakteri Industri dan Bioteknologi

a. Peran Bakteri di Industri Bioteknologi

Bakteri, sebagai agen biologis mikroskopis, telah menunjukkan peranan vital dalam sektor industri bioteknologi. Keberadaan mereka tidak hanya esensial dalam sintesis produk biologis tetapi juga dalam mengubah wajah pengobatan modern, pertanian berkelanjutan, teknologi pangan, serta inovasi energi terbarukan. Dengan kemampuan adaptasi dan metabolisme yang tinggi, bakteri ini mampu memproduksi berbagai produk dengan efisiensi dan kecepatan yang signifikan, seringkali melampaui metode sintesis kimia konvensional.

b. Peranan Bakteri dalam Industri Farmasi

Dalam bidang farmasi, bakteri telah menjadi pionir produksi antibiotik, dengan *Penicillium chrysogenum* menjadi ikon dalam produksi penisilin, antibiotik pertama yang digunakan secara luas dan telah menyelamatkan jutaan nyawa. Kemampuan bakteri untuk diubah secara genetik telah memungkinkan mereka untuk menjadi vektor dalam pengembangan vaksin yang direkayasa genetika, menjanjikan respons imun yang lebih spesifik dan efisien dalam melawan penyakit.

c. Pengaruh Bakteri dalam Industri Pangan

Di sektor pangan, bakteri berperan sebagai agen fermentasi penting. Contohnya, *Lactobacillus* adalah kunci dalam produksi yogurt dan keju, mengubah

bahan dasar menjadi produk dengan nilai tambah nutrisi dan rasa. Bakteri juga digunakan sebagai sumber enzim biokatalis yang mengoptimalkan proses pengolahan makanan, meningkatkan tekstur, rasa, dan umur simpan.

d. Bakteri dan Pengembangan Industri Energi

Bakteri fermentatif memainkan peran penting dalam produksi biofuel, seperti bioetanol dan biogas, mengubah bahan organik menjadi sumber energi yang lebih berkelanjutan. Proses bioprosesing dengan bakteri memungkinkan konversi limbah menjadi energi, menawarkan solusi untuk pengelolaan limbah yang ramah lingkungan.

e. Inovasi dan Tantangan dalam Penerapan Bioteknologi Bakteri

Perkembangan teknologi seperti CRISPR-Cas9 telah revolusioner, memungkinkan modifikasi gen bakteri dengan presisi tinggi, membuka jalan untuk terapi gen yang lebih efektif dan pengembangan produk baru. Namun, ini juga membawa isu keamanan biologis dan tantangan resistensi antibiotik yang perlu ditangani dengan strategi yang cermat. Skalabilitas produksi dalam bioreaktor industri juga menjadi pertimbangan penting untuk memenuhi permintaan global.

f. Masa Depan Bioteknologi Bakteri: Proyeksi dan Kolaborasi

Masa depan bioteknologi bakteri terlihat sangat menjanjikan dengan pengembangan probiotik generasi baru yang menawarkan manfaat kesehatan yang lebih spesifik dan personal. Integrasi bakteri dengan sistem kecerdasan buatan (AI) untuk

pemantauan dan kontrol proses produksi industri bakal membawa efisiensi dan keberlanjutan ke tingkat yang baru. Kerjasama antarsektor, melibatkan akademisi, industri, dan pemerintah, menjadi kunci dalam pengembangan produk bakteri yang tidak hanya inovatif tetapi juga berkelanjutan dan ramah terhadap lingkungan kita.

2.3.3 Klasifikasi Berdasarkan Reaksi Pewarnaan Gram

Pewarnaan Gram adalah teknik fundamental dalam mikrobiologi untuk klasifikasi bakteri yang didasarkan pada karakteristik dinding sel mereka. Proses ini menggunakan serangkaian larutan warna yang, ketika diterapkan pada sampel bakteri, menghasilkan reaksi yang berbeda tergantung pada komposisi dinding sel bakteri tersebut.

1. Bakteri Gram Positif

Bakteri yang dikategorikan sebagai Gram positif menunjukkan dinding sel yang relatif tebal, yang terutama terdiri dari peptidoglikan yang kompleks. Struktur ini memungkinkan mereka untuk menyerap dan menahan kristal violet, pewarna utama dalam proses pewarnaan Gram, sehingga mereka muncul dengan warna ungu atau biru tua di bawah mikroskop. Dinding sel tebal ini tidak hanya penting dalam identifikasi bakteri, tetapi juga memainkan peran dalam mekanisme pertahanan mereka terhadap faktor lingkungan eksternal dan menentukan pola kerentanan terhadap antibiotik tertentu. Sebagai contoh, *Staphylococcus aureus*, yang merupakan bakteri Gram positif, dikenal karena kecenderungannya untuk membentuk biofilm yang memberikan perlindungan tambahan terhadap agen antimikroba.

Pemahaman mendalam tentang sifat-sifat dinding sel Gram positif juga telah membuka peluang dalam pengembangan antibiotik baru yang mampu menembus

atau mengganggu dinding sel ini. Penelitian telah diarahkan untuk mencari target dalam sintesis peptidoglikan yang dapat diinhibisi untuk menghambat pembentukan dinding sel dan menyebabkan lisis (pemecahan) sel bakteri. Ini adalah strategi yang penting mengingat banyaknya bakteri Gram positif yang menjadi patogen bagi manusia, termasuk *Streptococcus pneumoniae*, penyebab pneumonia, dan *Enterococcus faecium*, yang sering terkait dengan infeksi nosokomial.

Selain itu, dinding sel tebal bakteri Gram positif membuat mereka menjadi kandidat yang baik dalam pengembangan vaksin. Antigen yang terletak pada dinding sel ini dapat memicu respons imun yang kuat ketika digunakan sebagai vaksin. Studi terkini dalam imunologi telah mengeksplorasi potensi molekul dinding sel seperti lipoteichoic acid (LTA) dan peptidoglikan, yang dapat dijadikan sebagai adjuvan atau komponen vaksin yang meningkatkan respons imun.

Di sisi lain, bakteri Gram positif juga memainkan peran yang penting dalam industri makanan dan pertanian. *Lactobacillus* dan *Bifidobacterium* adalah contoh bakteri Gram positif yang digunakan sebagai probiotik untuk meningkatkan kesehatan usus. Dalam bidang pertanian, bakteri Gram positif seperti *Bacillus thuringiensis* digunakan sebagai biopestisida yang aman dan efektif karena mereka memproduksi toksin yang membunuh larva serangga tertentu tanpa membahayakan manusia atau hewan.

Ke depan, dengan bantuan metode bioteknologi, bakteri Gram positif mungkin dapat diubah secara genetik untuk meningkatkan kemampuan mereka dalam produksi metabolit sekunder yang berguna, seperti antibiotik, enzim, dan vitamin, atau bahkan untuk menghasilkan bahan kimia

baru yang dapat digunakan dalam farmasi atau industri kimia.

Dalam konteks ekologis, bakteri Gram positif juga memegang peranan dalam siklus nutrisi. Aktinomisetes, yang merupakan bakteri Gram positif yang umum di tanah, memainkan peran kunci dalam mendekomposisi bahan organik, mengonversinya menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tumbuhan dan organisme lain, dan dengan demikian membantu menjaga keseimbangan ekosistem.

Bakteri Gram positif adalah kelompok yang esensial yang memberikan sumbangan besar pada bidang kesehatan, industri, pertanian, dan keberlanjutan lingkungan. Memahami sifat dan fungsi mereka tidak hanya penting untuk menangani penyakit tetapi juga untuk memanfaatkan potensi mereka dalam aplikasi yang lebih luas, berkelanjutan, dan inovatif.

2. Bakteri Gram Negatif

Sementara itu, bakteri Gram negatif memiliki dinding sel yang lebih tipis yang terletak di antara dua lapisan membran lipid, yaitu membran luar dan membran plasma. Struktur peptidoglikan yang lebih sedikit membuat mereka tidak mampu menahan kristal violet selama proses pewarnaan Gram dan, sebagai akibatnya, mereka akan kehilangan warna ungu ini dan mengambil warna merah atau merah muda dari safranin, yang adalah pewarna kontras. Karakteristik ini memberikan dampak signifikan pada interaksi bakteri dengan sistem kekebalan tubuh dan juga pada resistensi mereka terhadap berbagai antibiotik. Bakteri seperti *Escherichia coli* dan *Pseudomonas aeruginosa* adalah contoh dari bakteri Gram negatif yang memiliki peran penting dalam berbagai infeksi nosokomial dan resistensi antibiotik.

Pemahaman yang mendalam tentang klasifikasi ini esensial untuk pengembangan strategi pengobatan yang efektif, serta dalam penelitian dan pengembangan antibiotik baru. Dalam dunia yang terus berubah, kajian terhadap resistensi antibiotik menjadi semakin penting, dan bakteri Gram negatif khususnya menjadi fokus karena kemampuan mereka untuk mentransfer gen resistensi secara horizontal dengan cepat.

Bakteri Gram negatif, yang mencakup genus seperti *Escherichia*, *Pseudomonas*, dan *Neisseria*, menghadirkan tantangan tersendiri dalam bidang medis dan bioteknologi. Struktur dinding sel yang khas, dengan membran luar yang mengandung lipopolisakarida (LPS), menyediakan pertahanan tambahan terhadap faktor lingkungan yang bermusuhan dan kontribusi terhadap virulensi bakteri tersebut. Lipopolisakarida itu sendiri adalah endotoksin (toksin yang dilepaskan saat bakteri hancur) yang dapat memicu respons imun yang kuat, sering kali terlalu berlebihan, yang dapat berujung pada kondisi seperti sepsis (reaksi berlebihan tubuh terhadap infeksi yang bisa mengancam nyawa).

Kemampuan bakteri Gram negatif untuk bertahan hidup di lingkungan yang berat, termasuk hadirnya antibiotik, sering dikaitkan dengan permeabilitas selektif membran luar mereka. Mereka memiliki porin (protein yang membentuk pori pada membran) yang secara selektif memperbolehkan molekul tertentu untuk melintas, sekaligus mencegah penetrasi agen antibakterial. Hal ini, bersama dengan mekanisme pompa efuks (sistem yang memompa keluar antibiotik dari dalam sel), memberikan bakteri Gram negatif kemampuan intrinsik untuk resisten terhadap berbagai antibiotik.

Di tengah meningkatnya isu resistensi antibiotik, studi terhadap bakteri Gram negatif menjadi fokus penting dalam pengembangan agen antimikroba baru. Salah satu area penelitian adalah desain molekul yang dapat mengganggu pembentukan membran luar atau menghambat fungsi lipopolisakarida, potensial menetralkan kemampuan bakteri untuk melindungi diri dari serangan imun dan antibiotik.

Selain itu, penelitian kontemporer mengarah pada penggunaan teknik biologi molekuler untuk mengubah bakteri Gram negatif sehingga dapat menghasilkan produk berharga, seperti biopolimer atau enzim industri. Mengingat metabolisme bakteri Gram negatif yang serbaguna, mereka dapat direkayasa untuk menghasilkan bahan bakar terbarukan, bahan kimia industri, atau bahkan obat-obatan dengan efisiensi tinggi dan dampak lingkungan yang rendah.

Keberlanjutan lingkungan juga menjadi perhatian dalam memanfaatkan bakteri Gram negatif, khususnya dalam aplikasi bioremediasi. Kemampuan alami mereka untuk mendegradasi polutan organik menjadikan bakteri Gram negatif seperti beberapa spesies *Pseudomonas* kandidat yang ideal untuk membersihkan tumpahan minyak dan limbah industri.

Secara futuristik, interaksi antara bakteri Gram negatif dengan mesin nano (nanomachinery) atau sistem pengantaran obat yang ditargetkan dapat merevolusi cara kita mengobati penyakit. Pembungkusan obat dalam nanopartikel atau liposom (vesikel yang dibuat dari lapisan lipid yang serupa dengan membran sel) dapat diarahkan untuk mengatasi resistensi obat dengan lebih efektif, memberikan dosis terapi langsung ke lokasi yang

diinginkan dengan kontrol yang lebih baik atas profil pelepasan obat.

Studi terhadap bakteri Gram negatif tidak hanya penting untuk memahami mekanisme resistensi dan patogenesis tetapi juga untuk memanfaatkan potensi mereka dalam pengembangan teknologi baru. Dengan pertimbangan terhadap hubungan simbiotis dengan lingkungan dan kesehatan manusia, bakteri Gram negatif menjanjikan lompatan besar dalam inovasi bioteknologi yang berkelanjutan.

Masa depan penelitian dalam klasifikasi bakteri Gram akan terus berkembang dengan teknologi canggih, seperti penggunaan bioinformatika untuk memahami secara lebih mendalam tentang genom bakteri dan peranannya dalam resistensi antibiotik. Metode pewarnaan Gram yang telah lama berdiri ini tidak hanya akan terus menjadi pilar dalam mikrobiologi klinis, tetapi juga akan menjadi fondasi untuk pendekatan baru dalam memahami dan mengatasi tantangan kesehatan global.

2.4 Metode dan Teknik Identifikasi Bakteri

Identifikasi bakteri merupakan langkah krusial dalam mikrobiologi untuk menentukan sifat dan jenis bakteri yang diteliti. Dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, metode molekuler telah berkembang pesat dan menjadi standar dalam identifikasi bakteri karena keakuratannya yang tinggi.

2.4.1 Metode Molekuler

Metode molekuler melibatkan analisis komponen genetik bakteri, terutama DNA, untuk menentukan identitas dan karakteristiknya. Ini memberikan wawasan yang tidak hanya

berguna dalam bidang diagnostik klinis tetapi juga dalam penelitian dan pengembangan bioteknologi.

1. Teknik PCR (*Polymerase Chain Reaction*)

Teknik PCR adalah revolusi dalam bidang biologi molekuler yang memungkinkan penggandaan DNA secara spesifik dan cepat. Prinsip dari PCR adalah amplifikasi selektif fragmen DNA menggunakan pasangan primer yang spesifik untuk urutan target dalam genom bakteri. Proses ini melibatkan siklus pemanasan dan pendinginan yang memfasilitasi denaturasi, annealing primer, dan elongasi oleh enzim DNA polimerase. Hasilnya adalah jutaan salinan dari area yang spesifik, yang kemudian dapat dianalisis lebih lanjut. PCR sangat berharga dalam deteksi patogen yang sulit dibiakkan atau dalam kondisi yang memerlukan diagnosis cepat.

Teknik PCR (Reaksi Berantai Polimerase) yang ditemukan oleh Kary Mullis pada tahun 1980-an telah menjelma menjadi tulang punggung diagnostik dan penelitian genetik. Melalui teknik ini, para ilmuwan dapat mengidentifikasi keberadaan dan urutan gen spesifik yang diperlukan untuk memahami fisiologi dan mekanisme resistensi patogen, termasuk bakteri. Dengan tingkat kepekaan dan spesifisitas yang tinggi, PCR memungkinkan pendeteksian dan kuantifikasi asam nukleat dari sampel klinis atau lingkungan yang sedikit sekalipun.

Penerapan PCR dalam bidang kesehatan telah merambah ke berbagai aspek, mulai dari diagnosis penyakit infeksi hingga pengawasan epidemiologis (pengamatan dan analisis penyebaran penyakit) dan pengendalian wabah. Dalam konteks pandemi, misalnya, teknik PCR digunakan untuk memonitor varian baru virus yang mungkin muncul dan menyebar di populasi.

Dalam penelitian, PCR digunakan untuk clonage gen (penyalinan dan pembiakan fragmen DNA), yang memungkinkan studi terhadap fungsi gen tertentu dan interaksi antar gen dalam suatu jaringan. Ini juga penting dalam pengembangan GMO (Genetically Modified Organisms - Organisme yang telah dimodifikasi secara genetik), di mana gen-gen tertentu dimanipulasi untuk mencapai sifat yang diinginkan, seperti tanaman yang resisten terhadap hama atau memiliki nilai nutrisi yang lebih tinggi.

Lebih lanjut, dalam praktik forensik, PCR digunakan untuk amplifikasi DNA dalam sampel yang sangat kecil, yang membantu dalam mengidentifikasi tersangka atau korban melalui analisis DNA. Teknik ini juga penting dalam studi keanekaragaman hayati dan konservasi spesies, memungkinkan deteksi dan pemantauan keberadaan spesies yang terancam punah atau sulit dideteksi.

Dengan kemajuan terkini, PCR real-time atau qPCR (quantitative PCR) telah mengembangkan kemampuan diagnostik ini lebih jauh dengan memungkinkan pengukuran jumlah asam nukleat dalam sampel secara real-time selama proses PCR berlangsung. Ini memberikan data kuantitatif yang dapat digunakan untuk mengukur tingkat ekspresi gen atau beban patogen dengan lebih akurat dan sensitif.

Masa depan PCR mungkin melihat integrasi lebih lanjut dengan teknologi seperti CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) untuk pengeditan gen yang ditargetkan, atau dengan platform diagnostik berbasis AI (Kecerdasan Buatan) yang dapat meningkatkan interpretasi data PCR, memungkinkan diagnosis yang lebih cepat, tepat, dan individualisasi pengobatan. Keterkaitan antara peningkatan teknologi PCR

dengan pengembangan medis, bioteknologi, dan kesehatan masyarakat adalah sebuah jaminan bahwa teknik ini akan terus menjadi kunci dalam penelitian dan aplikasi biomedis untuk dekade-dekade yang akan datang.

2. Sekuensing DNA

Sekuensing DNA merupakan langkah maju dalam identifikasi bakteri, memberikan data detail tentang urutan basa nitrogen dalam DNA. Metode ini mengungkapkan informasi genetik pada tingkat molekuler yang paling dasar, memungkinkan peneliti untuk melakukan pemetaan genetik, menelusuri evolusi mikroorganisme, dan memahami mekanisme resistensi antibiotik. Terdapat berbagai metode sekuensing yang tersedia, seperti sekuensing Sanger tradisional hingga teknologi sekuensing generasi baru (*next-generation sequencing*, NGS) yang mampu menganalisis seluruh genom dengan cepat dan biaya yang lebih efisien.

Dengan berlandaskan prinsip-prinsip sekuensing DNA, kita telah memasuki era genomika, di mana penelitian yang komprehensif terhadap genom bakteri dilakukan untuk menyingkap aspek-aspek genetik yang selama ini tersembunyi. Sekuensing DNA menjadi kunci dalam studi resistensi antimikroba, memungkinkan identifikasi gen-gen yang bertanggung jawab atas resistensi terhadap obat-obatan tertentu. Hal ini sangat penting mengingat tantangan global yang kita hadapi sehubungan dengan meningkatnya kasus resistensi antibiotik pada patogen yang menyebabkan penyakit.

Teknologi NGS, khususnya, telah mengubah wajah epidemiologi molekuler. Dengan kemampuan untuk menghasilkan data genomik dalam skala besar, NGS memungkinkan peneliti untuk melakukan tipe analisis yang dikenal sebagai metagenomika, yakni studi genetik

langsung dari sampel lingkungan yang kompleks. Ini membuka jalan bagi identifikasi patogen yang belum diketahui, pemantauan transmisi penyakit, dan pengembangan pendekatan baru dalam terapi bakterial.

NGS juga berperan dalam sistem surveillance (pengawasan) resistensi antibiotik, yang krusial dalam memahami bagaimana resistensi berkembang dan menyebar di antara populasi bakteri. Dengan kemampuan untuk mengikuti lintasan evolusi bakteri hampir secara real-time, peneliti dapat mengidentifikasi tren resistensi dan memprediksi munculnya strain bakteri yang dapat menjadi ancaman kesehatan masyarakat di masa depan.

Di sisi lain, sekuensing DNA juga telah memperkuat bidang sintesis biologi, di mana ilmuwan tidak hanya membaca DNA, tetapi juga merancang dan menyintesis urutan genetik baru. Dengan demikian, ada potensi untuk menciptakan bakteri dengan karakteristik yang diinginkan untuk aplikasi industri, seperti produksi biofuel, bioremediasi, atau sintesis obat-obatan.

Perkembangan teknologi bioinformatika dan pemodelan komputasional telah menjadi penunjang penting dalam analisis data sekuensing yang besar. Algoritma dan perangkat lunak yang semakin canggih memungkinkan analisis data kompleks dengan lebih cepat dan akurat, memungkinkan para ilmuwan untuk mengekstrak informasi biologis yang signifikan dari data yang diperoleh.

Melihat ke depan, integrasi sekuensing DNA dengan teknologi seperti AI dan machine learning diperkirakan akan meningkatkan kemampuan kita dalam memahami sistem biologis kompleks. Hal ini akan memacu inovasi di berbagai bidang, dari pengembangan terapi yang dipersonalisasi hingga desain sistem ekologi buatan yang

mampu menunjang kehidupan manusia di luar bumi. Teknologi sekuensing DNA yang semakin terjangkau dan efisien akan terus memainkan peran kunci dalam memahami kehidupan pada tingkat genetik, mengungkap potensi genetik yang belum digali, dan mendorong batas-batas pengetahuan kita tentang kehidupan itu sendiri.

Kedua metode molekuler ini, ketika dikombinasikan, menyediakan toolkit yang kuat untuk identifikasi bakteri. PCR menyediakan identifikasi cepat dan spesifik, sementara sekuensing DNA menyediakan gambaran komprehensif dan mendalam tentang bakteri yang diteliti. Di masa depan, kemajuan dalam teknologi NGS dan metode bioinformatika yang terus berkembang diharapkan dapat menyederhanakan proses ini lebih jauh, mengurangi waktu dan biaya yang diperlukan, serta meningkatkan akurasi identifikasi bakteri di tingkat genom.

Integrasi metode identifikasi ini dengan platform informasi dan database global akan memfasilitasi pertukaran pengetahuan yang cepat antara ilmuwan dan profesional kesehatan, memungkinkan respons yang lebih efektif terhadap wabah penyakit, dan membuka jalan baru dalam penemuan obat dan vaksin. Dengan berkembangnya kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin, analisis data yang dihasilkan dari metode-metode ini akan menjadi lebih canggih, mempercepat penemuan dan pemahaman baru dalam mikrobiologi dan bioteknologi.

2.4.2 Metode Biokimia untuk Identifikasi Bakteri

Metode biokimia adalah pilar dalam identifikasi bakteri yang mengandalkan deteksi aktivitas biokimia bakteri untuk menentukan jenis atau spesiesnya. Pendekatan ini sering digunakan bersamaan dengan metode lain untuk mengkonfirmasi identitas bakteri yang diduga.

1. Tes Fermentasi

Tes fermentasi adalah teknik klasik dalam mikrobiologi yang memanfaatkan kemampuan bakteri untuk mengfermentasi gula tertentu, yang menghasilkan asam, alkohol, dan/atau gas sebagai produk akhir. Setiap spesies bakteri memiliki pola fermentasi yang unik, yang dapat digunakan sebagai petunjuk identifikasi. Prosedur ini biasanya melibatkan inkubasi bakteri dalam medium yang mengandung gula tertentu dan indikator pH. Perubahan warna pada medium menandakan produksi asam, sementara gas yang terperangkap dalam medium atau tabung durham menunjukkan produksi gas. Sebagai contoh, *Escherichia coli* akan menghasilkan gas dan asam saat fermentasi laktosa, sementara bakteri lain mungkin tidak fermentasi laktosa sama sekali.

2. Tes Resistensi Antibiotik

Tes resistensi antibiotik, atau uji kepekaan antibiotik, adalah metode biokimia yang sangat penting dalam praktek klinis untuk menentukan keefektifan antibiotik terhadap bakteri tertentu. Ini memberikan informasi kritis dalam memandu pengobatan infeksi bakteri. Melalui tes ini, bakteri diinkubasi dengan disk kertas yang mengandung antibiotik atau secara langsung dalam medium yang mengandung konsentrasi antibiotik yang berbeda. Setelah periode inkubasi, zona hambatan pertumbuhan yang terbentuk di sekitar disk atau konsentrasi penghambatan minimum (minimum inhibitory concentration, MIC) yang menentukan pertumbuhan bakteri diukur. Metode ini tidak hanya penting untuk pengobatan individual tetapi juga dalam pemantauan dan pengendalian resistensi antibiotik di tingkat populasi.

Perkembangan terbaru dalam metode biokimia, seperti automasi tes dan penggunaan biosensor, telah meningkatkan efisiensi dan kecepatan proses identifikasi.

Dengan integrasi data biokimia ke dalam sistem database terpusat, sekarang lebih mudah untuk membandingkan profil biokimia bakteri dengan database yang ada dan mendapatkan hasil identifikasi yang lebih akurat.

Di masa mendatang, metode biokimia akan terus berevolusi dengan adanya teknologi baru. Dengan kemajuan dalam nanoteknologi dan mikrofluidika, tes biokimia dapat menjadi lebih sensitif, memerlukan volume sampel yang lebih sedikit, dan memberikan hasil yang lebih cepat. Dengan berkembangnya kecerdasan buatan dan algoritme pembelajaran mesin, analisis data kompleks dari hasil tes biokimia dapat dilakukan dengan lebih cepat, meningkatkan kapasitas kita untuk mengidentifikasi dan merespon terhadap tantangan mikrobiologi yang ada dan yang akan datang.

2.5 Studi Kasus dan Aplikasi dalam Identifikasi dan Klasifikasi Bakteri

Pengetahuan yang mendalam tentang identifikasi dan klasifikasi bakteri memiliki implikasi signifikan, terutama dalam bidang kedokteran dan farmasi. Dalam bagian ini, kita akan menggali beberapa studi kasus yang spesifik dan mengeksplorasi aplikasinya dalam konteks kedokteran dan pengembangan farmasi.

2.4.1 Studi Kasus

Penjelasan Spesifik Mengenai Studi Kasus dalam Identifikasi dan Klasifikasi Bakteri

Setiap studi kasus dalam mikrobiologi seringkali mengungkap cerita unik yang menyoroti pentingnya teknik identifikasi bakteri. Misalnya, studi kasus pada wabah *Legionnaires' disease* di Philadelphia pada tahun 1976 yang berhasil diidentifikasi penyebabnya sebagai *Legionella pneumophila* melalui metode isolasi dan kultur. Ini menunjukkan

bagaimana teknik biokimia dan molekuler berkontribusi dalam mengidentifikasi patogen baru yang tidak diketahui sebelumnya, menyelamatkan nyawa melalui intervensi yang tepat.

2.4.2 Aplikasi dalam Kedokteran dan Farmasi

1. Peran Taksonomi Bakteri untuk Pengembangan Obat dan Vaksin

Klasifikasi bakteri berdasarkan taksonomi adalah kunci dalam pengembangan obat dan vaksin. Pengetahuan tentang filogeni dan hubungan evolusi antara bakteri memungkinkan peneliti untuk merancang vaksin yang ditargetkan dan mengembangkan obat yang lebih efektif. Dalam pengembangan vaksin, contohnya, identifikasi antigen yang spesifik pada bakteri tertentu dapat memandu pembuatan vaksin yang mampu menginduksi respons imun yang efektif. Taksonomi juga penting dalam penelitian resistensi antibiotik, memungkinkan ilmuwan untuk merancang senyawa yang dapat mengatasi mekanisme resistensi yang sudah dikenal.

2. Pentingnya Identifikasi Bakteri untuk Diagnosis dan Pengobatan Penyakit

Identifikasi bakteri yang akurat adalah dasar untuk diagnosis yang tepat dan pengobatan efektif penyakit infeksi. Menggunakan teknik yang telah diuraikan sebelumnya, dokter dapat menentukan patogen penyebab penyakit dan menentukan terapi yang paling efektif. Dalam praktek klinis, identifikasi ini dapat menyelamatkan nyawa, mengurangi durasi penyakit, dan mencegah penyebaran infeksi. Selain itu, pemantauan resistensi antibiotik membantu dalam pengawasan epidemiologis dan dalam pengembangan pedoman pengobatan yang up-to-date.

Dengan kemajuan teknologi, aplikasi metode identifikasi bakteri terus berkembang. Dalam bidang kedokteran presisi, misalnya, penggunaan analisis genetik

bakteri telah memungkinkan penyesuaian pengobatan yang lebih personal berdasarkan profil genetik patogen spesifik pasien. Kedepannya, penggabungan teknologi seperti bioinformatika, kecerdasan buatan, dan teknologi editing gen (seperti CRISPR-Cas9) akan semakin meningkatkan keefektifan dan kecepatan dalam identifikasi bakteri, mengarah pada revolusi baru dalam kedokteran dan farmasi yang berorientasi pada pengobatan personal dan pengembangan obat yang lebih canggih.

2.5 Konklusi dan Rekomendasi

Dalam pembahasan mengenai taksonomi bakteri dan aplikasinya dalam bioteknologi dan industri, telah terungkap informasi penting dan penemuan kunci yang memperkaya pemahaman kita tentang mikroorganisme ini. Berikut adalah ringkasan serta pandangan mengenai relevansi, tantangan, dan peluang yang terbentang di depan.

2.5.1 Ringkasan Informasi dan Penemuan Kunci

Kita telah mengidentifikasi bahwa bakteri, melalui berbagai mekanisme biokimia dan genetiknya, berperan penting dalam berbagai aspek industri dan bioteknologi, dari produksi antibiotik hingga aplikasi dalam pembuatan biofuel. Teknik-teknik canggih seperti PCR dan sekuensing DNA telah mengubah cara kita mengidentifikasi dan mengklasifikasikan bakteri, menyediakan metode yang lebih cepat dan akurat. Melalui studi kasus, kita juga telah melihat bagaimana aplikasi ini berdampak pada dunia kedokteran dan farmasi, khususnya dalam pengembangan obat dan vaksin serta dalam diagnosis dan pengobatan penyakit.

2.5.2 Relevansi Taksonomi Bakteri dalam Ilmu Bakteriologi dan Bidang Terkait Lainnya

Taksonomi bakteri tidak hanya merupakan fondasi dari ilmu bakteriologi tetapi juga memiliki relevansi yang luas dalam bidang-bidang terkait seperti ekologi, pertanian, dan kesehatan masyarakat. Dengan memahami hubungan filogenetik antara bakteri, kita dapat meramalkan dan menanggapi dengan lebih baik terhadap munculnya resistensi antibiotik, menemukan agen bioremediasi yang efektif, dan mengembangkan praktek pertanian yang lebih berkelanjutan dengan penggunaan bakteri yang menguntungkan.

2.5.3 Tantangan dan Peluang Penelitian Futuristik tentang Taksonomi Bakteri

Di era penelitian modern, kita dihadapkan pada tantangan dalam mengelola volume data yang besar dari studi genetik bakteri, sementara kita juga memiliki peluang untuk menggunakan data ini dalam cara yang belum pernah terbayangkan sebelumnya. Pengintegrasian big data, bioinformatika, dan kecerdasan buatan dalam taksonomi bakteri dapat memungkinkan identifikasi cepat dari patogen yang menyebabkan penyakit dan mempercepat pengembangan obat baru.

Dalam menghadapi tantangan seperti perubahan iklim dan resistensi antibiotik yang meningkat, penelitian futuristik dalam taksonomi bakteri juga memiliki potensi untuk menciptakan strategi adaptasi dan mitigasi. Misalnya, editing genetik dengan teknologi seperti CRISPR-Cas9 dapat digunakan untuk mengembangkan strain bakteri yang mampu bertahan di lingkungan yang berubah atau lebih efektif dalam menguraikan polutan.

Rekomendasi

Berdasarkan berbagai pemikiran ini, direkomendasikan bahwa:

1. Penelitian lanjutan diperlukan untuk menjelajahi potensi bakteri dalam aplikasi industri dan bioteknologi yang baru.
2. Integrasi teknologi informasi dan komputasi dalam bakteriologi harus dipercepat untuk mengelola dan menganalisis data yang kompleks.
3. Kerja sama multidisipliner antara mikrobiolog, bioinformatikawan, dan ilmuwan data perlu ditingkatkan untuk memaksimalkan pemanfaatan penemuan dalam taksonomi bakteri.
4. Kebijakan kesehatan masyarakat dan regulasi harus terus diperbarui untuk mencerminkan perkembangan terbaru dalam resistensi antibiotik dan biosekuriti.
5. Pendanaan untuk penelitian dan pengembangan dalam bioteknologi bakteri harus ditingkatkan, mengingat potensi besar bakteri dalam mengatasi masalah kesehatan dan lingkungan global.

Dengan menggabungkan pengetahuan tradisional dengan inovasi teknologi terkini, kita dapat mengharapkan masa depan di mana taksonomi bakteri terus memainkan peran kunci dalam kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, sekaligus memberikan kontribusi penting bagi kesejahteraan umat

DAFTAR PUSTAKA

- Parks, D. H., Chuvochina, M., Chaumeil, P. A., Rinke, C., Mussig, A. J., & Hugenholtz, P. (2020). A complete domain-to-species taxonomy for Bacteria and Archaea. *Nature biotechnology*, 38(9), 1079-1086.
- Chun, J., & Rainey, F. A. (2014). Integrating genomics into the taxonomy and systematics of the Bacteria and Archaea. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 64(Pt_2), 316-324.
- Vandamme, P. A. (2011). Taxonomy and classification of bacteria. *Manual of clinical microbiology*, 210-227.
- Ferraz Helene, L. C., Klepa, M. S., & Hungria, M. (2022). New insights into the taxonomy of bacteria in the genomic era and a case study with rhizobia. *International Journal of Microbiology*, 2022.
- Mathema, B., Mediavilla, J. R., Chen, L., & Kreiswirth, B. N. (2009). Evolution and taxonomy of Staphylococci. *Staphylococci in human disease*, 31-64.
- Woese, C. R., Magrum, L. J., & Fox, G. E. (1978). Archaeobacteria. *Journal of Molecular Evolution*, 11, 245-252.
- Nair, P. (2012). Woese and fox: life, rearranged. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(4), 1019-1021.
- Sapp, J., & Fox, G. E. (2013). The singular quest for a universal tree of life. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 77(4), 541-550.
- Pasquina-Lemonche, L., Burns, J., Turner, R. D., Kumar, S., Tank, R., Mullin, N., ... & Hobbs, J. K. (2020). The architecture of the Gram-positive bacterial cell wall. *Nature*, 582(7811), 294-297.
- Moradali, M. F., & Rehm, B. H. (2020). Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials. *Nature Reviews Microbiology*, 18(4), 195-210.
- Barskey, A. E., Derado, G., & Edens, C. (2022). Rising incidence of Legionnaires' disease and associated epidemiologic patterns, United States, 1992–2018. *Emerging Infectious Diseases*, 28(3), 527.

- Jomehzadeh, N., Moosavian, M., Saki, M., & Rashno, M. (2019). Legionella and legionnaires' disease: An overview. *Journal of Acute Disease*, 8(6), 221-232.
- Rohde, M. (2019). The Gram-positive bacterial cell wall. *Microbiology Spectrum*, 7(3), 10-1128.
- Briaud, P., & Carroll, R. K. (2020). Extracellular vesicle biogenesis and functions in gram-positive bacteria. *Infection and immunity*, 88(12), 10-1128.
- Cao, Y., & Lin, H. (2021). Characterization and function of membrane vesicles in Gram-positive bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105, 1795-1801.
- Schleifer, K. H. (2009). Classification of Bacteria and Archaea: past, present and future. *Systematic and applied microbiology*, 32(8), 533-542.
- Stanier, R. Y., & Van Niel, C. B. (1941). The main outlines of bacterial classification. *Journal of Bacteriology*, 42(4), 437-466.
- Smith, N. W., Shorten, P. R., Altermann, E., Roy, N. C., & McNabb, W. C. (2019). The classification and evolution of bacterial cross-feeding. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 153.
- Liu, B., Zheng, D., Zhou, S., Chen, L., & Yang, J. (2022). VFDB 2022: a general classification scheme for bacterial virulence factors. *Nucleic acids research*, 50(D1), D912-D917.
- Micoli, F., Bagnoli, F., Rappuoli, R., & Serruto, D. (2021). The role of vaccines in combatting antimicrobial resistance. *Nature Reviews Microbiology*, 19(5), 287-302.
- Furuyama, N., & Sircili, M. P. (2021). Outer membrane vesicles (OMVs) produced by gram-negative bacteria: structure, functions, biogenesis, and vaccine application. *BioMed Research International*, 2021.
- Moradali, M. F., & Rehm, B. H. (2020). Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials. *Nature Reviews Microbiology*, 18(4), 195-210.
- Gan, Y., Zhao, G., Wang, Z., Zhang, X., Wu, M. X., & Lu, M. (2023). Bacterial Membrane Vesicles: Physiological Roles, Infection Immunology, and Applications. *Advanced Science*, 2301357.

- Franco-Duarte, R., Černáková, L., Kadam, S., S. Kaushik, K., Salehi, B., Bevilacqua, A., ... & Rodrigues, C. F. (2019). Advances in chemical and biological methods to identify microorganisms—from past to present. *Microorganisms*, 7(5), 130.
- Li, X., Bosch-Tijhof, C. J., Wei, X., de Soet, J. J., Crielaard, W., Loveren, C. V., & Deng, D. M. (2020). Efficiency of chemical versus mechanical disruption methods of DNA extraction for the identification of oral Gram-positive and Gram-negative bacteria. *Journal of International Medical Research*, 48(5), 0300060520925594.
- Chauhan, A., Jindal, T., Chauhan, A., & Jindal, T. (2020). Biochemical and molecular methods for bacterial identification. *Microbiological methods for environment, food and pharmaceutical analysis*, 425-468.
- Gilardi, G. L. (2020). Identification of *Pseudomonas* and related bacteria. In *Glucose nonfermenting gram-negative bacteria in clinical microbiology* (pp. 15-44). CRC press.
- Wang, H., Ceylan Koydemir, H., Qiu, Y., Bai, B., Zhang, Y., Jin, Y., ... & Ozcan, A. (2020). Early detection and classification of live bacteria using time-lapse coherent imaging and deep learning. *Light: Science & Applications*, 9(1), 118.
- Qayyum, S., Basharat, S., Mian, A. H., Qayum, S., Ali, M., Changsheng, P., ... & Sultan, F. (2020). Isolation, identification and antibacterial study of pigmented bacteria. *Applied Nanoscience*, 10, 4495-4503.
- Kohlerschmidt, D. J., Mingle, L. A., Dumas, N. B., & Nattanmai, G. (2021). Identification of aerobic Gram-negative bacteria. In *Practical handbook of microbiology* (pp. 59-70). CRC Press.
- Giuliano, C., Patel, C. R., & Kale-Pradhan, P. B. (2019). A guide to bacterial culture identification and results interpretation. *Pharmacy and Therapeutics*, 44(4), 192.

BAB 3

SEL DAN BAGIAN-BAGIAN DARI BAKTERI

Oleh Andi Fatmawati

3.1 Pendahuluan

Semua organisme hidup di bumi terdiri dari salah satu dari dua jenis sel dasar, yakni sel prokariotik di mana materi genetiknya tidak terpisah dari sel lainnya; atau sel eukariotik, di mana materi genetiknya terbungkus dalam membran inti. Secara tradisional, semua sel prokariotik disebut bakteri dan diklasifikasikan dalam kerajaan prokariotik Monera. Namun, klasifikasi mereka sebagai Monera, yang setara dalam taksonomi dengan kerajaan lain - Plantae, Animalia, Fungi, dan Protista - meremehkan keanekaragaman genetik dan metabolisme yang luar biasa yang ditunjukkan oleh sel prokariotik relatif terhadap sel eukariotik. Pada akhir tahun 1970-an, ahli mikrobiologi Amerika, *Carl Woese*, memelopori perubahan besar dalam klasifikasi dengan menempatkan semua organisme ke dalam tiga domain - Eukarya, Bakteria (awalnya disebut Eubacteria), dan Archaea (awalnya disebut Archaebacteria) - untuk merefleksikan tiga garis evolusi kuno. Organisme prokariotik yang sebelumnya dikenal sebagai bakteri kemudian dibagi menjadi dua domain ini, Bakteri dan Archaea. Bakteri dan Archaea memiliki kemiripan secara dangkal; misalnya, mereka tidak memiliki organel intraseluler, dan memiliki DNA sirkuler. Namun, pada dasarnya mereka berbeda, dan pemisahan mereka didasarkan pada bukti genetik untuk garis keturunan evolusi mereka yang kuno dan terpisah, serta perbedaan mendasar dalam kimia dan fisiologi

mereka. Anggota dari dua domain prokariotik ini berbeda satu sama lain seperti halnya dengan sel eukariotik.

Bakteri, bakteri tunggal, salah satu dari sekelompok organisme bersel tunggal mikroskopis yang hidup dalam jumlah yang sangat banyak di hampir setiap lingkungan di bumi, mulai dari lautan dalam hingga jauh di bawah permukaan bumi, sampai ke saluran pencernaan manusia.

Bakteri tidak memiliki inti yang terikat membran dan struktur internal lainnya sehingga digolongkan ke dalam bentuk kehidupan bersel satu yang disebut **prokariota**. Prokariota adalah makhluk hidup yang dominan di Bumi, yang telah ada selama tiga perempat sejarah bumi dan telah beradaptasi dengan hampir semua habitat ekologis yang tersedia. Sebagai sebuah kelompok, mereka menunjukkan kemampuan metabolisme yang sangat beragam dan dapat menggunakan hampir semua senyawa organik, dan beberapa senyawa anorganik, sebagai sumber makanan. Beberapa bakteri dapat menyebabkan penyakit pada manusia, hewan, atau tanaman, tetapi sebagian besar tidak berbahaya dan merupakan agen ekologi yang bermanfaat yang aktivitas metabolismenya menopang bentuk kehidupan yang lebih tinggi. Bakteri lainnya merupakan simbiosis tanaman dan invertebrata, di mana mereka menjalankan fungsi-fungsi penting bagi inangnya, seperti fiksasi nitrogen dan degradasi selulosa. Tanpa prokariota, tanah tidak akan subur, dan bahan organik yang mati akan membusuk lebih lambat. Beberapa bakteri digunakan secara luas dalam pembuatan makanan, bahan kimia, dan antibiotik. Studi tentang hubungan antara berbagai kelompok bakteri terus menghasilkan wawasan baru tentang asal usul kehidupan di bumi dan mekanisme evolusi (Fatmawati,2023).

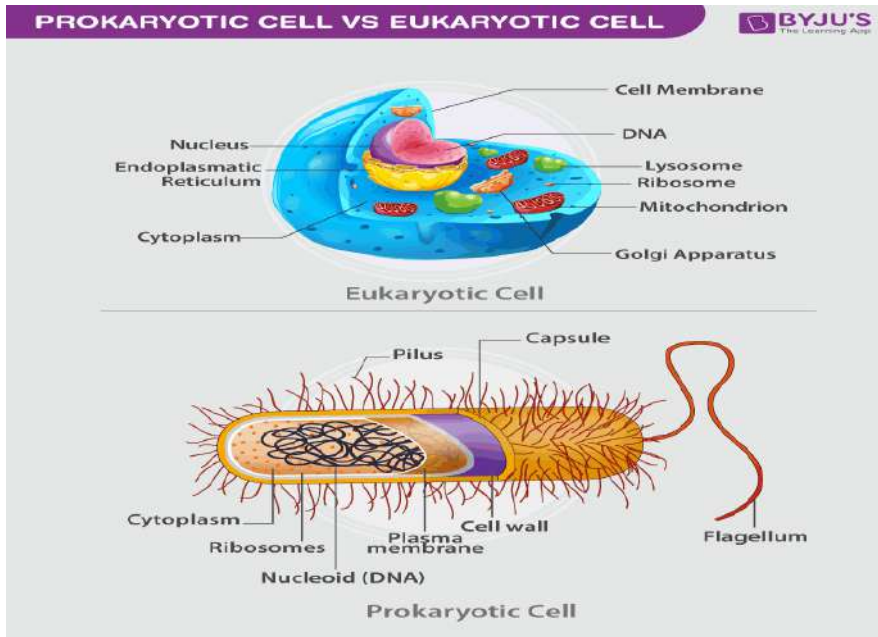
3.2 Sel Bakteri

3.2.1 Bakteri sebagai prokariota

Sel prokariotik (yaitu, Bakteri dan Archaea) pada dasarnya berbeda dari sel eukariotik yang merupakan bentuk kehidupan lainnya. Sel prokariotik didefinisikan oleh desain yang jauh lebih sederhana daripada yang ditemukan dalam sel eukariotik. Penyederhanaan yang paling nyata adalah kurangnya organel intraseluler, yang merupakan ciri khas sel eukariotik. Organel adalah struktur tertutup membran yang terkandung dalam sitoplasma dan meliputi *nukleus*, tempat informasi genetik dipertahankan, disalin, dan diekspresikan; *mitokondria* dan *kloroplas*, tempat energi kimia atau cahaya diubah menjadi energi metabolisme; *lisosom*, tempat protein yang tertelan dicerna dan nutrisi lain tersedia; dan *retikulum endoplasma* dan *aparatus Golgi*, tempat protein yang disintesis dan dilepaskan dari sel dirakit, dimodifikasi, dan diekspor. Semua aktivitas yang dilakukan oleh organel juga terjadi pada bakteri, tetapi tidak dilakukan oleh struktur khusus. Selain itu, sel prokariotik biasanya jauh lebih kecil daripada sel eukariotik. Ukurannya yang kecil, desainnya yang sederhana, dan kemampuan metabolisme yang luas memungkinkan bakteri untuk tumbuh dan membelah diri dengan sangat cepat serta menghuni dan berkembang di hampir semua lingkungan. (Robert J., 2023)

Sel prokariotik dan eukariotik berbeda dalam banyak hal lainnya, termasuk komposisi lipid, struktur enzim metabolisme utama, respons terhadap antibiotik dan racun, dan mekanisme ekspresi informasi genetik. Organisme eukariotik mengandung beberapa kromosom linier dengan gen yang jauh lebih besar dari yang seharusnya untuk mengkodekan sintesis protein. Sebagian besar salinan asam ribonukleat (RNA) dari informasi genetik (asam deoksiribonukleat, atau DNA) dibuang, dan RNA pembawa pesan yang tersisa (mRNA) dimodifikasi secara substansial sebelum diterjemahkan ke dalam protein. Sebaliknya, bakteri

memiliki satu kromosom melingkar yang berisi semua informasi genetik mereka, dan mRNA mereka adalah salinan persis dari gen mereka dan tidak dimodifikasi (Frantisek B., et.al, 2004)

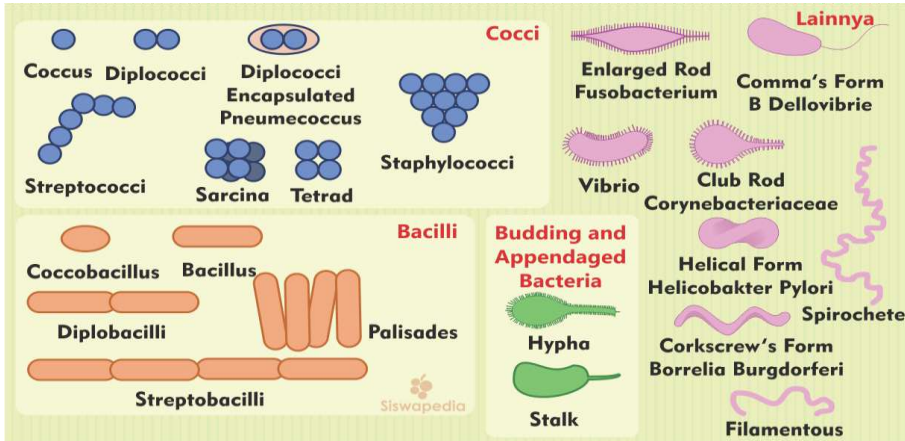


Gambar 3. 1. Sel Prokariotik dan eukariotik
(Sumber: <https://byjus.com/biology/prokaryotic-and-eukaryotic-cells>)

3.2.2 Keragaman Struktur Bakteri

Meskipun sel bakteri jauh lebih kecil dan lebih sederhana strukturnya daripada sel eukariotik, bakteri adalah kelompok organisme yang sangat beragam yang berbeda dalam ukuran, bentuk, habitat, dan metabolisme. Sebagian besar pengetahuan tentang bakteri berasal dari studi tentang bakteri penyebab penyakit, yang lebih mudah diisolasi dalam kultur murni dan lebih mudah diselidiki daripada spesies bakteri yang hidup bebas. Perlu dicatat bahwa banyak bakteri yang hidup bebas, sangat berbeda dengan bakteri yang beradaptasi untuk hidup sebagai parasit atau simbiosis hewan.

Bentuk dasar bakteri terdiri atas : bulat (coccus), seperti batang (basil), atau melengkung (vibrio, spirillum, atau spirochete). Bakteri yang tidak terpisah satu sama lain setelah pembelahan sel membentuk karakteristik yang membantu dalam identifikasi mereka. Sebagai contoh, beberapa kokus ditemukan terutama berpasangan, termasuk *Streptococcus pneumoniae*, pneumokokus yang menyebabkan pneumonia, dan *Neisseria gonorrhoeae*, gonokokus yang menyebabkan penyakit menular seksual gonore. Sebagian besar streptokokus menyerupai untaian manik-manik yang panjang, sedangkan stafilokokus membentuk gumpalan acak (nama "**stafilokokus**" berasal dari kata Yunani *staphyle*, yang berarti "gugusan buah anggur"). Selain itu, beberapa bakteri coccil muncul sebagai paket persegi atau kubus. Basil berbentuk batang biasanya muncul sendiri-sendiri, tetapi beberapa jenis membentuk rantai panjang, seperti batang corynebacteria, penghuni normal mulut yang sering melekat satu sama lain pada sudut acak. Beberapa basil memiliki ujung runcing, sedangkan yang lain memiliki ujung kotak, dan beberapa batang bengkok menjadi bentuk koma. Batang yang bengkok ini sering disebut *vibrio*, termasuk *Vibrio cholerae*, yang menyebabkan kolera. Bentuk lain dari bakteri termasuk *spirilla*, yang bengkok dan membengkok, dan spirochetes, yang membentuk heliks yang mirip dengan pembuka botol, di mana tubuh sel dibungkus dengan serat pusat yang disebut filamen aksial (Milton, 2023).



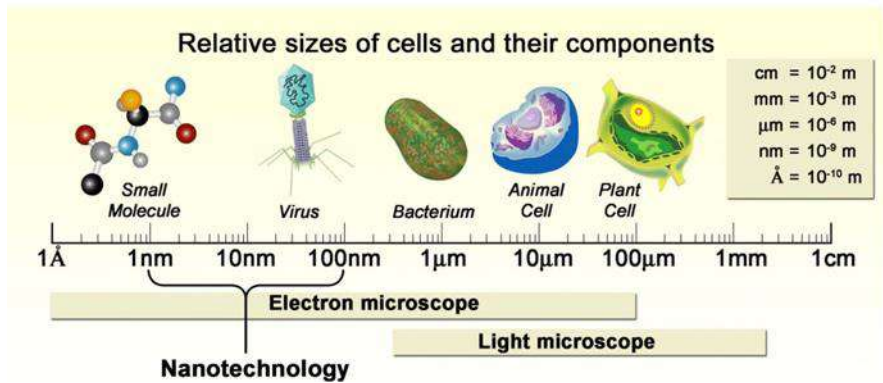
Gambar 3. 2. Bentuk Sel Bakteri

(Sumber : <https://www.siswapedia.com/bakteri>)

Bakteri adalah makhluk hidup terkecil. Bakteri berukuran rata-rata-seperti *Escherichia coli* yang berbentuk batang, penghuni normal saluran usus manusia dan hewan-berukuran sekitar 2 mikrometer (μm ; sepersejuta meter) panjangnya dan berdiameter 0,5 μm , serta sel bulat *Staphylococcus aureus* yang berdiameter 1 μm . Beberapa jenis bakteri bahkan lebih kecil, seperti *Mycoplasma pneumoniae*, yang merupakan salah satu bakteri terkecil, dengan lebar sekitar 0,1 hingga 0,25 μm dan panjang sekitar 1 hingga 1,5 μm ; Bordetella pertussis berbentuk batang, yang merupakan agen penyebab batuk rejan, dengan ukuran 0. 2 hingga 0,5 μm dengan diameter dan panjang 0,5 hingga 1 μm ; dan *Treponema pallidum* berbentuk pembuka botol, yang merupakan agen penyebab sifilis, dengan rata-rata hanya berdiameter 0,1 hingga 0,2 μm tetapi panjangnya 6 hingga 15 μm . *Cyanobacterium synechococcus* rata-rata berdiameter sekitar 0,5 hingga 1,6 μm .

Beberapa bakteri berukuran relatif besar, seperti Azotobacter, yang memiliki diameter 2 hingga 5 μm atau lebih; dan Achromatium, yang memiliki lebar minimum 5 μm dan

panjang maksimum 100 μm , tergantung spesiesnya. Bakteri raksasa dapat dilihat dengan mata telanjang, seperti *Thiomargarita namibiensis*, yang berdiameter rata-rata 750 μm ; *T. magnifica*, yang berdiameter rata-rata 700 μm dan panjang 1 cm; dan *Epulopiscium fishelsoni* yang berbentuk batang, yang panjangnya berkisar antara 30 hingga lebih dari 600 μm .



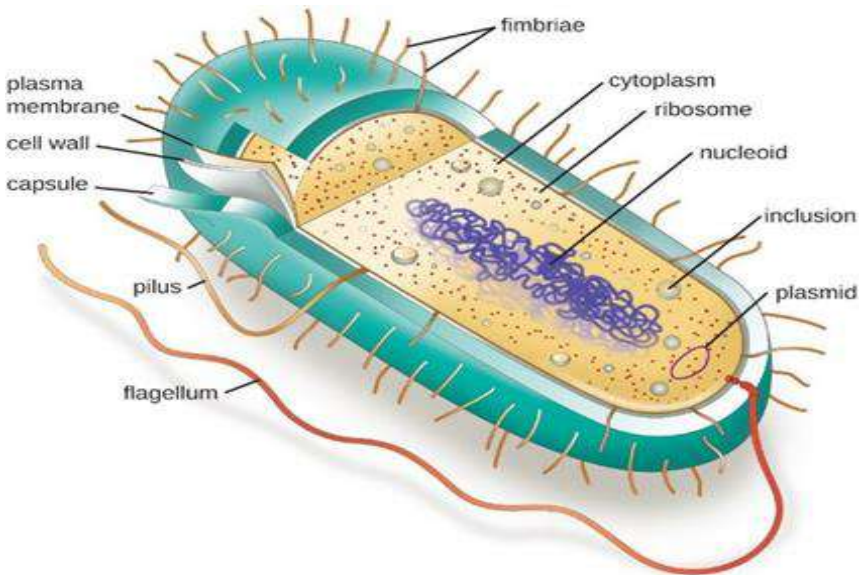
Gambar 3. 3. Ukuran Sel

(Sumber: <https://deainfo.nci.nih.gov>)

Bakteri adalah mikroorganisme uniseluler dan dengan demikian umumnya tidak terorganisir ke dalam jaringan. Setiap bakteri tumbuh dan membelah diri secara independen dari bakteri lainnya, meskipun kumpulan bakteri, yang terkadang terdiri dari anggota spesies yang berbeda, sering ditemukan. Banyak bakteri dapat membentuk struktur agregat yang disebut biofilm. Organisme dalam biofilm sering kali menunjukkan sifat yang sangat berbeda dari organisme yang sama dalam keadaan individu atau keadaan planktonik. Bakteri yang telah bergabung menjadi biofilm dapat mengkomunikasikan informasi tentang ukuran populasi dan kondisi metabolisme. Jenis komunikasi ini disebut penginderaan kuorum dan beroperasi dengan produksi molekul kecil yang disebut autoinducer atau feromon. Konsentrasi molekul penginderaan kuorum - biasanya peptida atau lakton homoserin terasilasi (AHL; bahan kimia pemberi

sinyal khusus) - terkait dengan jumlah bakteri dari spesies yang sama atau berbeda yang ada di biofilm dan membantu mengoordinasikan perilaku biofilm (Lesli J., 2014).

3.3 Struktur Sel Bakteri



Gambar 3. 4. Struktur Sel Bakteri

(Sumber : <https://www.toppr.com/ask/content/concept/cell-number-and-shape-200249>)

3.3.1. Struktur Permukaan

1. *Flagela:*

Flagela adalah filamen heliks panjang yang terbuat dari satu jenis protein dan terletak di ujung sel berbentuk batang, seperti pada *Vibrio cholerae* atau *Pseudomonas aeruginosa*, atau di seluruh permukaan sel, seperti pada

Escherichia coli. Flagela dapat ditemukan pada batang gram positif dan gram negatif, tetapi jarang ditemukan pada kokus dan terperangkap dalam filamen aksial di *spirochetes*.

Secara struktural, flagela bakteri berukuran panjang (3 hingga 12 μm), pelengkap permukaan berserabut dengan diameter sekitar 12 hingga 30 nm. Subunit protein dari flagel dirakit untuk membentuk struktur silinder dengan inti berongga. Flagel terdiri dari tiga bagian: (1) filamen panjang, yang terletak di luar permukaan sel; (2) struktur pengait di ujung filamen; dan (3) badan basal, tempat pengait ditambatkan dan yang memberikan gerakan pada flagel. Badan basal melintasi dinding luar dan struktur membran. Terdiri dari batang dan satu atau dua pasang cakram. Dorongan yang mendorong sel bakteri disediakan oleh rotasi berlawanan arah jarum jam dari badan basal, yang menyebabkan filamen yang dipilin secara heliks berputar. Pergerakan badan basal digerakkan oleh gaya gerak proton dan bukan oleh ATP secara langsung. Kemampuan bakteri untuk berenang dengan menggunakan aksi baling-baling seperti baling-baling pada flagela memberi mereka sarana mekanis untuk melakukan kemotaksis (gerakan sebagai respons terhadap zat penarik dan penolak di lingkungan). Respons terhadap rangsangan kimia melibatkan sistem sensorik yang canggih dari reseptor yang terletak di permukaan sel dan/atau periplasma dan yang mengirimkan informasi ke protein kemotaksis yang menerima metil yang mengontrol motor flagela. Studi genetik telah mengungkapkan adanya mutan dengan jalur biokimia yang berubah untuk motilitas flagela dan kemotaksis. Kemotaksis memungkinkan bakteri untuk menyesuaikan perilaku berenangnya sehingga ia dapat merasakan dan bermigrasi ke arah peningkatan kadar

bahan kimia penarik atau menjauhi bahan kimia penolak. (Avadhesha, 2014)

Secara kimiawi, flagela dibangun dari kelas protein yang disebut flagellin. Struktur pengait dan tubuh basal terdiri dari banyak protein. Mutasi yang memengaruhi salah satu produk gen ini dapat mengakibatkan hilangnya atau gangguan motilitas. Flagellin bersifat imunogenik dan merupakan sekelompok antigen protein yang disebut antigen H, yang merupakan karakteristik dari spesies, strain, atau varian organisme tertentu. Spesifisitas spesies dari flagellin mencerminkan perbedaan dalam struktur primer protein. Perubahan antigenik dari flagela yang dikenal sebagai variasi fase H1 dan H2 terjadi pada *Salmonella typhimurium*.

2. Pili dan Fimbriae

Pili (Fimbriae): Pili adalah pelengkap ramping, seperti rambut, dan berprotein pada permukaan banyak bakteri (terutama Gram negatif). Pili penting untuk menempel pada permukaan inang.

Istilah pili dan fimbriae biasanya digunakan secara bergantian untuk menggambarkan pelengkap tipis seperti rambut pada permukaan banyak bakteri Gram negatif dan protein pili disebut sebagai pilin. Pili terlihat lebih kaku daripada flagela. Pada beberapa organisme, seperti spesies *Shigella* dan *E. coli*, pili terdistribusi secara melimpah di atas permukaan sel, dengan jumlah sebanyak 200 per sel. Seperti yang mudah dikenali pada strain *E. coli*, pili dapat terdiri dari dua jenis: pili umum yang pendek dan melimpah, dan sejumlah kecil (satu hingga enam) pili yang sangat panjang yang dikenal sebagai pili seks. Pili seks dapat dibedakan berdasarkan kemampuannya untuk mengikat bakteriofag spesifik jantan (pili seks bertindak sebagai reseptor spesifik untuk bakteriofag ini. Pili kelamin

menempelkan bakteri jantan ke bakteri betina selama konjugasi.

Pili pada banyak bakteri enterik memberikan sifat perekat pada sel bakteri, memungkinkan mereka untuk menempel pada berbagai permukaan epitel, sel darah merah (menyebabkan hemaglutinasi), dan pada permukaan sel ragi dan jamur. Sifat perekat dari sel berpili ini memainkan peran penting dalam kolonisasi bakteri pada permukaan epitel dan oleh karena itu disebut sebagai faktor kolonisasi. Pili yang umum ditemukan pada *E. coli* menunjukkan spesifisitas gula yang serupa dengan fitohemaglutinin dan lektin, di mana daya rekat dan kemampuan hemaglutinasi organisme dihambat secara khusus oleh manosa. (Seifert HS, So M. 1988)

3. Kapsul

Banyak sel bakteri mengeluarkan beberapa bahan ekstraseluler dalam bentuk kapsul atau lapisan lendir. Lapisan lendir secara longgar berhubungan dengan bakteri dan dapat dengan mudah dibersihkan, sedangkan kapsul melekat erat pada bakteri dan memiliki batas-batas yang pasti. Kapsul dapat dilihat di bawah mikroskop cahaya dengan menempatkan sel dalam suspensi tinta India. Kapsul tidak menyerap tinta dan muncul sebagai lingkaran cahaya yang jelas di sekitar sel bakteri. Kapsul biasanya berupa polimer gula sederhana (polisakarida), meskipun kapsul *Bacillus anthracis* terbuat dari asam poliglutamat. Sebagian besar kapsul bersifat hidrofilik ("menyukai air") dan dapat membantu bakteri menghindari kekeringan (dehidrasi) dengan mencegah kehilangan air. Kapsul dapat melindungi sel bakteri dari konsumsi dan penghancuran oleh sel darah putih (fagositosis). Meskipun mekanisme yang tepat untuk lolos dari fagositosis belum jelas, hal ini dapat terjadi karena kapsul membuat komponen

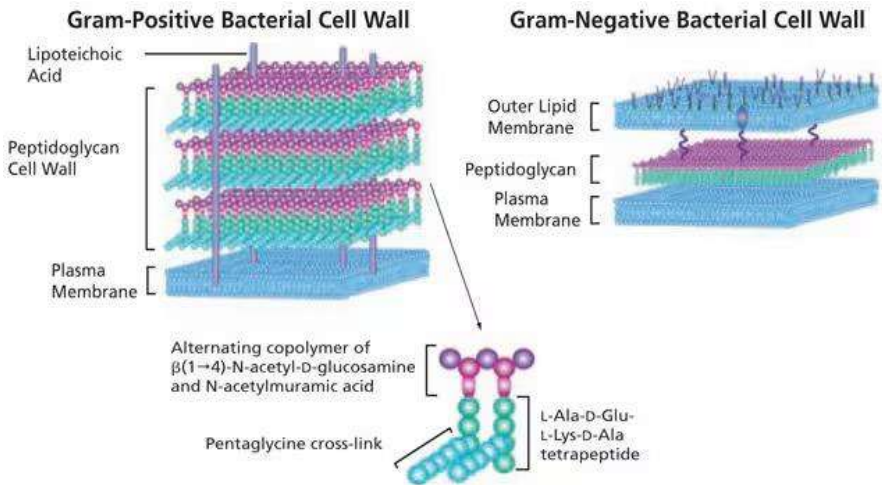
permukaan bakteri menjadi lebih licin, sehingga membantu bakteri untuk lolos dari telanan sel fagosit. Keberadaan kapsul pada *Streptococcus pneumoniae* adalah faktor terpenting dalam kemampuannya menyebabkan pneumonia. Strain mutan *S. pneumoniae* yang telah kehilangan kemampuan untuk membentuk kapsul akan dengan mudah diambil oleh sel darah putih dan tidak menyebabkan penyakit. Hubungan antara virulensi dan pembentukan kapsul juga ditemukan pada banyak spesies bakteri lainnya.

Pada bakteri *Streptococcus mutans*, lapisan kapsul dari bahan polisakarida ekstraseluler dapat membungkus bakteri ke dalam biofilm dan memiliki banyak fungsi. *Streptococcus mutans*, yang menyebabkan karies gigi, memecah sukrosa dalam makanan dan menggunakan salah satu gula untuk membangun kapsulnya, yang menempel erat pada gigi. Bakteri yang terperangkap di dalam kapsul menggunakan gula yang lain untuk bahan bakar metabolisme mereka dan menghasilkan asam yang kuat (asam laktat) yang menyerang email gigi. Ketika *Pseudomonas aeruginosa* menginfeksi paru-paru penderita fibrosis kistik, bakteri ini menghasilkan polimer kapsuler asam alginat yang tebal yang berkontribusi pada sulitnya membasmi bakteri tersebut (Scott, 2022).

4. Dinding Sel

Pewarnaan Gram secara luas membedakan bakteri menjadi kelompok Gram-positif dan Gram-negatif; beberapa organisme secara konsisten merupakan variabel Gram. Organisme Gram-positif dan Gram-negatif berbeda secara drastis dalam pengorganisasian struktur di luar membran plasma tetapi di bawah kapsul , pada organisme Gram-negatif, struktur ini membentuk selubung sel,

sedangkan pada organisme Gram-positif disebut dinding sel.



Gambar 3. 5. Struktur dasar peptidoglikan bakteri dan struktur dinding sel bakteri Gram positif dan Gram negatif
(Sumber : www.sigmaaldrich.com)

Dinding Sel: Bakteri Gram positif dan Gram negatif memiliki peptidoglikan dinding sel, yang memberikan bentuk sel yang khas dan memberikan perlindungan mekanis pada sel. Peptidoglikan unik untuk organisme prokariotik dan terdiri dari tulang punggung glycan dari asam muramat dan glukosamin (keduanya terasetilasi N), dan rantai peptida yang sangat terkait silang dengan jembatan pada bakteri Gram-positif (misalnya, *Staphylococcus aureus*) atau sebagian terkait silang pada bakteri Gram-negatif (misalnya, *Escherichia coli*). Enzim transpeptidase penghubung silang adalah beberapa target antibiotik β -laktam.

Jalur biosintesis peptidoglikan dimulai di dalam sitoplasma dengan sintesis prekursor peptapeptida muramil yang mengandung terminal D-Ala-D-Ala. L-Alanin

dikonversi menjadi D-alanin oleh racemase, dengan perakitan D-alanyl-D-alanin selanjutnya oleh D-Ala-D-Ala ligase. Di dalam sitoplasma, prekursor muramyl pentapeptida ditambahkan melalui gugus UDP-glukosamin yang larut dalam air. Pada tahap kedua konstruksi peptidoglikan, muramyl pentapeptida N-asetilglukosamin ditransfer ke undecaprenyl fosfat C55 dengan pelepasan UMP untuk membentuk perantara Lipid I. Langkah glikosilasi tambahan melengkapi unit peptidoglikan, yang kemudian diangkut melalui ekor lipid C55 ke permukaan periplasma eksternal membran, di mana unit peptidoglikan diintegrasikan ke dalam matriks dinding sel. Beberapa transpeptidase dan transglikosilase menghubungkan struktur peptidoglikan yang baru terbentuk ke matriks peptidoglikan dinding sel.

Penghambat biosintesis peptidoglikan bertindak sebagai antibiotik yang secara berurutan menyebabkan hilangnya peptidoglikan, hilangnya integritas dinding sel, dan lisis. Degradasi peptidoglikan dikatalisis oleh glikosidase, peptidase, dan amidase, termasuk enzim pelisis seperti lisozim, yang umumnya digunakan untuk mendegradasi dinding sel.

Senyawa antibakteri spesifik yang mengandung struktur β -laktam, seperti penisilin, mengganggu sintesis dinding sel, melemahkan perancah peptidoglikan di dalam dinding bakteri sehingga integritas struktural pada akhirnya gagal. Karena sel mamalia memiliki membran plasma tetapi tidak memiliki struktur dinding peptidoglikan, kelas antibakteri ini secara selektif menargetkan bakteri tanpa efek negatif yang signifikan terhadap sel inang mamalia. Kekhususan antibakteri β -laktam disebabkan oleh kemiripan strukturalnya dengan kelompok D-alil-D-alanin, yang memungkinkannya bersaing untuk mendapatkan tempat pengikatan

transpeptidase dan mencegah pembentukan lapisan peptidoglikan pada bakteri Gram positif dan Gram negatif. (Sigmaaldrich, 2023)

Peptidoglikan hanya terdapat pada bakteri (kecuali bakteri yang tidak memiliki dinding sel, seperti *Mycoplasma*). Peptidoglikan adalah polimer rantai panjang dari dua gula berulang (N-asetilglukosamin dan N-asetil asam muramat), di mana rantai gula yang berdekatan dihubungkan satu sama lain oleh jembatan peptida yang memberikan stabilitas yang kaku. Sifat jembatan peptida sangat berbeda di antara spesies bakteri, tetapi secara umum terdiri dari empat asam amino: L-alanin yang terhubung ke asam D-glutamat, terhubung ke asam diaminopimelat pada bakteri gram negatif atau L-lisin, L-ornithin, atau asam diaminopimelat pada bakteri gram positif, yang pada akhirnya terhubung ke D-alanin. Pada bakteri gram negatif, jembatan peptida menghubungkan D-alanin pada satu rantai dengan asam diaminopimelat pada rantai lainnya. Pada bakteri gram positif, mungkin ada rantai peptida tambahan yang memperluas jangkauan ikatan silang; misalnya, ada jembatan tambahan lima glisin pada *Staphylococcus aureus* (Jawetz, 2014).

Sintesis peptidoglikan adalah target dari banyak agen antimikroba yang berguna, termasuk antibiotik β -laktam (misalnya, penisilin) yang memblokir ikatan silang jembatan peptida. Beberapa protein yang disintesis oleh hewan sebagai faktor pertahanan antibakteri alami menyerang dinding sel bakteri. Sebagai contoh, enzim yang disebut lisozim memecah rantai gula yang merupakan tulang punggung molekul peptidoglikan. Tindakan salah satu agen ini melemahkan dinding sel dan mengganggu bakteri

Pada bakteri gram positif, dinding sel terutama terdiri dari jaring-jaring peptidoglikan tebal yang terjalin dengan polimer lain yang disebut asam teikoat (dari kata Yunani *teichos*, yang berarti "dinding") dan beberapa protein atau lipid. Sebaliknya, bakteri gram negatif memiliki dinding sel yang kompleks yang terdiri dari beberapa lapisan di mana lapisan membran luar terletak di atas lapisan peptidoglikan yang tipis. Membran luar ini terdiri dari fosfolipid, yaitu lipid kompleks yang mengandung molekul fosfat, dan lipopolisakarida, yaitu lipid kompleks yang berlabuh di membran luar sel pada ujung lipidnya dan memiliki rantai panjang gula yang memanjang dari sel ke dalam medium. Lipopolisakarida, yang sering disebut endotoksin, bersifat toksik bagi hewan dan manusia; keberadaannya dalam aliran darah dapat menyebabkan demam, syok, dan bahkan kematian. Untuk sebagian besar bakteri gram negatif, membran luar membentuk penghalang bagi masuknya banyak bahan kimia yang berbahaya bagi bakteri, seperti pewarna dan deterjen yang biasanya melarutkan membran sel. Ketidakmampuan terhadap senyawa yang larut dalam minyak tidak terlihat pada membran biologis lainnya dan merupakan hasil dari keberadaan lipopolisakarida dalam membran dan dari karakter yang tidak biasa dari protein membran luar. Sebagai bukti kemampuan membran luar untuk memberikan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang keras, beberapa bakteri gram negatif tumbuh dengan baik di dalam lapisan minyak, tangki bahan bakar jet, air buangan tambang yang mengandung asam, dan bahkan botol disinfektan.

Asam Teikoat: Asam teikoat adalah polimer poliol fosfat yang memiliki muatan negatif yang kuat. Mereka secara kovalen terkait dengan peptidoglikan pada beberapa bakteri Gram positif. Mereka sangat antigenik, tetapi umumnya tidak ada pada bakteri Gram negatif.

Asam Lipoteikoat: Asam lipoteikoat sebagai asam teikoat membran adalah polimer glikofosfat amfifilik dengan glikolipid lipofilik dan berlabuh di membran sitoplasma. Asam teikoat bersifat antigenik, sitotoksik, dan adhesin (misalnya, *Streptococcus pyogenes*).

Asam teikoat dinding hanya ditemukan pada bakteri Gram positif tertentu (seperti stafilokokus, streptokokus, laktobasilus, dan *Bacillus* spp.); sejauh ini, asam teikoat belum ditemukan pada organisme gram negatif. Asam teikoat adalah polimer poliol fosfat, dengan ribitol atau gliserol yang dihubungkan oleh ikatan fosfodiester

Lipopolisakarida: Salah satu komponen utama membran luar bakteri Gram negatif adalah lipopolisakarida (endotoksin), sebuah molekul kompleks yang terdiri dari jangkar lipid A, inti polisakarida, dan rantai karbohidrat. Gula dalam rantai polisakarida memberikan kekhususan serologis. (James Wagstaff, 2018).

3.3.2 Struktur Intaseluler

1. Membran Plasma (cytoplasmic membrane)

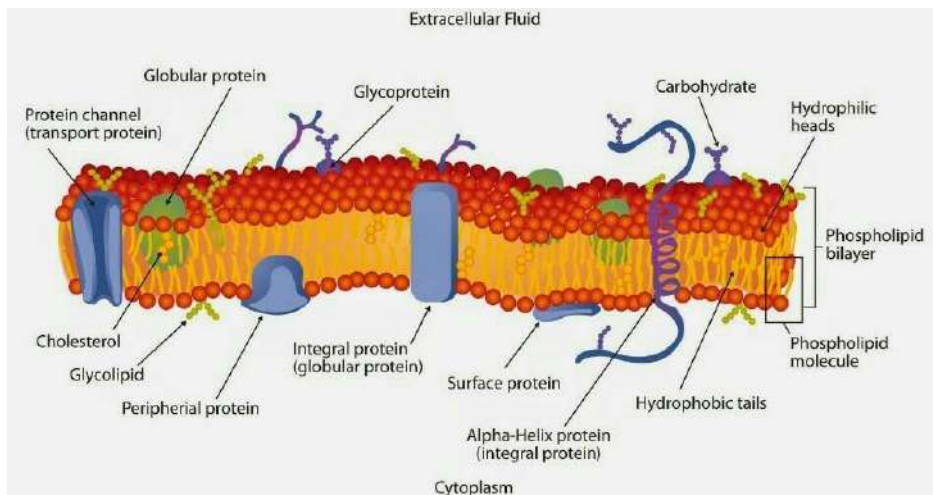
Membran plasma bakteri terutama terdiri dari protein dan fosfolipid. Membran plasma memiliki banyak fungsi, termasuk transportasi, biosintesis, dan transduksi energi.

Membran plasma bakteri, yang secara fungsional setara dengan membran plasma eukariotik, disebut secara beragam sebagai membran sitoplasma, protoplas, atau (pada organisme Gram negatif) membran dalam. Mirip dalam dimensi keseluruhan dan penampilan di bagian tipis dengan biomembran dari sel eukariotik, mereka terutama terdiri dari protein dan lipid (terutama fosfolipid). Rasio protein dan lipid dari membran plasma bakteri adalah sekitar 3: 1, mendekati rasio membran mitokondria. Tidak seperti membran sel eukariotik, membran bakteri (kecuali

untuk spesies *Mycoplasma* dan bakteri metilotrofik tertentu) tidak memiliki sterol, dan bakteri tidak memiliki enzim yang diperlukan untuk biosintesis sterol.

Meskipun komposisinya mirip dengan membran dalam spesies Gram-negatif, membran sitoplasma dari bakteri Gram-positif memiliki kelas makromolekul yang tidak ada pada membran Gram-negatif. Banyak membran bakteri Gram positif mengandung asam lipoteichoic yang terikat membran, dan spesies yang tidak memiliki komponen ini (seperti *Micrococcus* dan *Sarcina* spp.) mengandung lipomanan suksinat yang terikat membran yang serupa. Asam lipoteikoat secara struktural mirip dengan asam teikoat gliserol dinding sel karena memiliki rantai penghubung fosfodiester poligliserol basal 1-3.

Berbagai fungsi dilakukan oleh membran plasma bakteri Gram positif dan Gram negatif. Fungsi membran plasma merupakan tempat transpor: aktif, pasif, dan translokasi grup. Sebagai komponen rantai pernapasan, sistem penghantar energi, H⁺-ATPase dari pompa proton dan tahap membran dalam biosintesis fosfolipid, peptidoglikan, LPS, dan polisakarida kapsuler. Pada dasarnya, membran sitoplasma bakteri adalah struktur multifungsi yang menggabungkan fungsi transportasi mitokondria dan biosintesis yang biasanya terkotak-kotak dalam organel membran terpisah dalam sel eukariotik. Membran plasma juga merupakan tempat penahan DNA dan menyediakan sel dengan mekanisme (yang belum diketahui) untuk pemisahan kromosom saudara (Jawetz,*et.al*,2014).



Gambar 3. 6. Struktur Membran Plasma Model Mozaik

(Sumber : <https://brainly.co.id>)

2. *Sitoplasma*

Sitoplasma, merupakan substansi semifluida sel yang berada di luar membran inti dan di dalam membran seluler, kadang-kadang digambarkan sebagai kandungan non inti dari protoplasma. Sitoplasma bakteri padat dengan ribosom 70S. Butiran lain mewakili cadangan metabolisme (misalnya, poli- β -hidroksibutirat, polisakarida, polimetafosfat, dan butiran metakromatik).

Sitoplasma bakteri mengandung enzim, metabolit, dan garam dalam konsentrasi tinggi. Selain itu, protein sel dibuat pada ribosom yang tersebar di seluruh sitoplasma. Ribosom bakteri berbeda dengan ribosom pada sel eukariotik karena ukurannya lebih kecil, memiliki lebih sedikit konstituen (terdiri dari tiga jenis ribosomal RNA [rRNA] dan 55 protein, dibandingkan dengan empat jenis rRNA dan 78 protein pada eukariotik), dan dihambat oleh antibiotik yang berbeda dari antibiotik yang bekerja pada ribosom eukariotik.

Ada banyak badan inklusi, atau butiran, di dalam sitoplasma bakteri. Badan-badan ini tidak pernah tertutup oleh membran dan berfungsi sebagai wadah penyimpanan. *Glikogen*, yang merupakan polimer glukosa, disimpan sebagai cadangan karbohidrat dan energi. *Volutin*, atau butiran metakromatik, mengandung fosfat terpolimerisasi dan merupakan bentuk penyimpanan fosfat anorganik dan energi. Banyak bakteri memiliki tetesan lipid yang mengandung ester polimer asam poli- β -hidroksibutirat atau senyawa terkait. Hal ini berbeda dengan eukariota, yang menggunakan tetesan lipid untuk menyimpan trigliserida. Pada bakteri, butiran penyimpanan diproduksi di bawah kondisi pertumbuhan yang menguntungkan dan dikonsumsi setelah nutrisi habis dari media. Banyak bakteri air menghasilkan *vakuola gas*, yang merupakan struktur terikat protein yang mengandung udara dan memungkinkan bakteri menyesuaikan daya apungnya. Bakteri juga dapat memiliki struktur membran internal yang terbentuk sebagai hasil dari membran sitoplasma (Fatmawati, 2022).

3. *Nucleoid dan Materi genetik*

Sel prokariotik dan eukariotik pada awalnya dibedakan berdasarkan struktur: nukleoid prokariotik yang setara dengan nukleus eukariotik secara struktural lebih sederhana daripada nukleus eukariotik yang sebenarnya, yang memiliki peralatan mitosis yang kompleks dan membran nukleus di sekitarnya. Nukleoid bakteri, yang mengandung fibril DNA, tidak memiliki membran pembatas. Di bawah mikroskop cahaya, nukleoid sel bakteri dapat divisualisasikan dengan bantuan pewarnaan Feulgen, yang mewarnai DNA. Lisis dapat digunakan untuk mengisolasi nukleoid sebagian besar sel bakteri. DNA kemudian terlihat sebagai molekul melingkar "raksasa" tunggal yang berkesinambungan dengan berat molekul

sekitar 3 X. DNA nukleus yang tidak dilipat akan memiliki panjang sekitar 1 mm (dibandingkan dengan panjang rata-rata 1 hingga 2 μm untuk sel bakteri)

Nukleoid bakteri, adalah struktur yang mengandung kromosom tunggal. Jumlah salinan kromosom ini dalam sel tergantung pada tahap siklus sel (replikasi kromosom, pembesaran sel, pemisahan kromosom, dll). Meskipun mekanisme pemisahan dua kromosom saudara setelah replikasi tidak sepenuhnya dipahami, semua model yang diusulkan mengharuskan kromosom melekat secara permanen pada membran sel selama berbagai tahap siklus sel.

Kromatin bakteri tidak mengandung protein histon dasar, tetapi poliamina dengan berat molekul rendah dan ion magnesium dapat memenuhi fungsi yang mirip dengan histon eukariotik. Terlepas dari perbedaan antara DNA prokariotik dan eukariotik, DNA prokariotik dari sel yang terinfeksi bakteriofag γ , ketika divisualisasikan dengan mikroskop elektron, memiliki tampilan seperti manik-manik dan kental yang tidak berbeda dengan kromatin eukariotik.

Informasi genetik semua sel berada dalam urutan basa nitrogen dalam molekul DNA yang sangat panjang. Berbeda dengan DNA dalam sel eukariotik, yang berada di dalam nukleus, DNA dalam sel bakteri tidak diasingkan dalam organel yang terikat membran, tetapi muncul sebagai gulungan panjang yang didistribusikan melalui sitoplasma. Pada banyak bakteri, DNA hadir sebagai kromosom melingkar tunggal, meskipun beberapa bakteri mungkin mengandung dua kromosom, dan dalam beberapa kasus, DNA berbentuk linier daripada melingkar. Sejumlah molekul DNA yang lebih kecil dan biasanya berbentuk

lingkaran (meskipun terkadang berbentuk linier), yang disebut plasmid, dapat membawa informasi tambahan.

Urutan basa dalam DNA telah ditentukan untuk ratusan bakteri. Jumlah DNA dalam kromosom bakteri berkisar antara 580.000 pasangan basa pada *Mycoplasma genitalium* hingga 4.700.000 pasangan basa pada *E. coli* hingga sekitar 9.450.000 pasangan basa pada *Myxococcus xanthus*. *Sorangium cellulosum*, sebuah myxobacterium, memiliki salah satu genom bakteri terbesar, yang mengandung lebih dari 13 juta pasangan basa. Panjang kromosom *E. coli*, jika dikeluarkan dari sel dan direntangkan secara maksimal, adalah sekitar 1,2 mm, yang sangat mencolok mengingat fakta bahwa panjang sel sekitar 0,001 mm.

Seperti pada semua organisme, DNA bakteri mengandung empat basa nitrogen yaitu adenin (A), sitosin (C), guanin (G), dan timin (T). Aturan pasangan basa untuk molekul DNA untai ganda mengharuskan jumlah basa adenin dan timin sama dan jumlah basa sitosin dan guanin juga sama. Hubungan antara jumlah pasangan basa G dan C serta jumlah pasangan basa A dan T merupakan indikator penting perubahan genetik yang bersifat evolusioner dan adaptif di dalam suatu organisme. Proporsi, atau rasio molar, dari G + C dapat diukur sebagai G + C dibagi dengan jumlah semua basa (A + T + G + C) dikalikan 100 persen. Sejauh mana rasio G + C bervariasi di antara organisme mungkin cukup besar. Pada tumbuhan dan hewan, proporsi G + C adalah sekitar 50 persen. Kisaran yang jauh lebih luas dalam proporsi G + C terlihat pada prokariota, mulai dari sekitar 25 persen pada sebagian besar *Mycoplasma* hingga sekitar 50 persen pada *E. coli* hingga hampir 75 persen pada *Micrococcus*, aktinomisetes, dan myxobacteria yang berbuah. Kandungan G + C dalam suatu spesies dalam satu genus, bagaimanapun, sangat mirip (Milton, 2023).

4. Mesosom

Bagian tipis dari bakteri Gram-positif menunjukkan adanya struktur membran vesikular atau tubular-vesikular yang disebut *mesosom*, yang tampaknya dibentuk oleh invaginasi membran plasma. Struktur ini jauh lebih menonjol pada Gram-positif dibandingkan dengan organisme Gram-negatif. Pada suatu waktu, vesikula mesosom dianggap setara dengan mitokondria bakteri; namun, banyak fungsi membran lainnya juga telah dikaitkan dengan mesosom. Saat ini, tidak ada bukti yang memuaskan yang menunjukkan bahwa mereka memiliki fungsi biokimia atau fisiologis yang unik. Memang, studi mikroskopis elektron telah menyarankan bahwa mesosom, seperti yang biasanya terlihat pada bagian yang tipis, dapat muncul dari gangguan membran dan artefak fiksasi. Namun, tidak ada kesepakatan umum tentang teori ini, dan beberapa bukti menunjukkan bahwa mesosom mungkin terkait dengan peristiwa dalam siklus pembelahan sel.

5. Endospora

Endospora adalah sel istirahat yang sangat tahan panas dan dehidrasi yang terbentuk secara intraseluler pada anggota genera *Bacillus* dan *Clostridium*. Sporulasi, proses pembentukan endospora, adalah sifat yang tidak biasa dari bakteri tertentu. Serangkaian perubahan biokimia dan morfologi yang terjadi selama sporulasi merupakan diferensiasi yang sebenarnya dalam siklus sel bakteri. Proses yang biasanya dimulai pada fase stasioner dari siklus sel vegetatif ini dimulai dengan menipisnya nutrisi (biasanya sumber karbon atau nitrogen yang dapat digunakan dengan mudah, atau keduanya). Sel kemudian mengalami rangkaian peristiwa morfologi dan biokimia yang sangat kompleks dan terdefinisi dengan baik yang

pada akhirnya mengarah pada pembentukan endospora dewasa (Michael,2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Lesli J Favor. 2014. *"How Eukaryotic and Prokaryotic Cells Differ (Britannica Guide to Cell Biology)"*. Rosen Publishing.
- Frantisek Baluska *et. al.* July 2004, *"Eukaryotic Cells and their Cell Bodies: Cell Theory Revised"*. Annals of Botany. Volume 94. <https://doi.org/10.1093/aob/mch109>
- James Wagstaff & Jan Lowe. January 2018. *"Prokaryotic cytoskeletons: protein filaments organizing small cells"*, Nature Reviews Microbiology. Volume 16. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.153> .
- Avadhesha Surolia & Abhijit Chakrabarti. 2014, *"Biochemical Roles of Eukaryotic Cell Surface Macromolecules"*. Springer International Publishing,.
- Scott Dutfield, Traci Pedersen, *Discover The Structural And Functional Difference Between Prokaryotic And Eukaryotic Cells ..* <https://www.livescience.com/65922-prokaryotic-vs-eukaryotic-cells.html>. Published January 18, 2022.
- Robert J. Kadner, Kara Rogers. Encyclopedia of Britannica : Bacteria. Published 1 Oct 2023. <https://www.britannica.com/science/bacteria>
- Biology: *The Fundamental of Life : Cell Size, Number And Shape*. <https://www.toppr.com/ask/content/concept/cell-number-and-shape-200249/>
- Milton R.J. Salton and Kwang-Shin Kim. *Medical Microbiology. 4th edition ;Chapter 2. Structure*. Penerbit. University of Texas Medical Branch at Galveston. 1996. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books>. Diunduh Okt 2023.
- Seifert HS, So M. *Genetic mechanisms of bacterial antigenic variation*. Microbiol Rev. 1988;52:327. [PMC free article] [PubMed]

- Sigma aldrich. 2023. *Peptidoglycan Structure, Biosynthesis and Function* Merck KGaA, Darmstadt, Germany.
<https://www.sigmaaldrich.com/ID/en/technical-documents/technical-article/protein-biology/protein-labeling-and-modification/peptidoglycans>.
- Jawetz, Melnick, & Adelberg. 2017. *Mikrobiologi Kedokteran*. Penerbit EGC. Jakarta.
- Fatmawati, Andi. Hasria, Alang, dkk. 2022. *Biologi Sel dan Molekuler*. Hamjah Diha Foundation. NTB.
- Fatmawati, Andi., Faizal Faturohim, dkk. 2023. *Mikrobiologi Lingkungan*. PT. Global Eksekutif Teknologi. Padang.
- Michael W. Davidson. 2022. *Bacteria Cell Structure*. The Florida State University.

BAB 4

PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN BAKTERI

Oleh Revita Permata Hati

4.1 Pendahuluan

Seiring berjalannya waktu, mikroorganisme telah dipelajari berkat kepentingan mendasarnya dalam pemeliharaan berbagai fungsi dan jasa ekosistem di biosfer (Delgado-Baquerizo et al., 2016). Mikroorganisme merupakan bagian penting dari kesejahteraan manusia, antara lain berperan dalam bidang kedokteran, pertanian, akuakultur, industri makanan, dan bioteknologi (Weng et al., 2005; Díaz-Rodríguez et al., 2017). Sejak mikrobiota ditemukan di setiap tempat di planet ini, mikrobiota memainkan peran penting dalam ekosistem, seperti; (i) keberlanjutan sosial dan ekologi, (ii) adaptasi dan mitigasi perubahan iklim, (iii) sebagai sumber daya bioteknologi bagi umat manusia, (iv) siklus air dan nutrisi, dan (v) peningkatan produksi pangan (Kalia dan Gupta, 2005; Pajares et al., 2016).

Mikrobiologi penting untuk keamanan pangan (makanan dan minuman), produksi, pengolahan, pengawetan, dan penyimpanan. Mikroba seperti bakteri, jamur, dan ragi digunakan untuk produksi pangan dan bahan pangan seperti produksi anggur, bir, roti, dan produk susu. Di sisi lain, pertumbuhan dan kontaminasi mikroorganisme pembusuk dan patogen dianggap sebagai salah satu penyebab utama hilangnya bahan pangan saat ini (Lorenzo et al., 2018).

Meskipun teknologi, strategi higienis, dan ketertelusuran merupakan faktor penting untuk mencegah dan menunda pertumbuhan dan kontaminasi mikroba. Pangan tetap rentan terhadap pembusukan dan aktivitas mikroorganisme patogen. Hilangnya pangan karena pembusukan atau pangan yang terkontaminasi berdampak pada industri pangan dan konsumen yang menyebabkan kerugian ekonomi dan peningkatan biaya rawat inap (Lorenzo et al., 2018).

Pengetahuan tentang komposisi, asal, pH, aktivitas air (a_w) dalam kondisi pangan dan penyimpanan (misalnya, suhu, atmosfer, dan tekanan). Kemudian Pengetahuan tentang informasi mengenai karakteristik mikroorganisme yang paling umum. Serta Pengetahuan tentang resistansinya dapat memprediksi komposisi mikroflora selama pemrosesan dan penyimpanan dalam kondisi pangan (Lorenzo et al., 2018).

Mikroorganisme berkembang biak dan atau tumbuh saat berada dalam lingkungan yang sesuai. Media yang sesuai untuk pertumbuhan berbagai jenis mikroorganisme misalnya pangan. Pangan memiliki beragam nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroorganisme. Pertumbuhan isolat strain mikroba memiliki keterkaitan mulai dari morfologi, fisiologi, biokimia, karakteristik genetik, metode untuk menghambat dan atau menstimulasi pertumbuhan dan mematikan mikroba (Sopandi dan Wardah, 2014).

4.2 Perkembangan Bakteri

Bakteri ditemukan oleh Antoni van Leeuwenhoek. Hal tersebut memiliki kontribusi terbesar terhadap biologi. Penemuan tersebut dihasilkan dari peristiwa kebetulan yang dimulai dari ketertarikannya pada indera perasa. Sementara, Louis Pasteur melakukan pengamatan pertama terhadap kehidupan mikroba tanpa adanya gas oksigen dan anaerobic

lifestyle (Gest, 2004). Ahli biologi, Woese mengemukakan bahwa terdapat tiga kerajaan atau domain dalam dunia biologis.

Domain tersebut yaitu Eukarya (sel dengan inti, termasuk tumbuhan dan hewan dan jamur), Bakteri, dan Archaea. Domain kehidupan sebagian besar spektrum keragaman genetik milik mikroba. Dengan kata lain, pohon kehidupan tiga domain menjelaskan sebagian besar keanekaragaman kehidupan adalah mikroba. Mikroba memiliki metabolisme, dapat hidup di lingkungan yang tidak bersahabat dan tidak bersahabat, ditemukan di setiap habitat dan keragaman sumber daya genetiknya (ASM, 2004).

Mikroorganisme dapat diklasifikasikan dalam kelompok biologis besar mulai dari ganggang atau algae, protozoa, kapang berlendir atau slime moulds, jamur atau fungi, archaea, viruses hingga protista. Ahli mikrobiologi umumnya peduli dengan identifikasi dalam penamaan isolat yang benar sesuai dengan Taksonomi. Taksonomi adalah klasifikasi, nomenklatur dan identifikasi mikroba (ganggang, protozoa, jamur lendir, jamur, bakteri, archaea dan virus). Komponen-komponen tersebut berkaitan dengan evolusi, genetika dan spesiasi organisme, dan sering disebut sebagai filogenetik. Penamaan organisme berdasarkan genus dan spesies diatur oleh kode internasional (Pitt and Barer 2012).

Mikroba (juga dikenal sebagai mikroorganisme) ada di mana-mana. Keberadaannya ada di permukaan yang manusia sentuh, di udara yang manusia hirup, dan bahkan di dalam diri manusia. Seperti yang disarankan oleh namanya, semua mikroba terlalu kecil untuk dilihat tanpa mikroskop. Di luar ukuran, mikroba sangat beragam (SITN, 2020).

Di satu sisi, ada banyak mikroba berbahaya yang manusia coba hindari. Bakteri patogen seperti *Listeria monocytogenes* dan *Salmonella enterica* yang menyebabkan penyakit bawaan pangan. Pertumbuhan mikroba tersebut dapat diperlambat

dengan menggunakan pendinginan di lemari es dan menjaga pangan tetap aman untuk dimakan dan atau dikonsumsi (SITN, 2020).

Di sisi lain, beberapa mikroba melakukan fungsi yang berguna dan sengaja membudidayakannya. Misalnya, pada pembuatan roti menggunakan suhu hangat untuk mendorong pertumbuhan ragi *Saccharomyces cerevisiae* untuk membuat adonan roti mengembang. Beberapa mikroba dapat berbahaya atau bermanfaat dalam kondisi yang berbeda. Misalnya, *Escherichia* dapat menyebabkan penyakit gastrointestinal jika tertelan, namun dapat menghasilkan insulin sintesis yang menyelamatkan jiwa dalam pengaturan industri dan atau lingkungan industri. Memahami pertumbuhan mikroba yang menarik serta menakutkan membantu manusia mengembangkan praktik untuk mempertahankan interaksi yang seimbang dengan mikroorganisme tersebut (SITN, 2020).

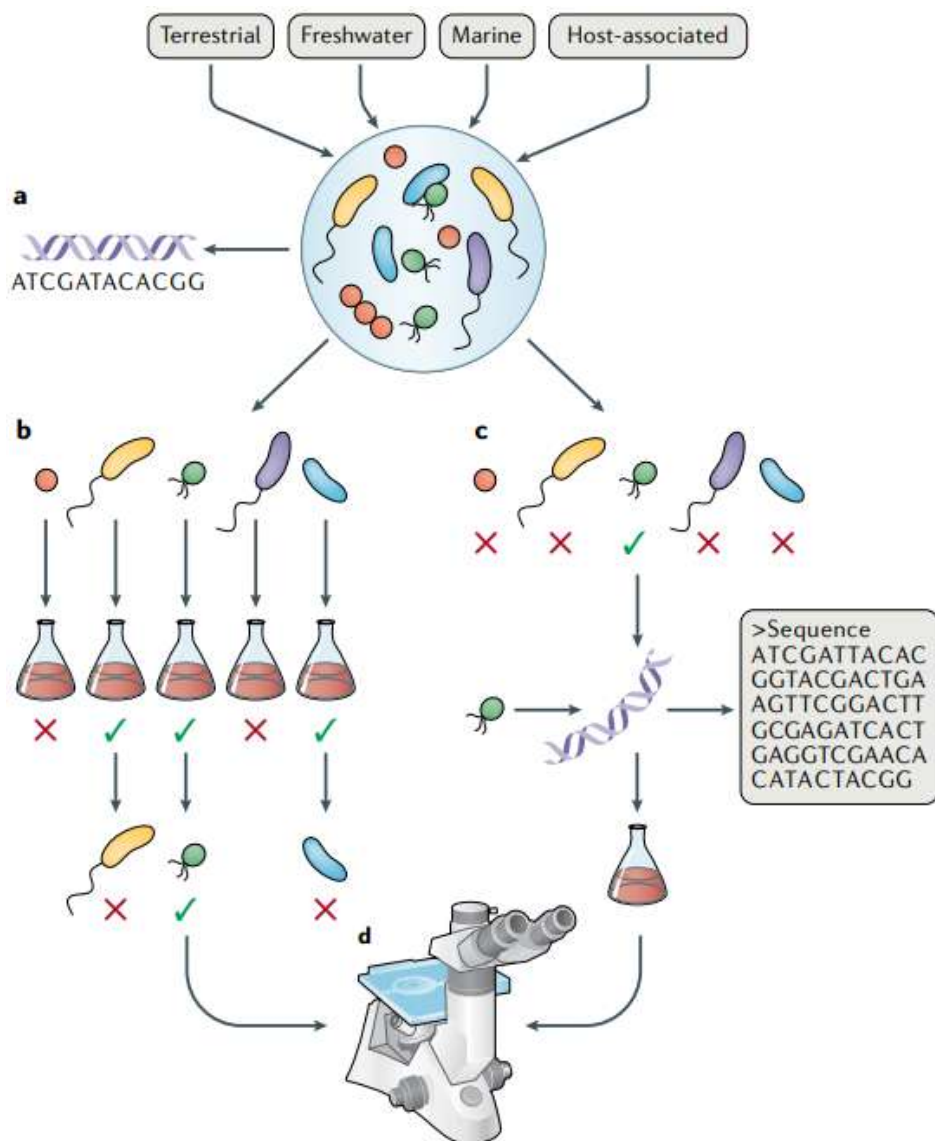
Mikroorganisme memiliki peran dalam pangan untuk mempelajari dan mengendalikannya, penting untuk mengisolasi mikroorganisme dalam kultur murni dan mempelajari karakteristik morfologi, fisiologi, biokimia, dan genetiknya. Beberapa teknik paling sederhana yang digunakan saat telah dikembangkan selama 300 tahun terakhir seperti teknik umum mikrobiologi yang berkaitan dengan penyiapan dan sterilisasi media, pewarnaan, dan teknik pewarnaan. Selain itu teknik yang terlibat dalam kultur mikroorganisme, termasuk persiapan dan sterilisasi media kultur dan isolasi kultur murni dengan teknik aseptik menggunakan streaking method, pour-plate, spread-plate, dan subculture techniques. Selanjutnya pencacahan mikroorganisme dengan metode langsung (penghitungan mikroskopis langsung) dan metode tidak langsung seperti standard plate count pewarnaan, dan teknik pewarnaan. Selain itu dengan adanya powerful teknologi terbaru mulai dari novel imaging techniques, genomics, proteomics, nanotechnology, rapid DNA sequencing, hingga massive computational

capabilities (Ray, 2004; Ogoto et al., 2021; Ogoto et al., 2022; ASM, 2004).

Kelompok utama bakteri sebagian besar dibedakan oleh pengamatan mikroskopis morfologi dan reaksi pewarnaan mereka. Prosedur pewarnaan Gram, yang mencerminkan perbedaan mendasar dalam struktur dinding sel, memisahkan sebagian besar bakteri menjadi dua divisi besar. Selain itu, bakteri Gram positif atau negatif, berbentuk basil atau kokus, kemampuan tumbuh secara aerobik atau anaerobik dan kemampuan membentuk spora (Pitt and Barer 2012).

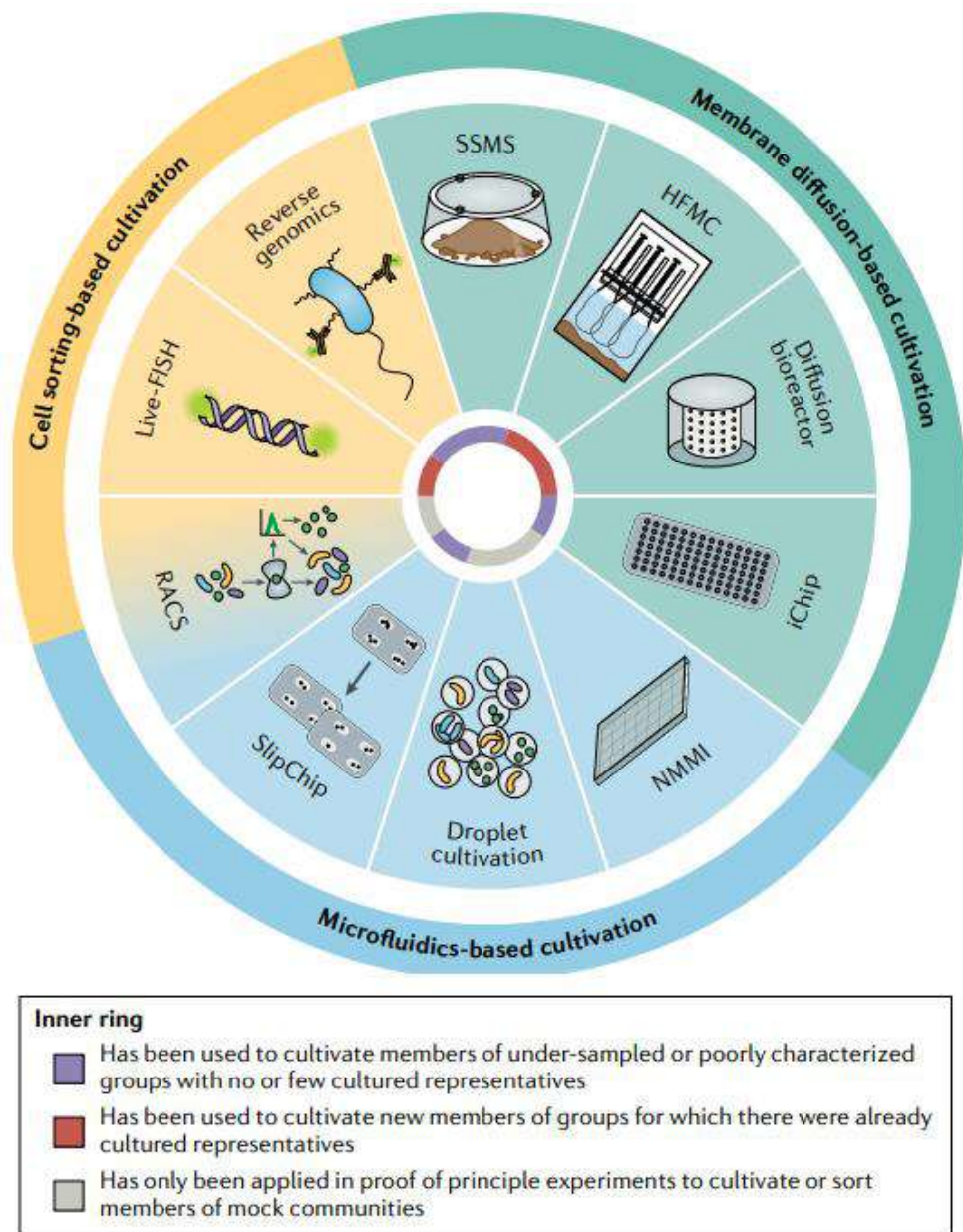
Kedua divisi tersebut yaitu bakteri Gram-positif dan bakteri Gram-negatif. Di mana bakteri dapat diwarnai dengan pewarnaan Gram, bentuk sel dan pengelompokan memiliki nilai praktis dalam identifikasi. Namun, pada titik ini hubungan sistem klasifikasi yang lebih tua, sebagian besar fenotipik, dengan klasifikasi filogenetik berbasis urutan DNA yang lebih baru, yang mencerminkan hubungan evolusi antar kelompok, mulai rusak dan anomali terlihat jelas (Pitt and Barer 2012).

Metode terkini dengan teknik inovatif bertujuan untuk meningkatkan laju isolasi mikroorganisme yang diinginkan secara luas mengikuti setidaknya satu dari dua strategi utama (Gambar 4.1). Peningkatan laju isolasi mikroorganisme tersebut mengandalkan peningkatan jumlah isolasi sel untuk meningkatkan peluang mengisolasi spesies yang menarik (isolasi dan kultur keluaran atau deret tinggi), atau bertujuan untuk mengisolasi organisme secara selektif dengan karakteristik fungsional tertentu atau yang termasuk dalam kelompok taksonomi tertentu (isolasi yang ditargetkan) (Lewis et al., 2020).



Gambar 4. 1. Alur kerja untuk mengisolasi mikroorganisme baru untuk kultur menggunakan pendekatan keluaran atau deretan tinggi atau bertarget (Lewis et al., 2020).

Alur kerja tersebut berawal dari penapisan habitat berbasis pengurutan dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi dengan jumlah organisme target yang relatif tinggi, diikuti dengan pengumpulan sampel sel dari lokasi tersebut (Gambar 1a). Pendekatan throughput tinggi dapat dicapai dengan menginokulasi media dengan sel tunggal untuk membentuk monokultur dalam jumlah besar, menginkubasi kultur dan kemudian menyaring pertumbuhannya, diikuti dengan menyaring kultur yang layak untuk kultur yang mengandung spesies yang diinginkan (Gambar 4.1b). Pendekatan yang ditargetkan bergantung pada isolasi sel-sel yang termasuk dalam kelompok taksonomi atau fungsional tertentu (Gambar 4.1c). Hingga isolat yang dikultur dapat digunakan untuk karakterisasi hilir dan eksperimen untuk menyelidiki biologinya (Gambar 4.1d). Selain itu, Metode yang termasuk dalam isolasi dan kultur keluaran atau deret tinggi dan isolasi yang ditargetkan tersaji pada Gambar 4.2 di bawah ini (Lewis et al., 2020).



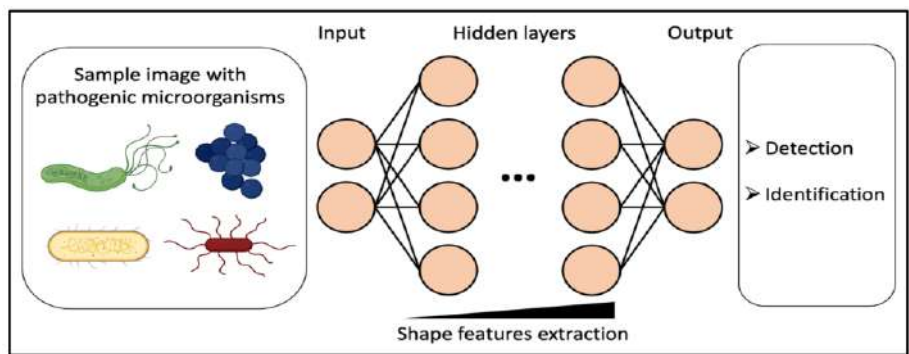
Gambar 4. 2. Metode inovatif untuk isolasi dan kulturisasi mikroorganisme baru (Lewis et al., 2020).

Metode budidaya berbasis difusi membran (Gambar 4.2 warna hijau), seperti i(isolation)Chip60, hollow-fibre membrane chambers (HFMC)61, diffusion bioreactors77 atau soil substrate membrane system (SSMS)71,72; menggunakan membran permeabel yang memungkinkan nutrisi dan metabolitnya berdifusi ke dalam media kultur dan dengan demikian lebih memimikkan kondisi alami selama kultur. Metode kultivasi atau kultur berbasis mikrofluida (Gambar 2 warna biru), seperti inkubator mikroba skala nanopori (NMMI)63 atau SlipChip78,79; mampu memanipulasi sel dalam volume kecil dan jumlah replikasi yang besar, dan juga dapat dikombinasikan dengan berbagai droplet cultivation methods. Teknik berbasis penyortiran sel (Gambar 4.2 warna kuning), seperti Raman-activated cell sorting (RACS)98,100; fluorescence in situ hybridization of live cells (live-FISH)97 atau reverse genomics17, memberikan cara untuk menargetkan subset sel fungsional atau subset sel taksonomi untuk isolasi (Lewis et al., 2020).

Selain itu, terdapat Metode Pengambilan Sampel Berbasis Mikroskopi dengan kemajuan terkini dalam kecerdasan buatan (artificial intelligence/AI), dan lebih khusus lagi pembelajaran mendalam, membuka jalan menuju analisis gambar yang otomatis dan kuat. Hal ini juga berlaku untuk analisis gambar mikroskopis, dan pembelajaran mendalam diterapkan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi mikroorganisme (Gutleben et al., 2018; Sauer and Wang, 2019).

Bahkan, terdapat pengembangan metode analisis fisik dan komputer seperti pembelajaran mendalam (deep learning) adalah bagian dari keluarga besar jaringan syaraf tiruan (artificial neural networks/ANN). ANN terinspirasi oleh fungsi otak, dengan neuron-neuron yang disusun dalam lapisan-lapisan berturut-turut yang terhubung di antara keduanya (Gambar 4.3), mulai dari masukan (misalnya gambar) hingga keluaran (misalnya keberadaan bakteri). Dengan melatih ANN pada data berlabel (misalnya gambar bakteri yang dikenal atau diketahui), ANN

dapat menemukan pola yang memungkinkan ANN mengenali data yang tidak diketahui setelahnya. Pembelajaran mendalam mengacu pada ANN dengan banyak lapisan yang berurutan dan ANN yang sesuai disebut jaringan saraf dalam (deep neural networks/DNN). Struktur seperti DNN baru dimungkinkan berkat pengembangan kekuatan komputasi (Prada et al., 2022).



Gambar 4. 3. Diagram pembelajaran mendalam yang diterapkan pada deteksi dan identifikasi mikroorganisme pada gambar mikroskopis (Prada et al., 2022).

Dalam hal analisis gambar, DNN mampu mengekstrak fitur bentuk gambar. Fitur berbentuk gambar tersebut untuk mengklasifikasikannya berdasarkan label yang telah ditentukan sebelumnya (misalnya, spesies bakteri berbeda). Selain itu, untuk mengekstrak sejumlah gambar (misalnya, konsentrasi pada bakteri) (Prada et al., 2022).

Di hampir semua bidang analisis gambar, pembelajaran mendalam telah terbukti lebih akurat dibandingkan metode lain, dan bahkan lebih akurat daripada mata manusia untuk beberapa aplikasi (Su et al., 2019). Pembelajaran mendalam terutama digunakan untuk klasifikasi objek. Pembelajaran mendalam di bidang mikrobiologi digunakan untuk mengidentifikasi berbagai spesies virus (Hatzenpichler et al., 2020), bakteri (Tillich et al.,

2014; Bassi and Benson, 2007), fungi (Tahon and Willems, 2017), atau parasit (Thrash, 2017).

Studi-studi tersebut mencakup analisis berbagai modalitas mikroskop seperti electron microscopy (untuk virus), fluorescence microscopy, brightfield microscopy,, atau bahkan vibrational microspectroscopy. Analisis berbagai modalitas mikroskop tersebut dilatih pada kumpulan data berlabel, jaringan saraf dalam kemudian dapat mengidentifikasi mikroorganisme berdasarkan bentuk atau spektrumnya untuk gambar spektroskopi (Prada et al., 2022).

DNN dapat mendeteksi bakteri secara otomatis pada bidang pandang yang luas, dan membedakannya dengan partikel lain. Beberapa DNN dapat digabungkan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi sel tunggal dari lima strain bakteri (*Campylobacter*, *E. coli*, *Listeria*, *Salmonella*, dan *Staphylococcus*) dari gambar visible spectroscopy (Schrader et al., 2012). Selain itu, penggunaan DNN untuk mendeteksi pertumbuhan bakteri di dalam cawan agar dari gambar mikroskop koheren yang diambil setiap 30 menit. Tiga strain (*E. coli*, *Klebsiella aerogenes*, dan *Klebsiella pneumoniae*) diuji untuk deteksi dan identifikasi selanjutnya, dengan LOD ~ 1 CFU/L dalam waktu kurang dari 9 jam (Kim and Chun, 2014).

Pembelajaran mendalam memungkinkan analisis gambar yang lebih baik untuk meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas dalam deteksi. Basis data publik dari berbagai jenis mikroorganisme bermunculan (Gutleben et al., 2018), yang memungkinkan penggunaannya dalam pembelajaran mendalam yang lebih luas untuk mikrobiologi. Pembelajaran mendalam terutama dilakukan pada isolat, dan akan menarik untuk memperluasnya pada bakteri dalam lingkungan yang kompleks (Prada et al., 2022).

Meskipun Raman spectroscopy memerlukan waktu lama untuk menganalisis dan memproses data di masa lalu, Raman spectroscopy ini menjadi cepat dan sangat sensitif berkat pembelajaran mendalam. Selain itu dengan ada lahirnya sistem referensi resmi untuk mikroorganisme, metode Raman akan menjadi suatu keharusan dalam pengendalian mutu advanced therapy medicinal products (ATMP). Tambahan lagi metode lainnya mulai dari Broad-Spectrum Ligand, Aptamer and DNzyme, Antimicrobial peptides (AMPs), Paper Sensors, Microfluidics, Sorting by Acoustophoresis, Droplet microfluidics, 3D particle counter, Integrated Comprehensive Droplet Digital Detection (IC 3D), Bio-Conjugated Nanoparticles, hingga Surface Plasmon Resonance (SPR) (Prada et al., 2022).

4.3 Pertumbuhan Bakteri

Pertumbuhan bakteri menghadirkan banyak fenomena indah yang menimbulkan tantangan teoretis baru, dan juga dapat dilakukan eksperimen laboratorium (Allen and Waclaw, 2019). Pertumbuhan kultur bakteri adalah salah satu contoh pertumbuhan eksponensial yang paling umum. Pertumbuhan bakteri melibatkan lebih dari sekedar laju konstan. Pertumbuhan eksponensial dipertahankan dengan teliti mengoordinasikan akumulasi massa sel, replikasi kromosom yang konstan, dan pembelahan fisik. Maka dari itu laju pertumbuhan sangat penting dalam deskripsi fisik dan kimia sel bakteri. Aspek pertumbuhan bakteri ini dapat dijelaskan dengan hukum empiris yang menyarankan model sederhana dan intuitif (Hagen, 2010).

Jika kondisi pertumbuhan mendukung, satu sel *Escherichia coli* pada suhu 37°C dapat membelah setiap 20 menit sekali atau lebih, menjadi koloni 10^{10} sel setelah 11 jam. Jika koloni tumbuh dengan kecepatan ini selama 2 hari, massa koloni akan jauh melebihi massa Bumi. Maka dari itu pertumbuhan bakteri adalah salah satu contoh pertumbuhan eksponensial yang paling

dramatis di alam. Pertumbuhan bakteri juga merupakan adaptasi yang sangat berguna (Hagen, 2010).

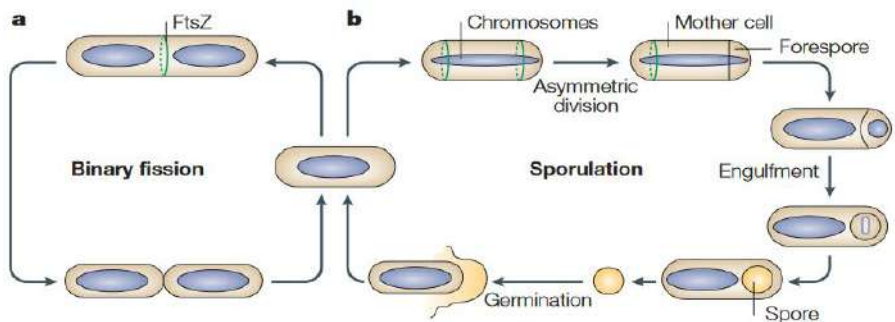
Sel-sel bakteri dalam pertumbuhan aktif bertambah jumlahnya dengan bertambah besar dan kemudian membelah secara fisik. Cukup akurat untuk mengatakan bahwa setiap sel tumbuh pada interval waktu tertentu t_D dan kemudian membelah menjadi dua. Pada kenyataannya, terdapat beberapa variasi dalam interval tersebut, dan beberapa spesies membelah secara asimetris. Interval t_D sangat bergantung pada kondisi pertumbuhan, seperti suhu dan ketersediaan unsur hara. Jika kondisi pertumbuhan dapat dipertahankan hampir konstan sehingga t_D tetap konstan selama beberapa generasi, maka budaya tersebut dikatakan berada dalam keadaan pertumbuhan seimbang. Dalam hal ini, jumlah N sel dalam kultur meningkat dengan laju yang sebanding dengan N , $(dN / dt) = kN$ dan populasinya bertambah secara eksponensial, $N(t) = N_0 e^{kt}$; Di sini, N_0 adalah jumlah sel awal dan $k = \log(2) / t_D$; Pertumbuhan yang seimbang bersifat eksponensial tidak hanya pada total populasi tetapi juga pada pertumbuhan sel individual (Hagen, 2010).

Ukuran atau massa satu sel, jumlah sel dalam kultur, dan totalnya berat kering suatu populasi (dan segala unsur penyusunnya) semuanya tumbuh secara eksponensial dengan laju k . Maka, sel dalam pertumbuhan seimbang merupakan mesin yang efisien untuk mengubah makanan menjadi biomassa—kebanyakan protein. Sekitar setengah dari massa dan 80% konsumsi energi sel *Escherichia coli* yang tumbuh cepat diarahkan pada sintesis protein. Meskipun terminologinya tidak sepenuhnya standar, ahli mikrobiologi biasanya mengacu pada parameter k pada Persamaan $(dN / dt) = kN$; sebagai laju pertumbuhan spesifik dan menggunakan istilah laju pertumbuhan untuk jumlah penggandaan jumlah penduduk per satuan waktu, $\mu = 1 / t_D = k / \log(2)$ (Hagen, 2010).

Dengan menyesuaikan pasokan nutrisi, waktu penggandaan *E. coli* aktif pada suhu 37 ° C dapat dilakukan selama $1 / \mu \sim 100$ jam atau sesingkat ≈ 20 menit, dan waktu penggandaan sesingkat 15–17 menit dapat dicapai untuk beberapa strain dalam kondisi ideal. Ketika pertumbuhan dibatasi oleh konsentrasi rendah c dari nutrisi pembatas tertentu seperti glukosa, variasi k atau μ dengan c sering kali dapat dijelaskan dengan persamaan Monod, $k = k_{\max}c / (c_0 + c)$; di mana $k_{\max}$ dan c_0 adalah parameter empiris (Hagen, 2010).

Persamaan $k = k_{\max}c / (c_0 + c)$ murni empiris, meskipun sangat mirip dengan hukum klasik Michaelis – Menten, yang menggambarkan kinetika banyak reaksi yang dikatalisis enzim dan akrab bagi mahasiswa biokimia. Konsekuensi dari pertumbuhan eksponensial bisa sangat menakutkan. Sebuah sel tunggal yang tumbuh selama sekitar 10 jam dalam media pertumbuhan bervolume 10 ml dapat membelah kira-kira 30 kali untuk menghasilkan $\sim 10^9$ sel dan kepadatan mendekati 10^8 sel/ml (Hagen, 2010).

Secara konseptual, perbanyakkan sel dengan pembelahan biner adalah proses yang sederhana; sebuah sel hanya perlu tumbuh dua kali ukurannya, dan kemudian terbelah menjadi dua. Namun agar tetap kompetitif, apalagi bertahan hidup, sel prokariotik harus membelah pada waktu yang tepat dan di lokasi yang tepat di dalam sel, dan harus memastikan bahwa setiap sel anak keturunan menerima gen yang lengkap dan memiliki ketelitian yang tinggi. Model bakteri yang telah digunakan untuk mempelajari pembelahan sel termasuk spesies proteobacteria Gram-negatif *Escherichia coli* dan *Caulobacter crescentus*, dan bakteri Gram-positif *Bacillus subtilis* dengan GC rendah. *B. subtilis* (Gambar 4) akan digunakan sebagai model untuk memperkenalkan mekanisme umum dan pengaturan pembelahan sel pada bakteri (Angert, 2005).



Gambar 4. 4. Siklus hidup *Bacillus subtilis* (Angert, 2005).

B. subtilis memiliki dua alternatif siklus hidup yang menghasilkan pola pembelahan sel yang berbeda. Pada Gambar 4a, Siklus hidup vegetatif. Jika kondisi mendukung, *B. subtilis* memanjang, mereplikasi kromosomnya (ditunjukkan dengan warna biru) dan membelah melalui pembelahan biner. Peralatan pembelahan berkumpul dengan FtsZ (hijau) dalam struktur seperti cincin di sel tengah, tempat terjadinya pembelahan sel (Angert, 2005).

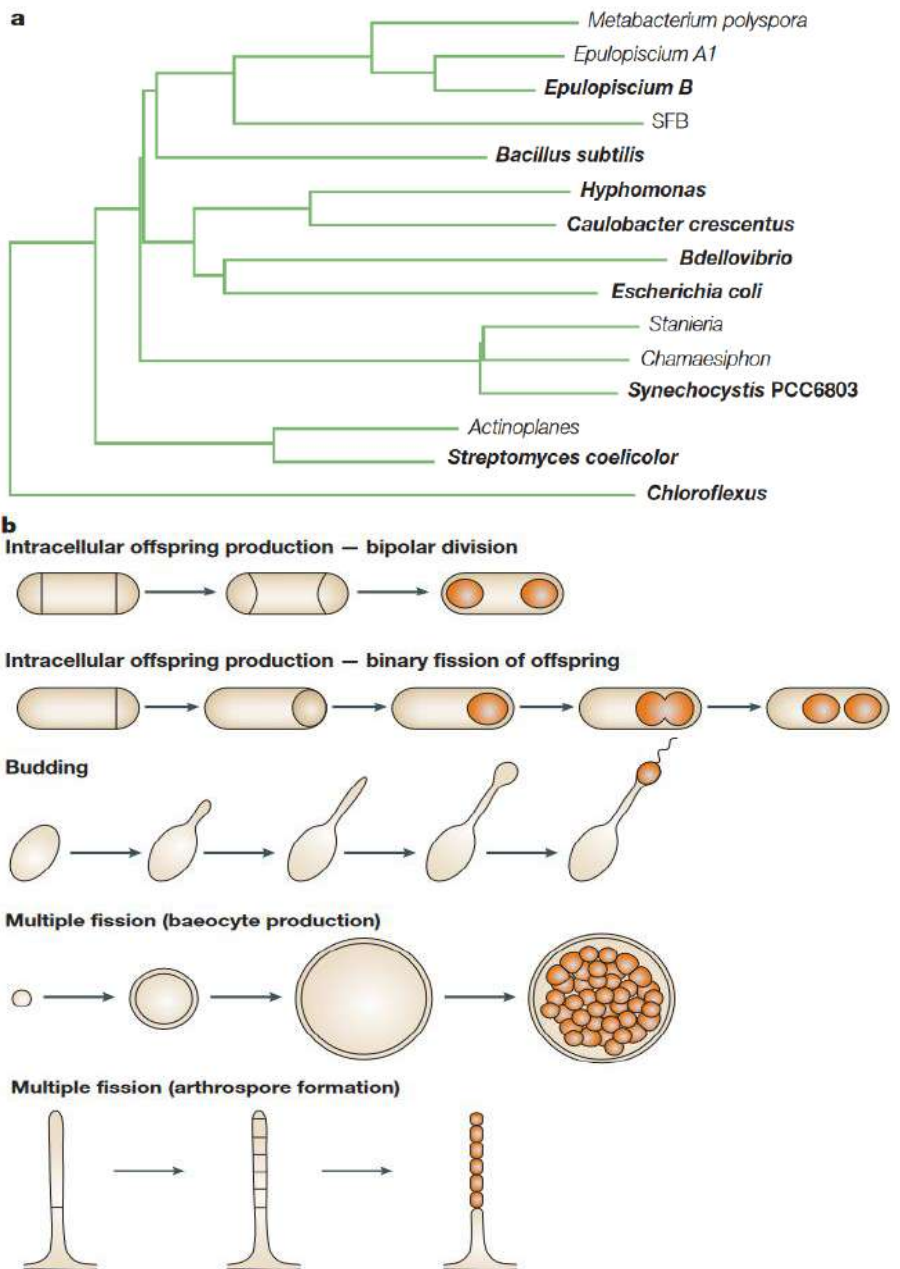
Sementara Gambar 4b, ketika sumber daya habis, *B. subtilis* dapat mengembangkan sel yang sangat tahan dan tidak aktif untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang keras. Kedua salinan kromosom mengadopsi konfigurasi baru yang membentang dari satu kutub sel ke kutub lainnya. Mesin pembelahan berkumpul di kedua kutub sel tetapi pembelahan sel hanya terjadi pada satu kutub. Sebagian dari satu kromosom terperangkap oleh septum pembelahan. Protein dalam septum pembelahan mengemas kromosom ke dalam sel yang lebih kecil (dikenal sebagai forespore) (Angert, 2005).

Forespore kemudian sepenuhnya ditelan oleh sel induk yang lebih besar. Melalui ekspresi koordinat gen di kedua sel, spora depan yang terinternalisasi dipersiapkan untuk dormansi. Protein khusus mengikat dan melindungi DNA, sitoplasma sel menjadi tidak terinternalisasi dan penghalang protein pelindung

terbentuk pada permukaan luar sel. Ketika kondisi membaik, endospora berkecambah dan *B. subtilis* kembali memasuki siklus hidup vegetatif (Angert, 2005).

Pada mode reproduksi alternatif terpilih yang ditemukan pada Bakteri, yang mencakup program pembelahan sel yang menghasilkan pembentukan banyak keturunan, dan mekanisme pertunasan. Dengan kemajuan genomik mikroba dan kemajuan dalam teknik mikroskopis sensitif (misalnya mikroskop dekonvolusi) dan teknik analisis (misalnya pencitraan spektrometri massa dan analisis sinar mikroba), kini dengan memiliki alat untuk menyelidiki mekanisme yang mendasari beragam proses tersebut tanpa perlu kebutuhan untuk analisis genetik yang rumit pada bakteri yang kurang mudah ditumbuhkan (Angert, 2005).

Memahami perolehan proses-proses tersebut dalam garis keturunan yang berbeda tidak hanya akan memberikan wawasan mengenai evolusi strategi reproduksinya, namun juga akan menjelaskan prinsip-prinsip dasar biologi sel mikroba yang menentukan asimetri seluler, segregasi nukleoid, dan pembelahan sel. Pada bakteri Gram positif GC rendah, Cyanobacteria, Actinobacteria, dan Proteobacteria (Gambar 4.5). Perspektif filogenetik ditekankan sebab sistem model dapat berfungsi sebagai landasan untuk membangun hipotesis guna mempelajari sistem reproduksi dan perkembangan alternatif (Angert, 2005).



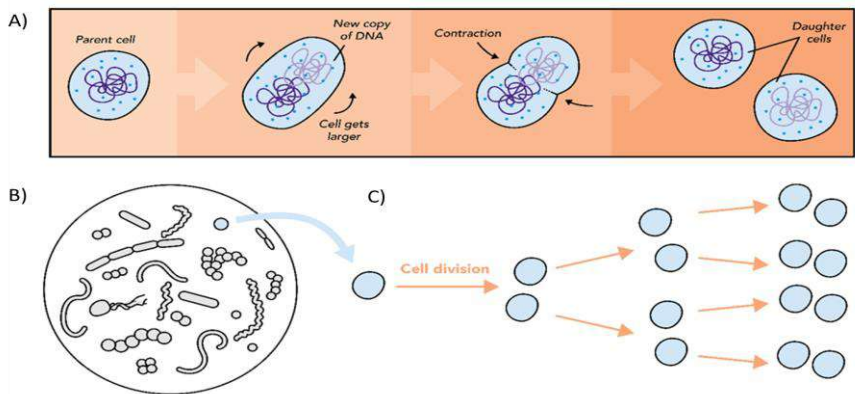
Gambar 4. 5. Hubungan evolusi organisme model dan bakteri yang menunjukkan strategi reproduksi yang tidak biasa (Angert, 2005).

Pohon filogenetik (Gambar 4.5a) menggambarkan keanekaragaman organisme yang menggunakan strategi reproduksi alternatif (Gambar 4.5b). Tipe tebal menunjukkan proyek genom yang lengkap atau sedang berlangsung (Gambar 4.5a). Keturunan intraseluler (Gambar 4.5b) dihasilkan oleh beberapa bakteri Gram positif GC rendah seperti *Metabacterium polyspora*, *Epulopiscium* spp. dan bakteri berfilamen tersegmentasi (segmented filamentous bacteria/SFB). Pembelahan tunas dan pembelahan ganda (Gambar 4.5b) masing-masing ditemukan pada genera proteobakteri *Hyphomonas* dan *Bdellovibrio*. Dalam kasus Cyanobacteria, *Stanieria* menghasilkan baeosit dan *Chamaesiphon* menghasilkan keturunan melalui tunas (Gambar 4.5b). *Actinoplanes* menghasilkan keturunan yang dapat terdispersi melalui beberapa fisi filamen di dalam sporangium (Gambar 4.5b) (Angert, 2005).

Kebanyakan bakteri, termasuk organisme model seperti *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, dan *Caulobacter crescentus*, berkembang biak dengan pembelahan biner (Angert, 2005; Płaskowska et al., 2023). Namun, beberapa bakteri yang termasuk dalam berbagai garis keturunan, termasuk *Streptomyces* penghasil antibiotik dan *Bdellovibrio predator*, berkembang biak melalui pembelahan nonbiner, di mana tiga atau lebih salinan kromosom disintesis dan sel filamen multinukleoid yang dihasilkan terbagi menjadi sel keturunan (Płaskowska et al., 2023).

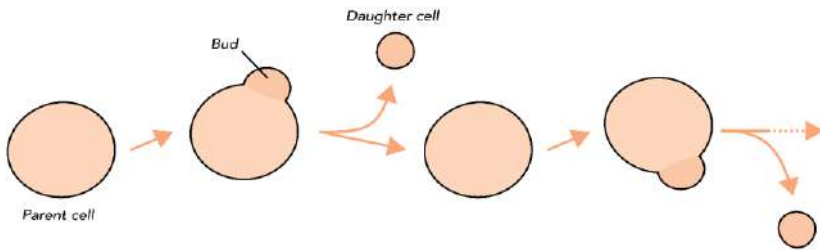
Pada bakteri *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, dan *Caulobacter crescentus*, kromosom saudara yang baru disintesis dipisahkan menjadi dua sel yang baru lahir sebelum pembelahan sel selesai (Gambar 4.6b, 4.6c). Namun, beberapa bakteri yang berasal dari berbagai garis keturunan, termasuk *Streptomyces* penghasil antibiotik dan predator *Bdellovibrio*, berkembang biak melalui pembelahan non-biner. Dalam kasus seperti ini, lebih dari dua salinan kromosom disintesis, dan sel filamen multinukleoid

yang dihasilkan terbagi lagi menjadi sel keturunan nukleoid tunggal. Jadi, pada bakteri nonbiner yang sedang tumbuh, replikasi DNA tidak langsung diikuti dengan pembelahan sel (Gambar 4.6a) (Eswara and Ramamurthi, 2017; Angert, 2005; Kaljević et al., 2021; Fenton et al., 2010; Jakimowicz and van Wezel, 2012; SITN, 2020).



Gambar 4. 6. Populasi meningkat secara eksponensial seiring dengan pembelahan sel. Mikroba dengan bentuk berbeda membelah dengan cara yang sama (SITN, 2020).

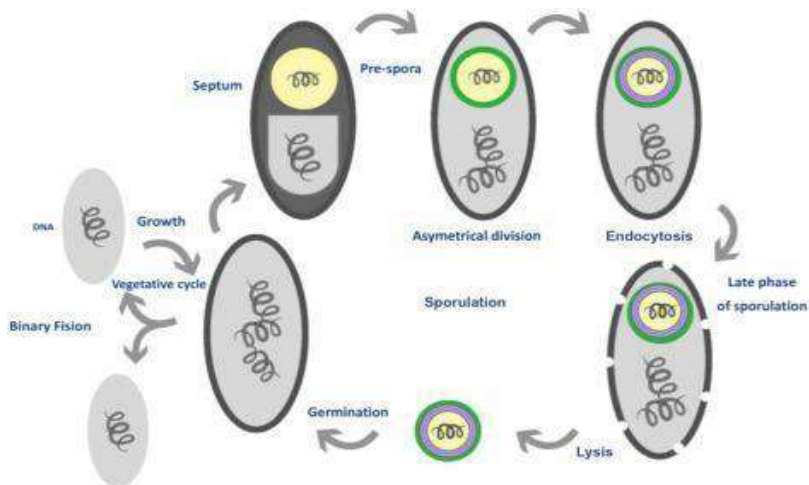
Sementara pada bakteri pemula menghasilkan sel anak yang awalnya lebih kecil dari sel induk dan biasanya bertambah diameternya selama pertumbuhan sel. Sel anak seluruhnya terdiri dari bahan dinding sel yang baru disintesis dan sintesis sel anak biasanya selesai sebelum migrasi DNA terjadi. Pengamatan sederhana terhadap bakteri ini mengungkapkan bahwa munculnya pertumbuhan sel baru terjadi di dalam atau di ujung batang (Hirsch, 1974; Moore, 1981; Whittenbury and Dow, 1977). Beberapa sel menggunakan tunas untuk menghasilkan sel anak. Sel induk menghasilkan tonjolan kecil yang disebut tunas (Gambar 4.7) (SITN, 2020).



Gambar 4. 7. Pertumbuhan sel baru menggunakan tunas (SITN, 2020).

Proses sporulasi dan perkecambahan serta morfologi spora sudah banyak dipelajari. Hal tersebut termasuk pembentukan, resistensi, dan perkecambahan spora telah dipelajari secara luas, terutama untuk *Bacillus*. Proses sporulasi terjadi sebagai respons terhadap kepadatan sel yang tinggi, keterbatasan nutrisi, atau komunikasi seluler. Kemudian, resistensi spora dikembangkan selama sporulasi. Spora ini secara metabolik tidak aktif dan tahan terhadap panas, radiasi, pengeringan, pH ekstrem, dan bahan kimia beracun.

Spora yang tidak aktif juga memantau lingkungan di sekitarnya, dan ketika kondisinya kembali menguntungkan. Misalnya kehadiran germinant sebagai nutrisi seperti asam amino, gula, nukleotida purin, atau zat lain seperti lisozim atau garam. Selain itu, untuk pertumbuhan hingga spora tersebut berkecambah dan mengalami pertumbuhan. Pada akhirnya diubah kembali menjadi sel yang sedang tumbuh. Transisi dari spora ke sel vegetatif melibatkan tiga fase berbeda yaitu aktivasi, perkecambahan, dan pertumbuhan. Diagram skema sporulasi dan siklus perkecambahan *B. subtilis* tersaji pada Gambar 4.8.

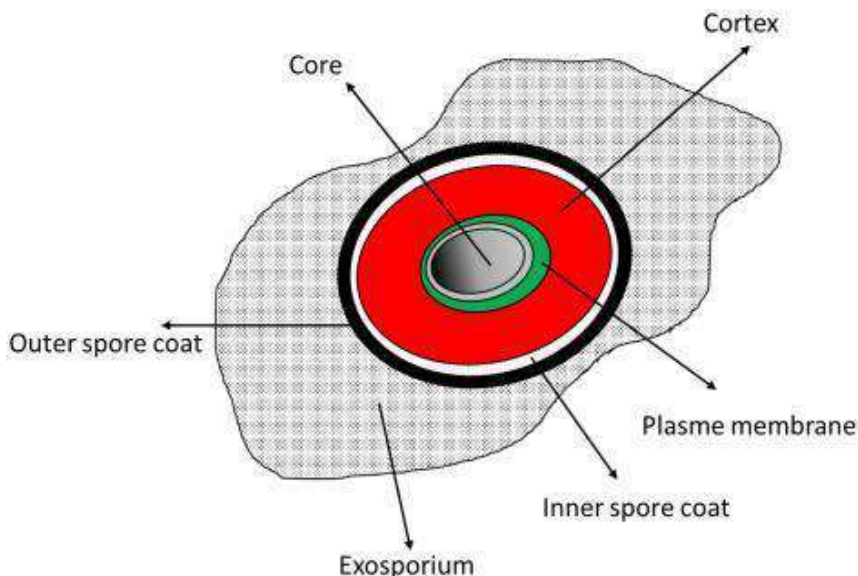


Gambar 4. 8. Sporulasi dan siklus perkecambahan *B. subtilis* (McKenney et al., 2013; Lorenzo et al., 2018)

Spora memiliki pembungkus spora yang berlapis-lapis, dan biasanya dibedakan dari inti spora ke media luar. Lapisan tersebut terdiri dari membran internal, korteks, membran eksternal, mantel, dan mungkin exosporium. Pada setiap lapisan menyajikan sifat struktural, biokimia, dan permeabilitas tertentu. Exosporium adalah lapisan tipis dan halus yang terbuat dari protein. Lapisan spora dalam dan luar terdiri dari lapisan protein khusus spora. Korteks terdiri dari peptidoglikan yang terikat secara longgar dan mengandung asam dipikolinat, yang khusus untuk semua endospora bakteri (Lorenzo et al., 2018).

Asam dipikolinat berikatan silang dengan ion kalsium yang tertanam dalam lapisan spora dan berkontribusi terhadap kemampuan resistensi ekstrim dari endospora karena menciptakan penghalang yang sangat sulit ditembus. Selain itu juga mengandung dinding sel biasa dan, membran sitoplasma, nukleoid, dan sitoplasma. Inti hanya memiliki 10% -30% kandungan air sel vegetatif. Oleh karena itu, sitoplasma inti berada dalam keadaan gel. Kadar air yang rendah berkontribusi terhadap keberhasilan endospora di lingkungan kering. Skema

struktur bakteri pembentuk spora digambarkan pada Gambar 4.9 (Lorenzo et al., 2018).



Gambar 4. 9. Struktur bakteri pembentuk spora (Lorenzo et al., 2018).

Tersirat bahwa mikroba tumbuh dari proses autokatalitik. Pertumbuhan mikroba tidak akan terjadi tanpa adanya sel hidup dan peningkatan laju pertumbuhan. Hal tersebut ditandai dengan adanya peningkatan jumlah biomassa (Adams and Moss, 2008).

Jumlah dan atau massa sel vegetatif mikroorganisme (bakteri, kapang, khamir) mengalami peningkatan pada umumnya digunakan untuk merefleksikan pertumbuhan mikroorganisme. Reproduksi bakteri melewati tahapan pembelahan biner. Proses pembelahan biner berawal dari tahap replikasi DNA, pemisahan DNA, partisi antar-DNA, invaginasi, terbentuknya septa dinding sel hingga pemisahan sel (Ray, 2004).

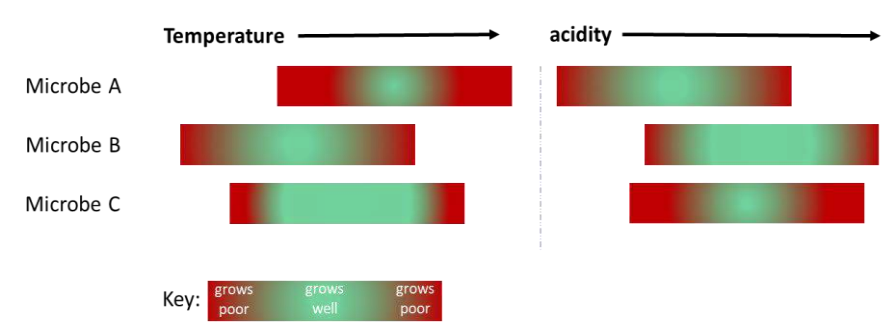
Pertumbuhan sel bakteri merupakan proses kompleks yang terdiri dari dua fase berbeda. Fase tersebut yaitu pemanjangan sel dan pembentukan septum sebelum pembelahan sel. Meskipun bakteri telah mengembangkan beberapa mekanisme berbeda untuk pertumbuhan sel, jelas bahwa regulasi spasial dan regulasi temporal yang ketat pada sintesis peptidoglikan adalah tema umum (Brown et al., 2011).

Pertumbuhan umum digunakan untuk bakteri dan mikroorganisme lain dan biasanya mengacu pada perubahan di dalam pertambahan total massa sel dan bukan perubahan individu organisme. Pertumbuhan merupakan pertambahan jumlah atau massa melebihi yang ada di dalam inokulum asalnya. Selama fase pertumbuhan seimbang, pertambahan massa bakteri berbanding lurus dengan pertambahan komponen selular yang lain seperti DNA, RNA dan protein (Pelczar dan Chan, 1988).

Pertumbuhan adalah pertambahan teratur semua komponen suatu mikroorganisme. Waktu untuk inkubasi setiap sel induk berbagi diri dengan pembelahan biner dalam waktu 20-30 menit menjadi dua sel anak (Hadioetomo, 1985). Waktu penggandaan populasi bakteri adalah 21-27 menit (Hobson, 1988). Sementara, waktu generasi pada setiap bakteri tidak sama, ada yang hanya memerlukan 20 menit bahkan ada yang memerlukan sampai berjam-jam atau berhari-hari. Waktu generasi adalah waktu yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk meningkatkan jumlah sel menjadi dua kali lipat jumlah semula (Sumarsih, 2003).

Pertumbuhan sel dapat diukur dari massa sel dan secara tidak langsung dengan mengukur turbiditas cairan medium tumbuh. Massa sel dapat dipisahkan dari cairan mediumnya menggunakan sentrifus sehingga dapat diukur volume massa selnya atau diukur berat keringnya melalui pengeringan dahulu dengan pemanasan pada suhu 90-110 derajat Celcius semalam. Umumnya berat kering bakteri adalah 10%-20% dari berat

basahnya. Pertumbuhan sel dipengaruhi oleh derajat keasaman (pH), dan temperatur (Gambar 4.10). Rentang pH bagi pertumbuhan bakteri rumen antara 4–9 dengan pH optimum 6,5–7,5. Selama pertumbuhan pH dapat berubah, naik atau turun, bergantung kepada komposisi medium yang diuraikan. Namun demikian, beberapa bakteri memiliki ketahanan terhadap berbagai kondisi stres. Kondisi stres seperti pemanasan, pengeringan, rendah aktivitas air, pH rendah, dan seterusnya (Sumarsih, 2003; Hati et al., 2020).

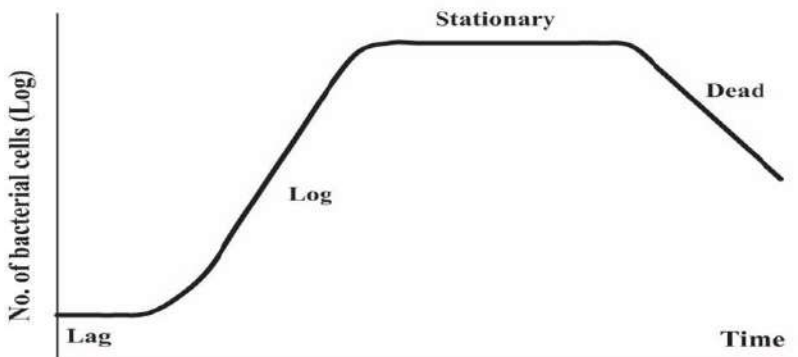


Gambar 4. 10. Mikroba tumbuh dengan baik dalam kisaran kondisi tertentu untuk berbagai variabel lingkungan (SITN, 2020).

Beberapa mikroba dapat mentoleransi berbagai kondisi seperti suhu dan keasaman (Gambar 4.10) (SITN, 2020; Hati et al., 2020). Sementara mikroba lainnya memerlukan kondisi tertentu agar dapat tumbuh dengan baik. Terkadang kondisi yang memungkinkan pertumbuhan terjadi secara tumpang tindih (SITN, 2020).

Maka, pertumbuhan mikroba dapat diukur berdasarkan konsentrasi sel (jumlah sel persatuan isi biakan) atau densitas sel (berat kering sel persatuan sel biakan) dan jumlah sel hidup biasanya dianggap sebagai ukuran konsentrasi sel. Pengukuran jumlah bakteri dapat menggunakan teknik absorpsi cahaya. Absorbansi cahaya dari suatu biakan dengan cara fotoelektrik

dapat digunakan sebagai penduga jumlah jasad renik hidup berdasarkan suatu kurva standar, dengan kurva standar semua hasil pengukuran optik dapat diubah menjadi konsentrasi sel. Bila bakteri diinokulasikan ke dalam medium baru, pembiakan tidak segera terjadi tetapi ada periode penyesuaian pada lingkungan yang dikenal dengan pertumbuhan adaptif. Bakteri kemudian akan memperbanyak diri (replikasi) dengan laju yang konstan, sehingga akan diperoleh kurva pertumbuhan (Volk et al., 1988). Kurva pertumbuhan dikenal beberapa fase pertumbuhan yaitu dengan fase lag, fase eksponensial, fase stasioner dan fase kematian. Fase pertumbuhan bakteri secara umum tersaji pada Gambar 11 (Wang et al., 2015).



Gambar 4. 11. Representasi grafis dari kurva pertumbuhan bakteri yang khas dalam media kultur (Wang et al., 2015).

Terlihat ilustrasi pola empat fase umum (Gambar 4.11) dari pertumbuhan populasi bakteri secara standar, yang dikenal sebagai kurva pertumbuhan, dengan populasi dalam fase log tumbuh secara eksponensial. Ketika bakteri dimasukkan ke dalam media segar dalam sistem tertutup, seperti tabung reaksi, populasi sel selalu menunjukkan dinamika pertumbuhan (Gambar 11) (Wang et al., 2015).

Fase lag, bakteri pada awalnya menyesuaikan diri dengan lingkungan baru, sehingga mereka tampak tidak mampu bereplikasi tetapi sel-selnya mungkin bertambah besar. Pada waktu fase lag, sel belum terlalu banyak membelah diri. Sel mulai memperbanyak diri secara lambat setelah menyesuaikan diri dalam medium baru (Wang et al., 2015; Tarigan, 1988).

Selanjutnya, fase log (eksponensial) merupakan proses dimana sel mulai membelah secara teratur melalui proses pembelahan biner. Kultur mencapai laju pertumbuhan maksimum, yang dapat diperkirakan berdasarkan waktu generasi atau waktu penggandaan, yaitu waktu per generasi. Sel membelah dengan kecepatan yang tetap dan maksimal. Pertumbuhan yang paling cepat terjadi (Wang et al., 2015; Tarigan, 1988).

Kemudian di fase stasioner, jumlah sel yang mengalami pembelahan tampaknya sama dengan jumlah sel yang mati karena kehabisan nutrisi. Selain itu, ditandai dengan penurunan kecepatan pertumbuhan (pembelahan bakteri berkurang), terjadi karena penumpukan limbah metabolisme, racun, kekurangan nutrisi, dan perubahan kondisi pada lingkungan. Pertumbuhan sel yang hidup masih lebih banyak daripada jumlah sel yang mati (Wang et al., 2015; Tarigan, 1988).

Pada fase mati atau kematian, bakteri kehilangan kemampuan untuk membelah dan jumlah sel mati melebihi jumlah sel hidup. Hal tersebut terjadi akibat nutrisi semakin menurun (bahkan habis), energi cadangan di dalam sel juga habis dan terkumpulnya produk limbah. Fase kematian eksponensial tidak diamati pada kondisi umum pertumbuhan kultur bakteri, kecuali bila kematian dipercepat dengan penambahan zat kimia toksik, panas atau radiasi (Wang et al., 2015; Tarigan, 1988).

Maka dari itu, agar bakteri tetap dapat berkembang biak, bakteri harus menggandakan materi genetiknya agar dapat diturunkan kepada keturunannya. Hal ini memerlukan replikasi

DNA yang terkoordinasi dengan pertumbuhan dan pembelahan sel. Di lingkungan alami, pertumbuhan bakteri bersifat dinamis dan sangat dipengaruhi oleh perubahan ketersediaan nutrisi. Selain itu, bakteri menggunakan berbagai sistem pengaturan, banyak diantaranya spesifik spesies, untuk mengkoordinasikan replikasi DNA dengan pertumbuhan sel. Variabilitas ini kemungkinan besar mencerminkan beragamnya gaya hidup berbagai jenis bakteri (Murray, 2016).

RANGKUMAN

Mikroorganisme berkembang biak dan atau tumbuh saat berada dalam lingkungan yang sesuai. Media yang sesuai untuk pertumbuhan berbagai jenis mikroorganisme misalnya pangan. Pertumbuhan mikroba tidak akan terjadi tanpa adanya sel hidup dan peningkatan laju pertumbuhan. Reproduksi bakteri, dapat berkembang biak dengan pembelahan biner atau nonbiner.

TUGAS DAN EVALUASI

- 1) Apa yang saudara ketahui mengenai perkembangan bakteri?
- 2) Apa yang saudara ketahui mengenai pertumbuhan bakteri?

DAFTAR PUSTAKA

- Sopandi T, Wardah. 2014. Mikrobiologi Pangan Teori dan Praktik. CV Andi Offset: Yogyakarta. ISBN 9789792945423
- Adams MR and Moss MO. 2008. Food Microbiology. Third Ed. The RSC. Pub. Cambridge CB. WF: UK
- Ray B. 2004. Fundamental food microbiology. CRC Press: Boca Raton.
- Hati, R.P., Dewanti-Hariyadi, R., & Nuraida, L. (2020). *Cronobacter sakazakii* local isolates response to acid stress and their resuscitability. Food Research 4 (1) : 244 - 253 (February 2020). [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(1\).257](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(1).257)
- Pelczar, M. J. & E. C. S. Chan. 1988. Dasar-dasar Mikrobiologi 1. Terjemahan: Hadioetomo, R. S. Universitas Indonesia Press, Jakarta.
- Hadioetomo, R. S. 1985. Mikrobiologi Dasar Dalam Praktek: Teknik dan Prosedur Dasar Laboratorium. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Hobson, P.N. & C. S. Stewart. 1992. The Rumen Microbial Ecosystem. Blackie Academic & professional, New York.
- Sumarsih, S. 2003. Mikrobiologi Dasar. Fakultas Pertanian UPN. Veteran, Yogyakarta.
- Volk, W. A. And M. F. Wheleer. 1988. Mikrobiologi Dasar. Edisi ke-5. Terjemahan: Soenarto Adisoemarto Ph. D. Erlangga. Jakarta.
- Tarigan, J. 1988. Pengantar Mikrobiologi. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Jakarta.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Reich, P. B., Jeffries, T. C., Gaitan, J. J., Encinar, D., et al. (2016). Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. Nat. Commun. 7:10541. doi: 10.1038/ncomms10541
- Weng, Z., Esther, O., and Molina, Á. (2005). Conservación de microorganismos: 'Qué debemos conocer? Rev. Cubana Hig. Epidemiol. 43, 1-5.

- Díaz-Rodríguez, A., Ibarra-Villareal, A., de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Herrera-Sepúlveda, A., and Soto-Padilla, M. Y. (2017). Potencial biotecnológico y ambiental de los microorganismos. *La Soc. Acad.* 1, 52–63.
- Kalia, A., and Gupta, R. P. (2005). Conservation and utilization of microbial diversity. *NBA Sci. Bull.* 1, 1–40.
- Pajares, S., Bohannan, B. J. M., and Souza, V. (2016). Editorial: the role of microbial communities in tropical ecosystems. *Front. Microbiol.* 7:1805. doi: 10.3389/fmicb.2016.01805
- Lorenzo JM, Munekata PE, Dominguez R, Pateiro M, Saraiva JA, Franco D. Main Groups of Microorganisms of Relevance for Food Safety and Stability: General Aspects and Overall Description. *Innovative Technologies for Food Preservation.* 2018:53–107. doi: 10.1016/B978-0-12-811031-7.00003-0. Epub 2017 Sep 29. PMID: PMC7150063.
- Ogodo AC, Narayana MSSV, Vardhan PS, Gupta RK, Gautam AK, Egbuna C, Kushwaha PP, Singh AK, Kumar S. 2021. Chapter 9 - Principles of applied microbiology and biotechnology: Technique for the screening of antimicrobial herbs, Editor(s): Chukwuebuka Egbuna, Abhay Prakash Mishra, Megh R. Goyal. *Preparation of Phytopharmaceuticals for the Management of Disorders*, Academic Press, 2021, Pages 185-214, ISBN 9780128202845. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820284-5.00001-0>.
- Ogodo AC, Agwaranze DI, Daji M, Aso RE. 2022. Chapter 13 - Microbial techniques and methods: basic techniques and microscopy, Editor(s): Chukwuebuka Egbuna, Kingsley C. Patrick-Iwuanyanwu, Muhammad Ajmal Shah, Jonathan C. Ifemeje, Azhar Rasul. *Analytical Techniques in Biosciences*, Academic Press, 2022, Pages 201-220, ISBN 9780128226544. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822654-4.00003-8>.
- SITN [Science In The News]. 2020. How Microbes Grow - Science in the News. Science in the News by Molly Sargen. (2020, July 20). <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2020/how-microbes-grow/>

- Pitt TL, Barer MR. Classification, identification and typing of micro-organisms. *Medical Microbiology*. 2012:24–38. doi: 10.1016/B978-0-7020-4089-4.00018-4. Epub 2012 May 24. PMID: PMC7171901.
- [ASM] American Society for Microbiology; 2004. Microbiology in the 21st Century: Where Are We and Where Are We Going? This report is based on a colloquium sponsored by the American Academy of Microbiology held September 5–7, 2003, in Charleston, South Carolina. Washington (DC):American Society for Microbiology. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560448/> doi: 10.1128/AAMCol.5Sept.2003
- Gest H. 2004. The discovery of microorganisms by Robert Hooke and Antoni van Leeuwenhoek, Fellows of The Royal Society. *Notes and Records of the Royal Society*, 58(2), 187–201. Published:22 May 2004. <http://doi.org/10.1098/rsnr.2004.0055>
- Lewis, W. H., Tahon, G., Geesink, P., Sousa, D. Z., & Ettema, T. J. G. (2020). Innovations to culturing the uncultured microbial majority. *Nature Reviews Microbiology*, 19(4), 225–240. doi:10.1038/s41579-020-00458-8
- Prada P, Brunel B, Reffuveille F, Gangloff SC. Technique Evolutions for Microorganism Detection in Complex Samples: A Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(12):5892. <https://doi.org/10.3390/app12125892>
- Gutleben, J. et al. The multi-omics promise in context: from sequence to microbial isolate. *Crit. Rev. Microbiol.* 44, 212–229 (2018).
- Sauer, D. B. & Wang, D.-N. Predicting the optimal growth temperatures of prokaryotes using only genome derived features. *Bioinformatics* 35, 3224–3231 (2019).
- Su, M., Satola, S. W. & Read, T. D. Genome-based prediction of bacterial antibiotic resistance. *J. Clin. Microbiol.* 57, e01405–e01418 (2019).
- Hatzenpichler, R., Krukenberg, V., Spietz, R. L. & Jay, Z. J. Next-generation physiology approaches to study microbiome function at single cell level. *Nat. Rev. Microbiol.* 18, 241–256 (2020).

- Tillich, U. M. et al. High-throughput cultivation and screening platform for unicellular phototrophs. *BMC Microbiol.* 14, 239 (2014).
- Bassi, C. A. & Benson, D. R. Growth characteristics of the slow-growing actinobacterium *Frankia* sp. strain Ccl3 on solid media. *Physiol. Plant.* 130, 391–399 (2007).
- Tahon, G. & Willems, A. Isolation and characterization of aerobic anoxygenic phototrophs from exposed soils from the Sør Rondane Mountains, East Antarctica. *Syst. Appl. Microbiol.* 40, 357–369 (2017).
- Thrash, J. C., Weckhorst, J. L. & Pitre, D. M. in *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols Vol. 39 Springer Protocols Handbooks* (eds McGenity T. J., Timmis K. N. & Nogales B.) 57–78 (Springer, 2017).
- Schrader, C., Schielke, A., Ellerbroek, L. & Johne, R. PCR inhibitors — occurrence, properties and removal. *J. Appl. Microbiol.* 113, 1014–1026 (2012).
- Kim, M. & Chun, J. in *New Approaches to Prokaryotic Systematics Vol. 41* (eds Goodfellow, M., Sutcliffe, I. & Chu, J.) 61–74 (Elsevier, 2014).
- Gutleben, J. et al. The multi-omics promise in context: from sequence to microbial isolate. *Crit. Rev. Microbiol.* 44, 212–229 (2018).
- Allen RJ, Waclaw B. Bacterial growth: a statistical physicist's guide. *Rep Prog Phys.* 2019 Jan;82(1):016601. doi: 10.1088/1361-6633/aae546. Epub 2018 Oct 1. PMID: 30270850; PMCID: PMC6330087.
- Hagen, S. J. (2010). Exponential growth of bacteria: Constant multiplication through division. *American Journal of Physics*, 78(12), 1290–1296. doi:10.1119/1.3483278
- Angert, E. R. (2005). Alternatives to binary fission in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 3(3), 214–224. doi:10.1038/nrmicro1096
- Plaśkowska K, Makowski Ł, Strzałka A, Zakrzewska-Czerwińska J. Binary or Nonbinary Fission? Reproductive Mode of a Predatory Bacterium Depends on Prey Size. *mBio*. 2023 Jun 27;14(3):e0077223. doi: 10.1128/mbio.00772-23. Epub 2023 May 10. PMID: 37162334; PMCID: PMC10294633.

- Eswara PJ, Ramamurthi KS. 2017. Bacterial cell division: nonmodels poised to take the spotlight. *Annu Rev Microbiol* 71:393–411. doi: 10.1146/annurev-micro-102215-095657.
- Angert ER. 2005. Alternatives to binary fission in bacteria. *Nat Rev Microbiol* 3:214–224. doi: 10.1038/nrmicro1096.
- Kaljević J, Saaki TNV, Govers SK, Remy O, van Raaphorst R, Lamot T, Laloux G. 2021. Chromosome choreography during the non-binary cell cycle of a predatory bacterium. *Curr Biol* 31:3707–3720. doi: 10.1016/j.cub.2021.06.024.
- Fenton AK, Kanna M, Woods RD, Aizawa S-I, Sockett RE. 2010. Shadowing the actions of a predator: backlit fluorescent microscopy reveals synchronous nonbinary septation of predatory *Bdellovibrio* inside prey and exit through discrete bdelloplast pores. *J Bacteriol* 192:6329–6335. doi: 10.1128/JB.00914-10.
- Jakimowicz D, van Wezel GP. 2012. Cell division and DNA segregation in *Streptomyces*: how to build a septum in the middle of nowhere? *Mol Microbiol* 85:393–404. doi: 10.1111/j.1365-2958.2012.08107.x.
- Hirsch P. Budding bacteria. *Annu Rev Microbiol*. 1974;28:391–444.
- Moore RL. The biology of *Hyphomicrobium* and other prosthecate, budding bacteria. *Annu Rev Microbiol*. 1981;35:567–94.
- Whittenbury R, Dow CS. Morphogenesis and differentiation in *Rhodomicrobium vannielii* and other budding and prosthecate bacteria. *Bacteriol Rev*. 1977;41:754–808.
- Lorenzo JM, Munekata PE, Dominguez R, Pateiro M, Saraiva JA, Franco D. Main Groups of Microorganisms of Relevance for Food Safety and Stability: General Aspects and Overall Description. *Innovative Technologies for Food Preservation*. 2018:53–107. doi: 10.1016/B978-0-12-811031-7.00003-0. Epub 2017 Sep 29. PMID: PMC7150063.
- McKenney, P.T., Driks, A., & Eichenberger, P. (2013). The *Bacillus subtilis* endospore: Assembly and functions of the multilayered coat. *Nature Reviews Microbiology*, 11(1), 33–44 (McKenney, Driks, & Eichenberger, 2013).

- Brown PJ, Kysela DT, Brun YV. Polarity and the diversity of growth mechanisms in bacteria. *Semin Cell Dev Biol.* 2011 Oct;22(8):790-8. doi: 10.1016/j.semcdb.2011.06.006. Epub 2011 Jun 29. PMID: 21736947; PMCID: PMC3193591.
- Wang, L., Fan, D., Chen, W. et al. Bacterial growth, detachment and cell size control on polyethylene terephthalate surfaces. *Sci Rep* 5, 15159 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15159>
- Murray, H. (2016). Connecting chromosome replication with cell growth in bacteria. *Current Opinion in Microbiology*, 34, 13–17. doi:10.1016/j.mib.2016.07.013

BAB 5

GENETIKA BAKTERI

Oleh Indas Wari Rahman

5.1 Pendahuluan

Genom disebut juga kromosom, merupakan seluruh komponen informasi genetika suatu organisme, termasuk gen yang menyandi protein, RNA, dan urutan regulator serta semua DNA bukan penyandi yang mungkin ada. Gen adalah unit fungsional dari informasi genetik, dan semua bentuk kehidupan termasuk mikroorganisme mengandung gen. Secara fisik, gen berlokasi di kromosom atau pada molekul besar lainnya yang secara kolektif dikenal sebagai unsur-unsur genetik. Unsur ini membentuk komplemen total pada informasi genetik, atau genom, pada sel atau virus. Dalam biologi moderen, sel dapat dikarakterisasi berdasarkan komplemen gennya. Jika kita ingin memahami bagaimana fungsi mikroorganisme, maka kita harus memahami bagaimana cara gen menyandi informasi (Madigan *et al*, 2015).

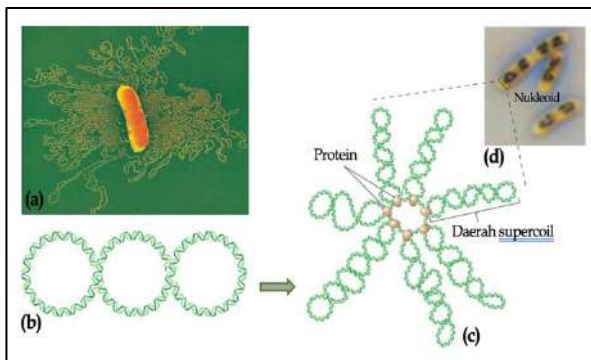
Genomika adalah disiplin ilmu mengenai pemetaan, pengurutan, analisis dan perbandingan genom. Ribuan genom dari prokariot telah berhasil diurutkan, termasuk beberapa galur spesies penting *Bacteria* dan *Archae*. Genomika tidak hanya mencakup pengurutan DNA utuh dan identifikasi gen, tetapi juga ekspresi gen pada tingkat genom. Tidak ada ciri yang lebih penting dalam keanekaragaman bakteri dan kekuatannya dalam menghasilkan penyakit selain mekanisme genetiknya. Bakteri melakukan mutasi dan rekombinasi untuk perubahan genomik,

seperti halnya sel eukariotik. Selain itu, bakteri memiliki mekanisme yang kuat untuk transfer gen antar sel yang bahkan tidak harus berkerabat dekat.

5.2 Unsur-unsur dan Perubahan Genetik

5.2.1 Genom Bakteri

Sebagian besar informasi genetik dalam sel bakteri dan sel arkae ada pada kromosom, yang merupakan sumber informasi genetik intraseluler. Biasanya, molekul DNA-nya tunggal, sirkular dan bersifat haploid. Kromosom hadir sebagai serat seperti benang yang terkait dengan beberapa protein dan berada pada sitoplasma dalam ruang yang disebut nukleoid. Area nukleoid tidak memiliki selubung membran seperti inti sel pada sel eukariotik. Gen adalah urutan DNA spesifik yang mengkode urutan asam amino salah satunya protein. Pada sebagian besar sel mikroba, termasuk *E. coli*, DNA menempati sekitar sepertiga dari total volume sel dan bila diperpanjang maka panjangnya sekitar 1,5 milimeter (mm), kira-kira 500 kali panjang sel bakteri.



Gambar 5. 1. Kromosom Bakteri. (a) Kromosom dilepaskan dari sel *E.coli* yang dilisiskan secara perlahan, (b) DNA Sirkular dengan Supercoil (c) Kromosom DNA dengan daerah supercoil, (d) Gambar kontras fase dan fluoresensi simultan dari *E. coli* yang memperlihatkan lok.

Kromosom sirkular akan membentuk supercoiling, yaitu pengepakan yang terpelintir dan rapat yang disebabkan oleh sejumlah besar protein yang saling terkait. Sehingga DNA heliks ganda akan berputar dengan sendirinya seperti karet yang dililitkan. Gambar Inilah mengapa DNA yang memiliki ukuran lebih panjang dari sel bakteri dapat berada dalam sel bakteri (Gambar 5.1).

a. Kromosom dan Plasmid

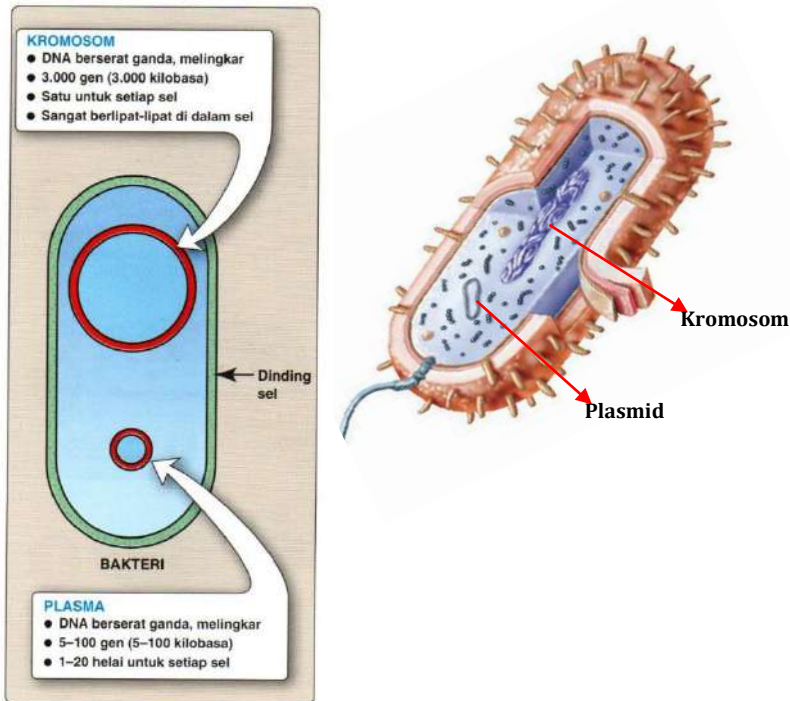
Unsur genetik utama dari prokariot adalah kromosom. Kromosom ada sebagai serat seperti benang yang terkaitdengan beberapa protein dan terlokalisasi di sitosol dalam ruang yang disebut nukleoid. Unsur genetik lainnya mungkin ditemukan dan berperan penting dalam fungsi gen pada prokariot dan eukariot (Termasuk genom virus, plasmid, genom organel dan unsur transposable) pada Tabel 5.1.

Tabel 5. 1. Jenis Unsur Genetik

Organisme	Unsur	Tipe Asam Nukleat	Deskripsi
Prokariot	Kromosom	DNA Double strand	Sangat panjang, biasanya sirkular
Eukariot	Kromosom	DNA Double strand	Sangat panjang, linear
Semua organisme	Plasmid	DNA Double strand	Sirkular dan linear relatif pendek, ekstrakromosomal
Semua organisme	Unsur transposable	DNA Double strand	Biasanya ditemukan pada molekul DNA lainnya
Mitokondria atau kloroplas	Genom organel	DNA Double strand	Panjang medium biasanya sirkular
Virus	Virus genom	DNA/RNA Double atau single strand	Relatif pendek, sirkular atau linear

(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

Tipe prokariot memiliki kromosom DNA single sirkular yang mengandung beberapa atau semua gen-gen yang ditemukan di dalam sel. Meskipun aturannya kromosom tunggal ditemukan pada semua prokariot, tapi ada pengecualian, sebagian prokariot mengandung dua atau bahkan tiga kromosom. Genom eukariot memiliki kromosom multipel. DNA pada semua kromosom eukariot yang diketahui berbentuk linier, berbeda dengan kebanyakan kromosom prokariot dengan molekul DNA sirkular. Kebanyakan bakteri memiliki kromosom yang mengandung 2.000 sampai 4.000 gen.

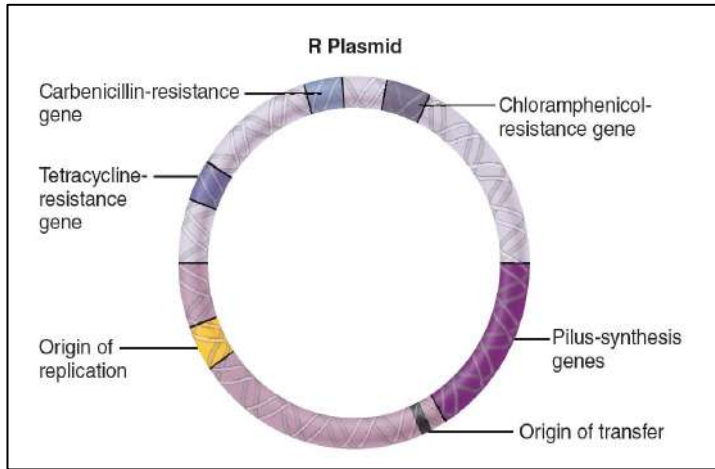


Gambar 5. 2. Genom Bakteri. DNA heliks berserat ganda tampak sebagai dua lingkaran konsentrik

(Sumber : Cornelissen *et al*, 2015).

Banyak sel mikroba mengandung plasmid. Plasmid membawa non-esensial informasi genetik, namun sering digunakan. Tidak hanya pada bakteri, arkae dan jamur mengandung plasmid. Plasmid merupakan unsur DNA ekstrakromosom yang stabil, tidak membawa informasi genetik yang penting untuk struktur normal, pertumbuhan dan metabolisme. Sehingga plasmid dapat dikeluarkan dari sel tanpa mempengaruhi kelangsungan hidup sel (asumsinya bahwa sel berada dalam lingkungan kaya nutrisi yang bebas dari bahan beracun).

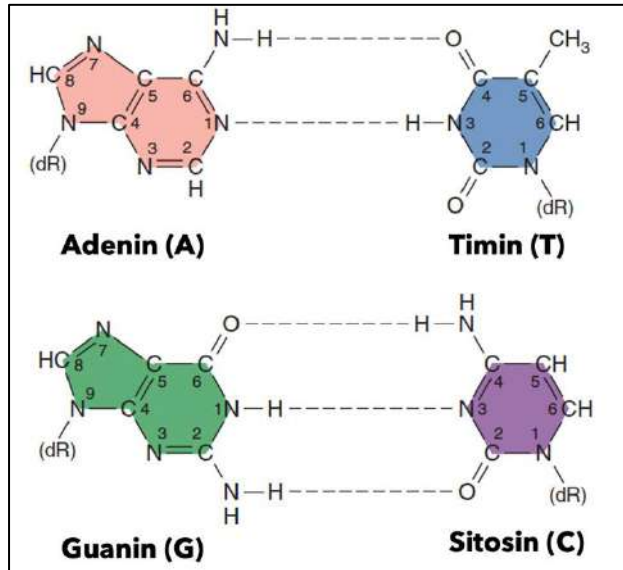
Plasmid beruntai ganda dan sirkular, plasmid juga dapat berperan dalam menentukan resistensi antibiotik yang mana dimediasi oleh berbagai enzim. Misalnya plasmid resistensi (plasmid R) dapat ditransfer dengan cara konjugasi dengan membawa satu atau lebih gen-gen yang bervariasi untuk berbagai enzim yang dapat mendegradasi antibiotik dan modifikasi sistem transpor membran. Gen yang memberikan resistensi terhadap senyawa antimikroba cenderung mengelompok dalam wilayah tertentu (separuh dibagian atas plasmid), Sedangkan gen yang terlibat dalam replikasi dan transfer konjugatif terletak di wilayah yang berbeda (bagian bawah plasmid) (Gambar 5.3).



Gambar 5. 3. Region fungsional dari R-Plasmid
(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

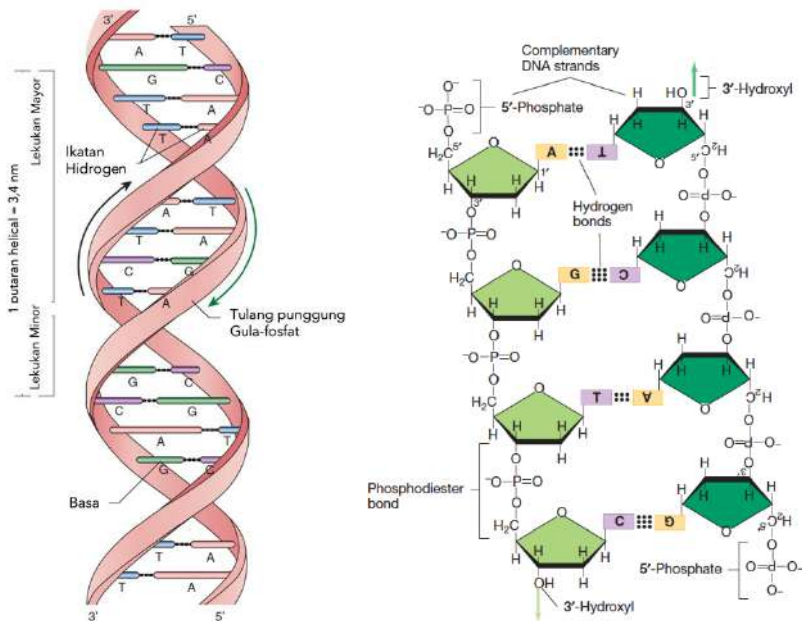
b. Struktur DNA dan RNA

Informasi genetik pada bakteri disimpan dalam bentuk sekuens basa DNA, sementara pada virus, informasi genetiknya di simpan dalam bentuk sekuens RNA (asam ribonukleat). Sebagian besar molekul DNA berupa untai ganda, dengan basa komplementer (A-T; G-C) dipasangkan melalui ikatan hidrogen pada bagian pusat molekul. Orientasi dua untai DNA adalah anti paralel; satu untai secara kimia berorientasi dalam arah $5' \rightarrow 3'$ dan untai komplementernya dalam arah $3' \rightarrow 5'$ (Gambar 5.4)



Gambar 5. 4. Pasangan basa normal pada DNA
(Sumber : Brooks et al, 2013)

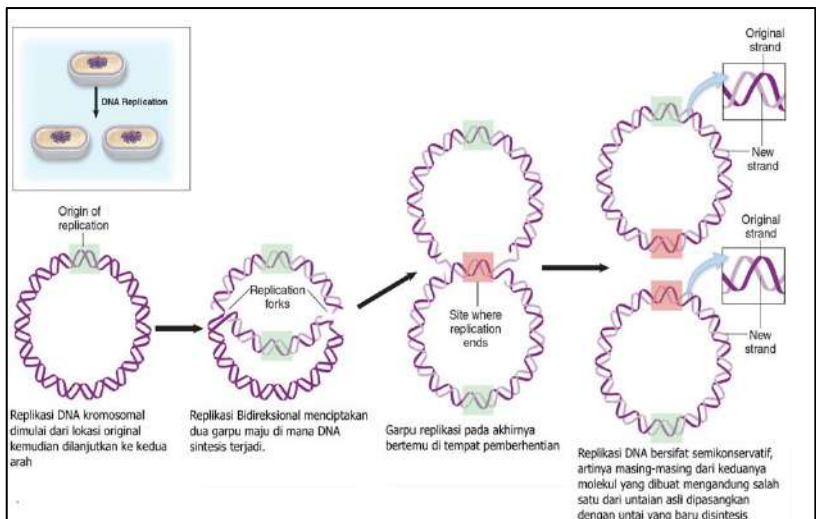
Sifat DNA yang komplemen (untaian patron) dapat menyediakan informasi untuk penggandaan atau ekspresi informasi pada untaian lainnya (untaian penyandi). Pasangan basa di susun di dalam pusat heliks ganda DNA, yang akan menentukan informasi genetiknya. Setiap putaran pada heliks mempunyai satu lekukan mayor dan satu lekukan minor.



Gambar 5. 5. Gambar Skematik Struktur DNA memperlihatkan tulang punggung gula-fosfat heliks pada dua untai yang terikat bersama dengan ikatan hidrogen antara basa-basanya.
(Sumber : Brooks *et al*, 2013; Madigan *et al*, 2015)

Sebagian besar protein dapat mengikat DNA dan mengatur ekspresi gen, kemudian akan berinteraksi pada bagian lekukan mayor, tempat atom yang mengandung basa akan terpapar. Masing-masing keempat basa akan terikat pada fosfo-2'-deoksiribosa membentuk suatu nukleotida (Gambar 5.5). Sumbu utama fosfodiester bermuatan negatif DNA menghadap ke pelarut. Panjang suatu molekul DNA biasa diekspresikan dalam ribuan pasang basa atau pasangan kilobasa (kilobase pairs, kbp), misal pada *E. coli* disandi lebih dari 4000 kbp molekul DNA tunggal. Pada setiap pasang basa dipisahkan dari pasangan selanjutnya dengan jarak kira-kira 0,34 nm.

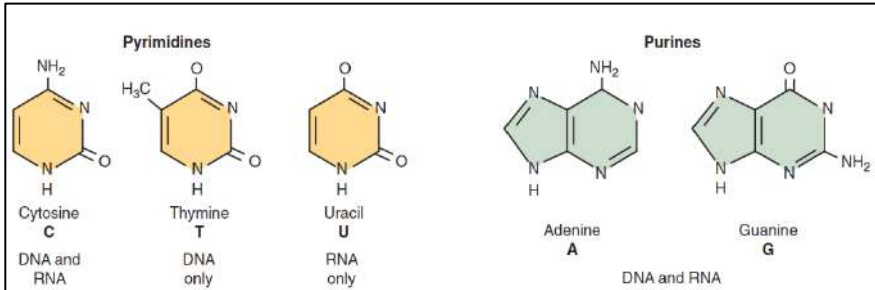
Replikasi DNA bakteri dimulai dari satu titik dan bergerak ke kedua arah (yaitu replikasi bidireksional). Pada proses ini, kedua untai DNA terpisah dan digunakan sebagai cetakan untuk menyintesis untai DNA baru (Replikasi semikonservatif). Struktur Ketika kedua untai terpisah dan sintesis yang baru terbentuk dikenal sebagai garpu replikasi. Replikasi kromosom bakteri dikontrol secara ketat, dan jumlah setiap kromosom (jika terdapat lebih dari satu) per jumlah sel yang bertumbuh berada di antara satu dan empat. Beberapa plasmid bakteri dapat mempunyai Salinan hingga 30 buah didalam satu sel bakteri. Replikasi DNA bakteri beruntai ganda yang sirkuler dimulai dari *ori* (lokasi original) dan melibatkan interaksi dengan beberapa protein (Gambar 5.6).



Gambar 5. 6. Proses Replikasi DNA
(Sumber : Ryan *et al*, 2018)

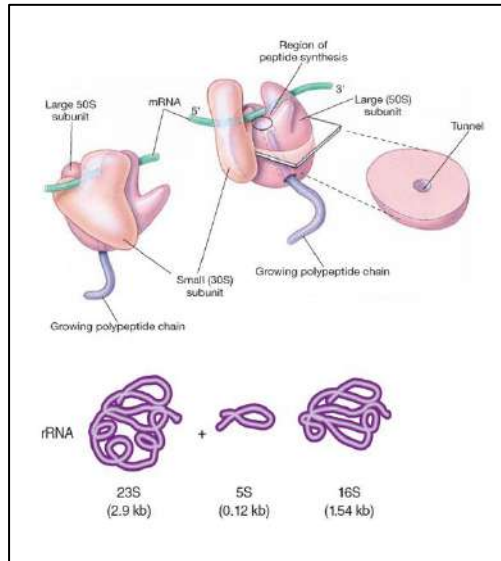
RNA paling sering terdapat dalam bentuk untai tunggal. Basa Urasil (U) menggantikan Timin (T) dalam untai DNA, sehingga basa komplementer yang menentukan struktur RNA adalah A-U dan C-G. Struktur keseluruhan molekul RNA untai-tunggal ditentukan oleh pasangan basa di dalam lup yang membentuk untai, dengan hasil molekul

RNA untai tunggal (Gambar 5.7). Fungsi paling umum RNA adalah komunikasi sekuen gen DNA dalam bentuk *messengerRNA* (mRNA) ke ribosom, proses ini transkripsi.



Gambar 5. 7. Perbedaan struktur molekul DNA dan RNA
(Sumber : Mahon *et al*, 2015)

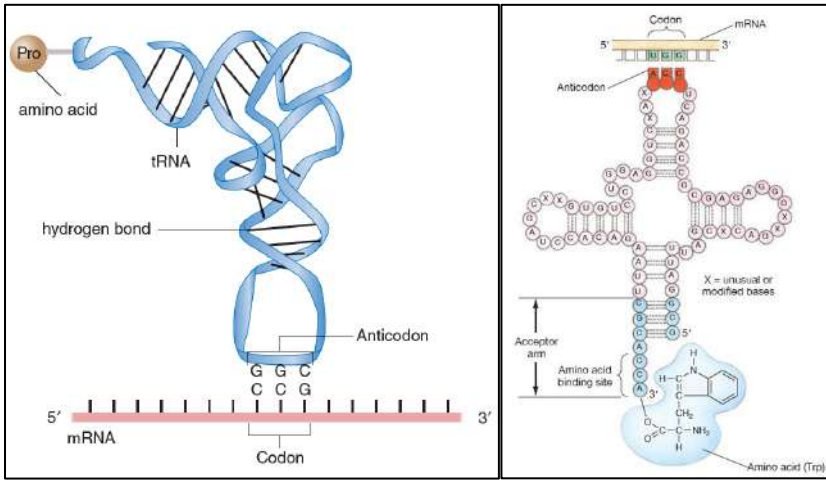
Translasi mRNA ditranskripsikan sebagai komplemen RNA ke untai DNA pengkode mRNA kemudian ditranslasi oleh ribosom. Ribosom yang mengandung kedua **ribosomal RNA (rRNA)** dan protein, mentranslasikan perintah ini ke dalam struktur primer protein melalui **aminoasil-transferRNA (tRNA)**. Molekul RNA bervariasi dalam ukurannya, dari tRNA yang kecil, yang mengandung kurang lebih 100 basa sampai mRNA yang mungkin membawa perintah genetik hingga beberapa ribu basa.



Gambar 5. 8. Struktur ribosom prokariot dan komposisi suatu ribosom yang terdiri dari satu salinan untuk masing-masing RNA 16S, 23S dan 5S

(Sumber : Black, J.G., & Black, L.J. 2015; Brooks *et al*, 2013).

Ribosom bakteri mengandung tiga macam rRNA, dengan ukuran berturut-turut 120, 1.540 dan 2900 basa dan sejumlah protein. Subunit kecil (30S) dan besar (50S) ditunjukkan dari dua sudut yang berbeda. Subunit membungkus untai mRNA, terdapat region sintesis peptida yang merupakan persimpangan ketiga komponen ini dan rantai polipeptida yang tumbuh melewati terowongan di subunit 50S, yang dapat dilihat pada penampang (Gambar 5.8).



Gambar 5. 9. Struktur Transfer RNA (tRNA), struktur dua dimensi dari tRNA triptopan
(Sumber : Black, J.G., & Black, L.J. 2015)

Molekul rRNA yang setara pada ribosom eukariota biasanya lebih besar. Kepentingan ekspresi gen individual berubah sesuai tuntutan fisiologi, dan kebutuhan akan ekspresi gen yang fleksibel tercermin dalam perputaran metabolisme yang cepat pada sebagian besar mRNA. Di lain pihak, tRNA (gambar 5.9) dan rRNA yang berkaitan dengan fungsi sintesis protein yang diperlukan secara universal cenderung stabil dan bersamaan mencakup lebih dari 95% total RNA pada sel bakteri.

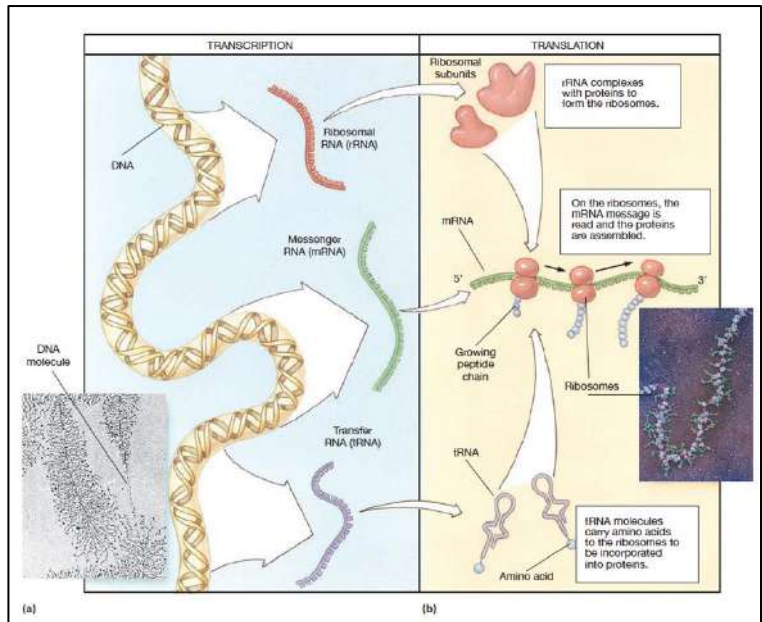
c. Sintesis Protein

Informasi genetik disandi dalam DNA, ditranskripsikan ke mRNA, dan ditranslasikan pada ribosom melalui tRNA menjadi struktur protein. Mekanisme tempat urutan nukleotida pada gen menentukan urutan asam amino dalam protein. Mekanismenya sebagai berikut :

- RNA polimerase membentuk untaian poliribonukleotida tunggal, yang disebut "*messenger RNA*" (mRNA), memakai

DNA sebagai cetakan (proses ini disebut Transkripsi). mRNA mempunyai urutan nukleotida komplementer terhadap untai cetakan pada rantai ganda DNA, jika dibaca dengan arah 3' ke 5'. Jadi suatu mRNA mempunyai orientasi arah 5' ke 3'

- Asam amino diaktivasi secara enzimatik dan ditransfer ke molekul adapter khusus RNA, disebut '*transfer RNA*' (tRNA). Setiap molekul adapter mempunyai triplet basa (antikodon) yang berkomplementer terhadap triplet basa mRNA, dan pada satu sisi asam aminonya yang spesifik. Triplet basa pada mRNA disebut kodon untuk asam amino tersebut



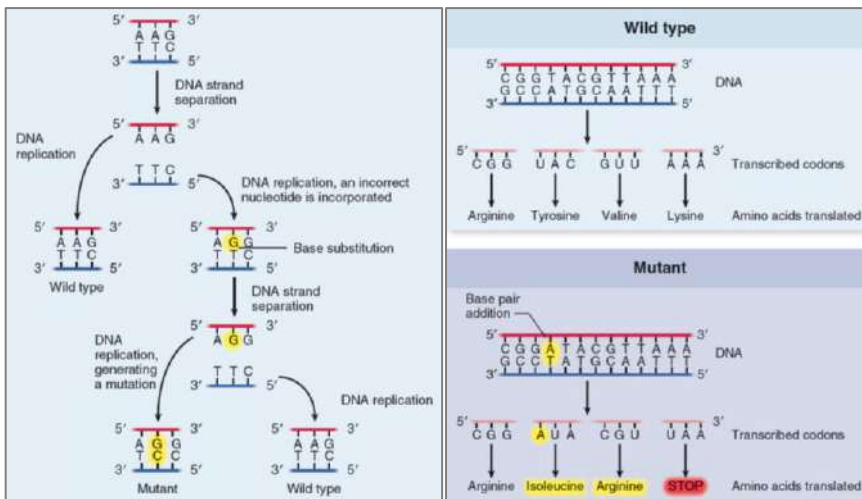
Gambar 5. 10. Transkripsi dan Translasi. (a) Transkripsi dari DNA ke RNA, (b) Translasi dari RNA ke protein.
(Sumber : Black, J.G., & Black, L.J. 2015)

- mRNA dan tRNA Bersama-sama menuju ke permukaan ribosom. Karena setiap tRNA menemukan triplet nukleotida yang komplementernya pada mRNA maka asam amino yang dibawahnya diletakkan pada

sambungan peptide dengan asam amino pada molekul tRNA sebelumnya. Ribosom bergerak sepanjang mRNA telah ditranslasikan ke dalam urutan asam amino yang sesuai (proses ini disebut Translasi)

5.2.2 Mutasi Gen

Mutasi adalah perubahan dalam sekuens DNA yang disebabkan oleh mutagen. Mutagen adalah penyebab terjadinya mutasi, seperti sinar ultraviolet (UV) termasuk mutagen fisik yang merusak DNA dengan menghubungkan basa timin yang bersebelahan sehingga membentuk dimer. Mutagen kimia dapat bekerja dengan cara mengubah struktur basa fisik ataupun struktur kimiawi DNA, seperti asam nitrit (HNO_2) mengganti grup amino dengan grup hidroksil DNA hasil mutase ini mengalami perubahan aktivitas cetakannya selama periode replikasi selanjutnya. Mutasi meliputi substitusi basa, delesi, insersi dan pengatur ulang (Gambar 5.11).



Gambar 5. 11. Mutasi pada pasangan basa. Substitusi basa (kiri) dan Penambahan atau insersi (kanan).

Substitusi basa dapat terjadi sebagai konsekuensi dari pembentukan pasangan yang salah antara basa komplementer selama replikasi. Pada *E. coli* hal ini terjadi sekitar satu kali setiap 10^{10} kali inkorporasi nukleotida; suatu proses yang akurat. Kejadian basa yang salah pasangan dikurangi sekecil mungkin oleh enzim yang berkaitan dengan perbaikan salah pasang. Suatu mekanisme yang sangat utama mengoreksi cetakan untaian yang baru disintesis untuk memastikan bahwa hasilnya sempurna berkomplemen dengan cetakannya.

5.2.3 Mekanisme Transfer Gen

Gen dapat dipindahkan dari satu sel bakteri ke bakteri lainnya melalui mekanisme transfer gen (transfer DNA). Karena beberapa jenis DNA yang dipindahkan tidak mengandung asal replikasinya, gen ini hanya akan dipindahkan masuk ke dalam kromosom penerimanya yang memiliki suatu asal replikasinya. Plasmid mengandung asal replikasinya sendiri sehingga dapat dipertahankan di dalam suatu inang melalui generasi berikutnya tanpa terintegrasi ke dalam kromosom. Pertukaran genetik bakteri dicirikan oleh transfer fragmen yang relatif kecil pada genom donor ke sel resipien. DNA dapat ditransfer dari satu sel ke sel lainnya, dan DNA dapat digabungkan secara stabil ke dalam resipien, dan secara permanen mengubah komposisi genetiknya. Material genetik dapat ditransfer dari satu bakteri ke bakteri lainnya melalui 3 cara yaitu; Transformasi, Transduksi dan Konjugasi. Perbandingan mekanisme transfer tersebut dapat dilihat pada tabel 5.2.

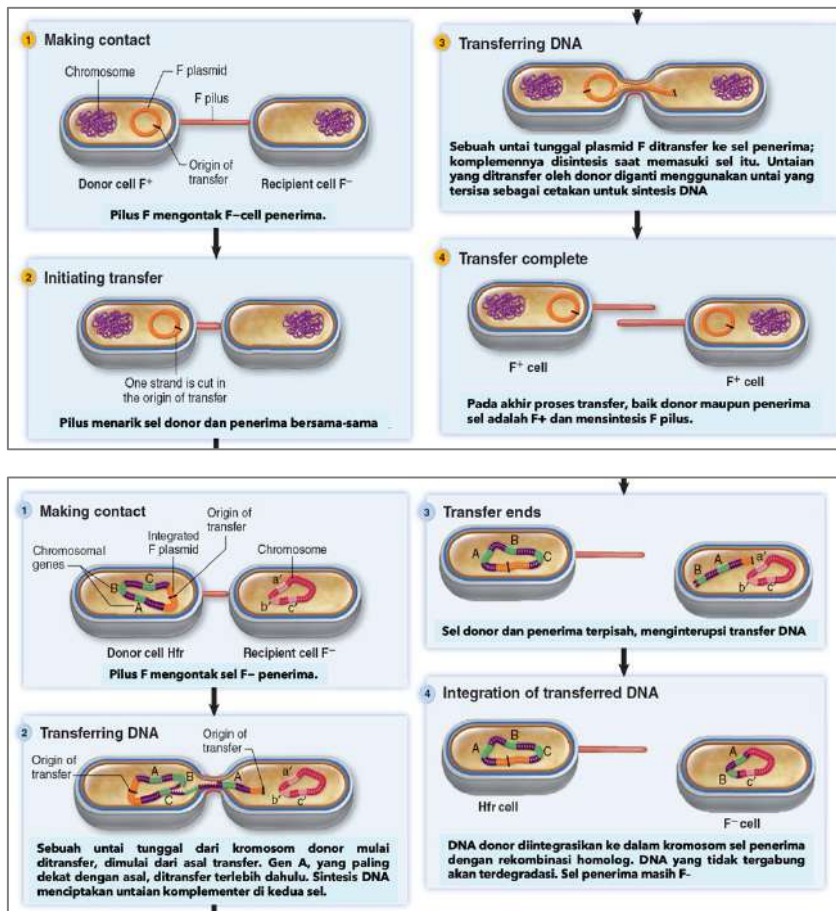
Tabel 5. 2. Perbandingan antara konjugasi, transduksi dan transformasi

Mekanisme transfer	Proses	Tipe sel	Sifat DNA yang ditransfer
Konjugasi	DNA ditransfer dari satu bakteri ke bakteri lainnya	Prokariot	Kromosomal atau plasmid
Transduksi	DNA ditransfer melalui virus dari satu sel ke sel lainnya	Prokariot	Setiap gen (transduksi umum), gen tertentu (khusus)
Transformasi	DNA murni diambil oleh sel	Prokariot atau eukariot	Setiap gen

(Sumber : Levinson, 2016)

1. Konjugasi

Konjugasi adalah suatu proses yang dipergunakan bakteri untuk memindahkan gen dari satu sel ke sel lain melalui kontak antar sel. Sel donor dan penerima harus memiliki susunan genetik yang cocok untuk saling melekat dan membentuk suatu jembatan sitoplasma antara sel tempat yang akan dilalui oleh DNA. Secara khusus, proses ini memerlukan adanya penonjolan seperti rambut pada sel donor yang disebut pilus seks yang berkontak dengan tempat reseptor khusus pada permukaan sel penerima. Kontak ini menyebabkan terbentuknya pasangan sel yang relatif stabil dan siap memulai pemindahan DNA.

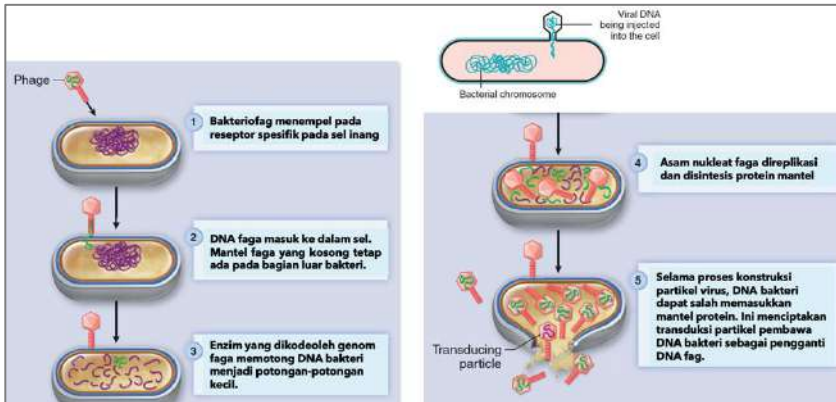


Gambar 5. 12. Proses Konjugasi. Transfer plasmid (atas), transfer DNA (Bawah)

(Sumber : Mahon *et al*, 2015)

2. Transduksi

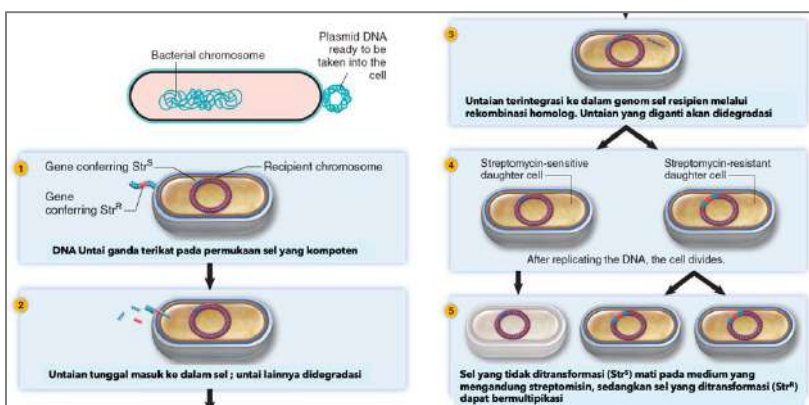
Istilah transduksi menyatakan adanya pemindahan gen dari suatu sel ke sel lainnya melalui vektor faga tanpa adanya kontak antar sel. DNA donor dibawah dalam mantel faga dan ditransfer ke dalam resipien melalui mekanisme yang digunakan pada infeksi faga.



Gambar 5. 13. Proses transduksi
(Sumber : Mahon *et al*, 2015)

3. Transformasi

Transformasi adalah pemindahan gen dari satu sel kepada sel lain dengan perantara DNA telanjang. Penemuan transformasi pada tahun 1928 yang dianggap sebagai salah satu yang terpenting dalam bidang biologi yang akhirnya mendorong untuk mengidentifikasi DNA sebagai suatu materi genetik. Transformasi dapat terjadi secara alamiah atau paksaan.



Gambar 5. 14. Proses transformasi
(Sumber : Mahon *et al*, 2015)

DAFTAR PUSTAKA

- Black, J.G., & Black, L.J. 2015. *Microbiology, Principles and Explorations, 9th Edition*. Willey; USA.
- Brooks, G.F., Carroll, K.C., Butel, J.S., Morse, S.A., & Mietzner, T.A. 2013. *Jawetz, Melnick, & Adelberg's Medical Microbiology Twenty-Sixth Edition*. United State of America: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cornelissen, C.N., Fisher, B.D., dan Harvey, R.A. 2015. *Lippincott's Illustrated Reviews, Ilustrasi Berwarna Mikrobiologi Edisi Ketiga, Jilid Satu*. Binarupa Aksara Publisher; Jakarta.
- Levinson, W. 2016. *Review of Medical Microbiology and Immunology, Fourteenth Edition*. United State of America: McGraw-Hill Education.
- Mahon, C.R., Lehman, D.C. & Manuselis, G. 2015. *Textbook Diagnostic Microbiology Fifth Edition*. Saunders Elsevier, Inc.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H. & Stahl, D.A., 2015. *Brock Biology of Microbioorganisms, Fourteenth Edition*. Pearson Education, Inc: United States of America.
- Ryan, K.N., et al. 2018. *Sherris Medical Microbiology Seventh Edition*. United State of America: McGraw-Hill Education.
- Tortora, G.J., Funke, B.R. & Case, C.L. 2016. *Microbiology An Introduction Twelfth Edition*. United State of America: Pearson Education, Inc.
- Pommerville, J.C. 2011. *Alcamo's Fundamentals of Microbiology Ninth Edition*. United State of America: Jones and Bartlett Publishers.

BAB 6

FLORA NORMAL MIKROBA TUBUH MANUSIA

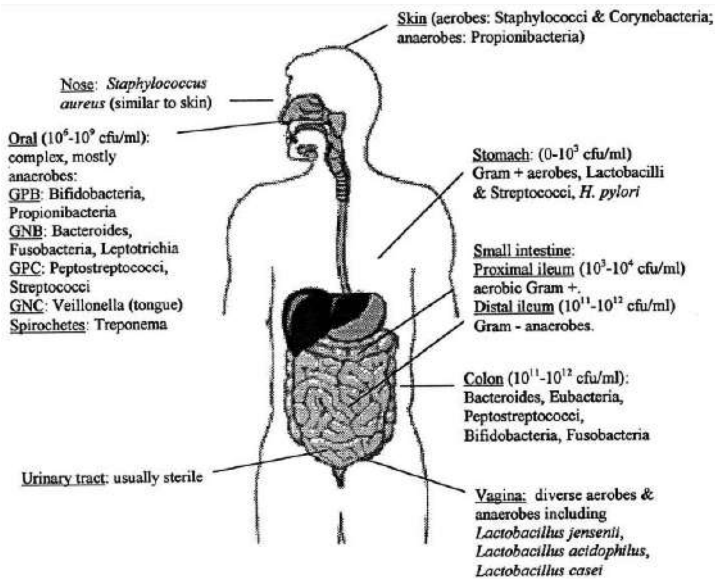
Oleh Nurfitri Arfani

6.1 Pendahuluan

Flora normal atau yang dikenal dengan istilah mikroflora merupakan mikroorganisme yang tersebar pada beberapa bagian tubuh manusia. Ada beberapa jamur dan protista eukariotik dalam flora normal manusia, tetapi bakteri adalah spesies mikroba yang paling umum. Mikroorganisme seperti virus dan parasit dianggap sebagai bukan flora normal oleh beberapa peneliti. Hal ini disebabkan tidak lazim dan kebanyakan bersifat patogen/tidak membantu inangnya. Meskipun sebagian besar mikroba normal yang ditemukan pada kulit, kuku, dan mata manusia aman untuk orang sehat, mereka dapat menyebabkan penyakit serius pada orang dengan sistem kekebalan yang lemah. Mikroflora memiliki sifat yang relative stabil dan terdapat di beberapa bagian tertentu dalam anatomi suatu organisme/individu. Selain itu, flora normal merupakan mikroorganisme yang ditemukan pada tubuh manusia terutama pada kulit dan membran mukosa.

Mikroflora normal dalam tubuh manusia terbentuk dan berkembang dimulai dari manusia itu lahir hingga dewasa. Dalam tubuh manusia, umumnya diperkirakan memiliki bakteri yang terdapat di hidung sebanyak 10^{12} , kemudian dimulut sekitar 10^{10} , pada saluran pencernaan sekitar 10^{14} dan pada bagian tubuh lainnya (Gambar 6.1). Jumlah mikroflora normal pada

tubuh manusia memiliki jumlah yang lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah sel pada eukariotik di jaringan ataupun organ yang membentuk manusia.



Gambar 6. 1. Sebaran Mikroflora Normal pada Tubuh Manusia
(Sumber: McFarland, 2000)

Mikroflora tersebut kebanyakan yang memiliki kemampuan dalam melekat pada permukaan tubuh serta dapat mudah beradaptasi pada tubuh inangnya (manusia). Akan tetapi perlu diketahui, bahwa pada tubuh manusia, ada bagian yang tidak dihuni oleh mikroflora normal yaitu pada bagian otak dan otot.

Faktor-faktor yang mempengaruhi keberadaan mikroflora dalam tubuh adalah suhu, kelembaban, nutrisi, serta adanya zat yang bersifat menghambat. Beberapa mikroflora berperan sebagai system imunitas organisme karena kemampuannya dalam menghasilkan zat yang dapat menekan atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme lainnya terutama mikroorganisme patogen. Dalam tubuh manusia, mikroflora ada yang menguntungkan dan ada yang merugikan. Mikroflora

normal yang merugikan ketika terjadi perpindahan habitat dan juga saat terjadi perubahan substrat yang biasanya berlangsung dalam kondisi tertentu. Selain itu, ketika imunitas seseorang menurun, maka hal itu juga yang mengakibatkan mikroflora menjadi patogen.

Flora normal pada tubuh manusia berperan dalam membantu memperkirakan jenis infeksi yang mungkin timbul setelah terjadi kerusakan jaringan pada situs-situs yang khusus, serta memberikan petunjuk mengenai kemungkinan sumber dan pentingnya mikroorganisme yang teramati pada beberapa infeksi klinis. Misalnya bakteri *Escherichia coli* tidak berbahaya di dalam usus, tetapi bila memasuki kandung kemih dapat menyebabkan sistitis yaitu peradangan pada selaput lendir kandung kemih.

Mikroflora normal pada tubuh manusia memiliki peran dalam melindungi tubuh dari infeksi patogen terutama bakteri. Hal ini dilakukan dengan cara menghasilkan vitamin K yang terdapat dalam usus besar serta merangsang pembentukan system imun pada tubuh manusia. Selain itu, mikroflora normal juga mampu berkompetisi dengan patogen dalam memperebutkan nutrisi dan ruang hidup. Mikroflora normal juga memiliki peran dalam terbentuknya mukosa usus yang normal. Hal ini seperti yang disebutkan dalam suatu penelitian yang mengamati hewan yang baru dilahirkan dengan keadaan tidak memiliki bakteri apapun dalam tubuhnya atau dikenal dengan istilah *germ free animal* (disterilkan dari bakteri) dan juga hewan kontrol yang baru dilahirkan dengan tubuh yang dihuni mikroflora normal. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa hewan tanpa mikroflora normal mati atau dalam artian tidak bertahan hidup dibandingkan hewan kontrol yang bisa tumbuh dan berkembang karena memiliki anatomi usus yang normal.

Selain sifatnya yang menguntungkan, mikroflora normal juga merugikan yaitu ketika jumlahnya dalam tubuh melampaui batas normal dan tidak berada pada tempatnya sehingga

mengakibatkan terjadinya infeksi pada manusia terutama ketika imunitas seseorang menurun. Faktor-faktor seperti pH, suhu, oksigen, ketersediaan air, nutrient serta faktor lainnya merupakan hal-hal yang memperngaruhi densitas dan penyebaran dari mikroflora normal. Secara spesifik, mikroflora normal tersebar pada bagian tubuh tertentu atau disebut tropisme seperti pada Tabel 6.1. Hal ini disebabkan beberapa factor sebagai berikut:

1. Mikroflora normal bersifat tropisme karena cenderung menyukai suatu tempat (jaringan) tertentu yang dapat menyediakan sumber nutrisi bagi partumbuhannya.
2. Antara ligan atau komponen dinding sel mikroflora normal memiliki kecocokan dengan reseptor pada jaringan tersebut.
3. Mikroflora normal memiliki kemampuan seperti saling bekerjasama dengan lingkungannya dan mampu hidup berkelompok dengan bakteri lainnya atau dikenal dengan istilah biofilm.

Tabel 6. 1. Mikroflora normal pada tubuh manusia

Bagian Tubuh Manusia	Jenis Mikroflora
Kulit	<i>Staphylococcus</i> sp., <i>Corynobacterium</i> sp., <i>Acinobacter</i> sp., dan <i>Propionibacterium</i> sp.
Mulut	<i>Streptococcus</i> sp., <i>Lactobacillus</i> sp., <i>Fusobacterium</i> sp., <i>Veillonella</i> sp., <i>Corynibacterium</i> sp., dan <i>Neisseria</i> sp.
Saluran Pernapasan	<i>Staphylococcus</i> sp., <i>Streptococcus</i> sp.,

Bagian Tubuh Manusia	Jenis Mikroflora
	<i>Corynebacterium</i> sp., dan <i>Neisseria</i> sp.
Saluran Pencernaan	<i>Lactobacillus</i> sp., <i>Streptococcus</i> sp., <i>Bifidobacterium</i> sp., <i>Eubacterium</i> sp., <i>Peptococcus</i> sp., <i>Peptostreptococcus</i> sp., <i>Ruminococcus</i> sp., <i>Clostridium</i> sp., <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella</i> sp., <i>Proteus</i> sp., dan <i>Enterococcus</i> sp.
Saluran Urogenitalia	<i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella</i> sp., <i>Proteus</i> sp., <i>Neisseria</i> sp., dan <i>Lactobacillus</i> sp.

6.2 Klasifikasi Flora Normal/Mikroflora Normal

Mikroflora normal terbagi atas dua bagian yaitu sebagai berikut:

a. Flora Residen

Flora residen atau yang biasa dikenal dengan istilah mikroflora penghuni tetap yaitu mikroflora yang memang menghuni bagian tubuh tertentu dan ketika terjadi eradikasi, maka akan menyebabkan mikroflora tersebut akan tetap hidup lagi. Mikroflora jenis ini termasuk mikroorganisme yang paling banyak ditemukan pada bagian kulit terutama pada lapisan epidermis dan pada bagian celah kulit. Selain itu, mikroflora ini sulit dilepaskan karena melekat kuat pada kulit.

b. Flora Transien

Flora transien atau penghuni sementara adalah mikroflora yang berada di suatu lokasi tubuh untuk jangka waktu pendek (beberapa jam, hari atau minggu). Mikroflora jenis ini kebanyakan berada dibagian bawah kulit dan juga pada mukosa. Selain itu, jenis juga berasal dari lingkungan yang terkontaminasi atau nosocomial.

Kebanyakan mikroflora jenis ini kerika berasal dari lingkungan luar, tidak akan menyebabkan penyakit karena tidak berada dalam tubuh manusia selamanya misalnya bakteri *Escherichia coli*, *Salmonella* sp., dan *Shigella* sp. Mikroflora jenis ini kadang-kadang muncul secara tiba-tiba yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan, akan tetapi sifatnya tidak menetap dan tidak pula menyebabkan penyakit. Mikroflora transien dalam tubuh memiliki jumlah yang sedikit ketika flora normal masih banyak dan utuh. Akan tetapi, jika flora normal berubah maka flora normal akan melakukan kolonisasi, berkembang biak sehingga menyebabkan penyakit.

Mikroorganisme dalam tubuh memiliki jumlah yang selalu tetap baik jumlah maupun jenisnya. Jika ada perubahan akan kembali seperti semula. Selain residen dan transien, ada juga mikroflora yang bersifat mutualisme. Mikroflora jenis ini mampu mendapatkan makanan atau nutrisi yang berasal dari hasil sekresi dan juga produk-produk hasil sisa dari tubuh manusia, dan tubuh memperoleh vitamin atau zat dari hasil sintesis dari flora normal. Mikroflora normal umumnya bisa bertahan dari lingkungannya walaupun dalam kondisi buruk sekalipun. Untuk mikroorganisme sementara yaitu mikroorganisme nonpatogen atau potensial pathogen yang berada di kulit dan selaput lendir mukosa. Mikroflora ini terkadang ada secara tiba-tiba terutama karena pengaruh lingkungan. Selain itu, mikroflora jenis ini memiliki jumlah yang lebih sedikit dengan kondisi ketika mikroflora normal masih tetap utuh. Ketika mikroflora normal

mengalami perubahan, maka mikroflora tersebut akan melakukan kolonisasi, berkembang biak, dan pada akhirnya akan menimbulkan penyakit.

6.3 Jenis-Jenis Flora Normal dalam Tubuh

6.3.1 Flora Normal pada Kulit

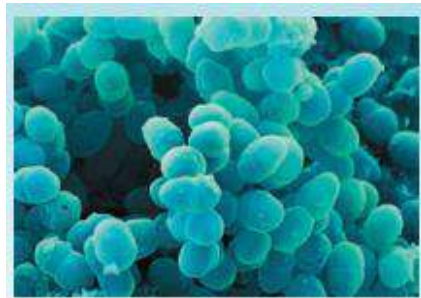
Salah satu organ pada tubuh manusia yang berperan sebagai pertahanan utama atau pengaruh dari lingkungan adalah kulit. Kulit merupakan organ yang memiliki kelembaban yang sangat rendah dan terbilang asam, sehingga tempat ini sangat minim terutama bagi pertumbuhan mikroflora normal. Selain itu kulit mengalami kekeringan secara berkala. Didalam kulit terdapat banyak mikroorganisme yang jumlahnya bahkan sampai ribuan, akan tetapi yang bisa menetap atau tinggal dikulit hanya beberapa saja. Jumlah mikroflora norma bakteri pada kulit terdiri atas 180 spesies bakteri.

Pada sebagian orang sehat, mikroflora normal pada kulit terutama terdapat pada lapisan epidermis. Flora normal di kulit bersifat menetap atau tinggal sementara. Jenis bakteri yang bersifat menetap dan stabil pada umumnya bakteri Gram positif: *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Corynebacterium* dan *Propionibacterium* (*Propionibacterium acnes* penyebab jerawat). Bakteri Gram-negatif lebih jarang tumbuh di kulit manusia karena kurang dapat berkompetisi dengan Gram-positif yang lebih tahan terhadap kekeringan misalnya *Acinetobacter* yaitu bakteri Gram negatif yang umum tumbuh di kulit.

Salah satu penyebab bakteri tidak menetap dikulit karena kulit yang selalu melakukan kontak secara terus menerus dengan bakteri yang berasal dari udara sehingga mengakibatkan suasana kulit tidak mendukung untuk pertumbuhan mikroflora normal. Kulit memiliki suhu sekitar $\leq 37^{\circ}\text{C}$ dan juga bersifat asam. Bagian kulit seperti pori-pori, folikel rambut dan kelenjar keringat sebenarnya mampu mendukung pertumbuhan dari mikroflora

akan tetapi pada daerah tersebut secara alami dilindungi oleh enzim yang berperan dalam merusak peptidoglikan bakteri (terutama bakteri Gram positif) yang disebut enzim lisosim. Pelindung lain terhadap kolonisasi kulit oleh bakteri patogen adalah mikroflora normal kulit. Mikroflora tersebut merupakan suatu kumpulan bakteri nonpatogen yang normalnya berkolonisasi pada setiap area kulit yang mampu mendukung pertumbuhan bakteri. Mikroba yang hidup di daerah kulit berperan dalam menjaga infeksi dari mikroba patogen melalui persaingan memperoleh nutrisi dan ruang. Selain itu mikroba tersebut mengeluarkan senyawa toksik yang mampu menghambat keberadaan berbagai mikroba

Jenis mikroflora normal yang menghuni pada daerah kulit antara lain: *Cyanobacteria* sp., *Staphylococcus epidermidis* (Gambar 6.2), *Streptococcus viridans*, *Staphylococcus aureus*, dan *Difteri* sp. Secara umum, jumlah mikroflora pada kulit tidak mengalami perubahan secara signifikan yang biasa disebabkan oleh proses mandi, keringat yang berlebihan, serta pada saat pencucian. Akan tetapi, peningkatan populasi dari mikroflora ini akan meningkat secara keseluruhan karena perubahan kualitatif mikroflora itu sendiri. Beberapa faktor lingkungan mempengaruhi jumlah/komposisi flora normal di kulit seperti cuaca karena mempengaruhi suhu dan kelembaban kulit, umur, dan kebersihan pribadi.



Gambar 6. 2. Bakteri *Staphylococcus epidermidis* pada Kulit
(Sumber: Tortora *et.al.*, 2016)

6.3.2 Flora Normal pada Mulut

Salah satu bagian tubuh manusia yang memiliki kelembaban yang cukup tinggi adalah di mulut. Hal ini disebabkan adanya makanan terlarut secara konstan dan juga partikel-partikel kecil makanan membuat mulut merupakan lingkungan ideal bagi pertumbuhan bakteri. Beberapa jenis flora normal yang terdapat dimulut adalah genus *Streptococcus*, *Neisseria*, *Veillonella*, *Actinomyces*, dan *Lactobacillus*. Mikroflora pada mulut memiliki jumlah yang beragam tergantung dari kesehatan individu (manusia) masing-masing. Saat lahir, rongga mulut pada hakikatnya merupakan suatu inkubator yang steril, hangat, dan lembab yang mengandung sebagai substansi nutrisi seperti air liur terdiri atas asam amini, banyak air, asam amino, lipid, sehingga rongga mulut menjadi tempat yang baik bagi pertumbuhan mikroflora.

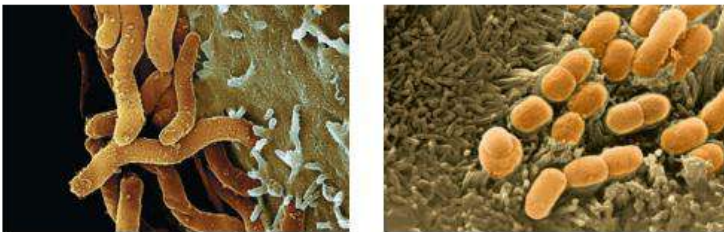
Air ludah mengandung nutrien bagi mikroba tetapi konsentrasinya kecil. Air ludah mengandung senyawa antimikroba misalnya lisosim dan sisa-sisa makanan dalam mulut menyediakan makanan bagi mikroba di rongga mulut. Glikoprotein asam dari air ludah membentuk lapisan tipis di permukaan gigi sebagai tempat perlekatan mikrokoloni. Streptococci terutama *Streptococcus sanguis*, *S. sobrinus*, *S. mutans* dan *S. mitis* dapat mengkoloni lapisan glikoprotein. Pertumbuhan yang lebat dari bakteri-bakteri tersebut menyebabkan lapisan bakteri yang relatif tebal yang disebut plak gigi. Jika terjadi akumulasi plak, mikroflora yang menetap akan menghasilkan asam organik dengan konsentrasi tinggi sehingga menyebabkan dekalsifikasi dari enamel dan menyebabkan karies gigi (kerusakan gigi). Bakteri yang berperan menyebabkan terjadinya karies pada gigi adalah *S. sobrinus* dan *S. mutans*. Gigi terdiri dari matrik mineral berupa kristal kalsium fosfat (enamel) yang menyelubungi jaringan hidup berupa dentin dan pulp. Pada bayi yang belum memiliki gigi, bakteri dalam mulut sebagian

besar bersifat anaerob toleran, sebagian kecil aerob. Jika gigi sudah tumbuh, bakteri yang dominan bersifat anaerob.

6.3.3 Flora Normal pada Saluran Pencernaan

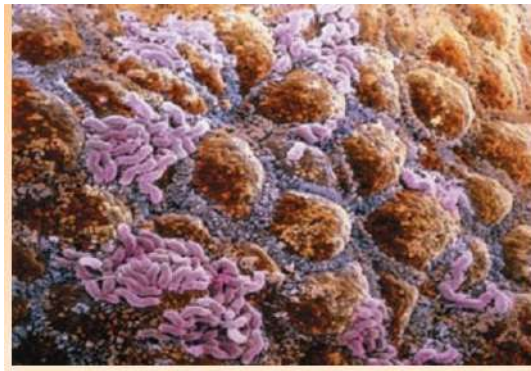
Saluran pencernaan terdiri dari lambung, usus kecil, dan usus besar. Pada saluran pencernaan manusia memiliki mikroflora sebanyak 300 bakteri. Di lambung, jenis mikroflora yang sering ditemukan adalah *Helicobacter pylori* yang mengkoloni dinding lambung, dan dapat menyebabkan penyakit lambung (maag). Lambung berisi cairan yang sangat asam ($\text{pH} \pm 2$), sehingga bersifat selektif bagi mikroba. Berbeda dengan lambung, usus halus merupakan lokasi atau tempat yang sulit bagi mikroflora dalam membentuk koloni. Hal ini disebabkan kecepatan aliran dalam usus halus yang terbilang tinggi. Mikromolekul karbohidrat (polisakarida) yang berasal dari makanan tidak dapat dipecah oleh enzim pada kolon, akan tetapi dengan keberadaan mikroflora normal pada usus maka akan terjadi proses fermentasi polisakarida yang menghasilkan propionat, asetat, dan biuret sehingga mudah terpecah.

Usus halus terdiri dari duodenum, jejunum, ileum. Jumlah mikroflora pada ileum bagian bawah terdiri sekitar 10^5 - 10^7 sel/gram bakteri. Flora normal pada usus halus, sebagian besar adalah bakteri Gram positif berbentuk coccus dan basil. Di dalam jejunum atau usus halus kosong kadang kala dijumpai spesies-spesies seperti *Enterococcus*, *Lactobacillus*, dan *Difteri*.



Gambar 6. 3. Flora Normal pada Saluran Pencernaan
(Sumber: Tortora *et.al*, 2016)

Pada usus besar, memiliki bakteri dalam jumlah yang besar. Di usus ini, terjadi proses fermentasi dan hasil pencernaan menghasilkan nutrient. Salah satu bakteri yang terdapat di usus besar adalah *Escherichia coli* ada dalam jumlah lebih kecil dari bakteri lain (Gambar 6.4). Selain itu, juga ditemukan bakteri *Bacteroides* dan *Clostridium*. Dalam saluran pencernaan, mikroflora normal berperan dalam melawan mikroorganisme patogen, mengkonversi asam dan pigmen empedu. Selain itu, mikroflora ini juga mampu mensintesis vit. K serta mengabsorpsi zat makanan.



Gambar 6. 4. Bakteri *Escherichia coli* di Usus Besar
(Sumber: Tortora et.al., 2016)

6.3.4 Flora Normal pada Saluran Pernapasan

Saluran pernafasan terdiri atas: rongga hidung, rongga mulut, kerongkongan, tenggorokan. Bakteri masuk melalui saluran pernapasan bagian atas secara terus menerus pada saat bernafas yaitu melalui hidung dan sebagian akan tersaring didalam hidung. Flora normal pada saluran pernapasan terdiri atas *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Corynebacterium*, *Neisseria*, dan *Haemophilus*. Beberapa bakteri potensial patogen respiratori seperti Gram negatif batang, *Streptococcus pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Haemophilus influenza* dan *Moraxella catarrhalis* juga dapat ditemukan dalam keadaan sehat

yang dapat menjadi sumber penyebaran serta penyakit bagi orang lain.

Bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Streptococcus pneumoniae* sering kali menjadi bagian dari flora normal di nasofaring dari organisme normal. Kebanyakan manusia sebagai pembawa (carrier) patogen dalam tubuhnya akan tetapi ketika dalam keadaan normal tidak menjadi sakit (penyakit). Karena ada kompetisi dengan flora normal lainnya mengakibatkan pertumbuhan dan aktivitasnya terhambat sehingga sistem kekebalan tubuh manusia juga menghambat pertumbuhan patogen.

6.3.5 Flora Normal pada Saluran Urogenital

Kantung kemih manusia bersifat steril. Sel-sel epitel bagian bawah uretra banyak ditumbuhi bakteri batang dan bulat gram negatif aerobik fakultatif. Bakteri seperti *Escherichia coli* dan *Proteus mirabilis* secara normal mampu berkembang biak dalam uretra dalam jumlah yang sedikit. Akan tetapi, ketika kondisi dalam uretra berubah misalnya pH berubah maka akan menyebabkan bakteri tersebut bersifat patogen sehingga mampu menginfeksi saluran kencing terutama pada wanita. Vagina yang merupakan bagian dari saluran urogenital tidak menghasilkan glikogen dan bersifat alkalin terutama ketika masa sebelum manusia (wanita) mengalami pubertas. Pada wanita dewasa, vagina mengandung glikogen, *L. acidophilus* tumbuh dan memfermentasi glikogen menghasilkan asam laktat yang menyebabkan lingkungan bersifat asam sehingga mikroorganisme lain masih dapat hidup tetapi sedikit: khamir/yeast (*Torulopsis*, *Candida*), *Streptococci* dan *E. coli*. Selanjutnya, setelah menopause, produksi glikogen berkurang, pH meningkat dan flora normal kembali seperti pada masa sebelum pubertas.

6.4 Dampak Positif dan Negatif Flora Normal

Mikroflora normal dalam tubuh manusia selalu memiliki dampak yang positif maupun negative yaitu sebagai berikut:

6.4.1 Dampak Positif

Peran utama yang dimiliki oleh mikroflora normal yang hidup pada bagian tertentu dalam tubuh manusia adalah kemampuannya dalam menjaga imunitas (menjaga kesehatan). Beberapa jenis mikroflora normal dalam saluran pencernaan misalnya dapat menyerap berbagai zat makanan dan dapat mensintesis vitamin K. Selain itu, mikroflora yang terdapat pada mukosa dan kulit berperan sebagai sistem pertahanan awal dan mampu mencegah bakteri patogen berkolonisasi. Mekanisme gangguan ini tidak jelas yang mungkin saja melalui kompetisi pada reseptor atau tempat pengikatan pada sel penjamu, kompetisi untuk zat makanan, penghambatan oleh produk metabolik atau racun, penghambatan oleh zat antibiotik atau bakteriosin (metabolit sekunder).

Dalam proses kolonisasi yang dilakukan oleh mikroflora, akan menjadi menguntungkan bagi inangnya. Hal ini disebut dengan resistensi kolonisasi yaitu ketika mikroorganisme patogen yang masuk dalam tubuh manusia tidak dapat menghuni daerah yang telah ditempati oleh mikroflora tersebut. Namun pada keadaan tertentu, flora normal di dalam mulut dapat menjadi patogen oportunistik dan menyebabkan masalah infeksi rongga mulut, seperti karies, gingivitis, stomatitis, glossitis, dan periodontitis.

6.4.2 Dampak Negatif

Mikroflora normal selain menguntungkan, juga dapat merugikan. Hambatan yang berasal dari lingkungan mengakibatkan organisme bersifat *non invasive* (tidak bisa ditembus) misalnya ketika mikroflora ini masuk melalui aliran

darah dan jaringan sehingga akan menjadi patogen. Misalnya bakteri *Streptococcus viridans* bisa masuk aliran darah saat proses pencabutan gigi dan *Escherichia coli* pada usus masuk ke uretra sehingga menyebabkan infeksi saluran kemih.

DAFTAR PUSTAKA

- Dwidjoseputro, D. (2003). 'Dasar-Dasar Mikrobiologi. Djambatan. Jakarta. pp. 214.
- Madigan et al. (2017). 'Brock Biologi Mikroorganisme. 14th edition. Penerbit Buku kedokteran EGC.
- McFarland, Lynne V. (2000). 'Normal Flora: Diversity and Functions. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 12: 193–207.
- Pelczar, Michael J., dan Chan, E. C. S. (1986). 'Dasar-Dasar Mikrobiologi, Universitas Indonesia, UI-Press, Jakarta. Pp. 190-191.
- Tortora G. J., Funke B. R., and Case C. L. (2016). 'Microbiologi: An Introduction, Twelfth Edition. U.S: Pearson Education.
- Sumarsih, S. (2003). 'Mikrobiologi Dasar. Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Yogyakarta.
- Waluyo, L. (2004). 'Mikrobiologi Umum. UMM Press. Malang.

BAB 7

IMUNITAS TERHADAP INFEKSI

Oleh Meri

7.1 Pendahuluan

Manusia memiliki imunitas tubuh yang dapat menjaga dirinya terhadap mikroorganisme patogen. Mikroorganisme yang dapat menyebabkan penyakit salah satunya adalah bakteri. Bakteri yang masuk ke dalam tubuh tidak hanya satu jenis, tetapi berbagai jenis. Dalam pengendaliannya pun diperlukan multiseluler dari sistem imun untuk mencegah infeksi menjadi lebih banyak dan melawan mikroorganisme patogen dengan segera. Sehingga manusia tetap dapat menjalankan kehidupan secara sehat, tanpa ada infeksi bakteri (Wolf and Underhill, 2018).

7.2 Imunitas

Imunitas merupakan kumpulan sel, bahan kimia, dan proses yang memiliki fungsi untuk melindungi kulit, saluran pernapasan, saluran pencernaan, dan area lain dari antigen asing, seperti mikroorganisme (jamur, bakteri, parasit), virus, racun dan sel kanker (Marshall *et al.*, 2018). Pada proses menjaga daya tahan tubuh, tidak diperankan oleh satu jenis sel atau jaringan, tetapi merupakan koordinasi dari berbagai sel, bahan kimia dan juga jaringan. Di dalam tubuh memiliki imunitas yang sudah ada sejak lahir dan imunitas yang muncul setelah adanya respon terhadap

antigen spesifik yang sudah dikenalnya. Dengan demikian, imunitas dapat diklasifikasikan karena memiliki perbedaan.

Imunitas tubuh dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu imunitas alami atau bawaan atau innate atau non spesifik, dan imunitas adaptif atau didapat atau spesifik. Kedua imunitas ini memiliki peran yang sama yaitu untuk melindungi kita dari infeksi.

7.2.1 Imunitas Alamiah

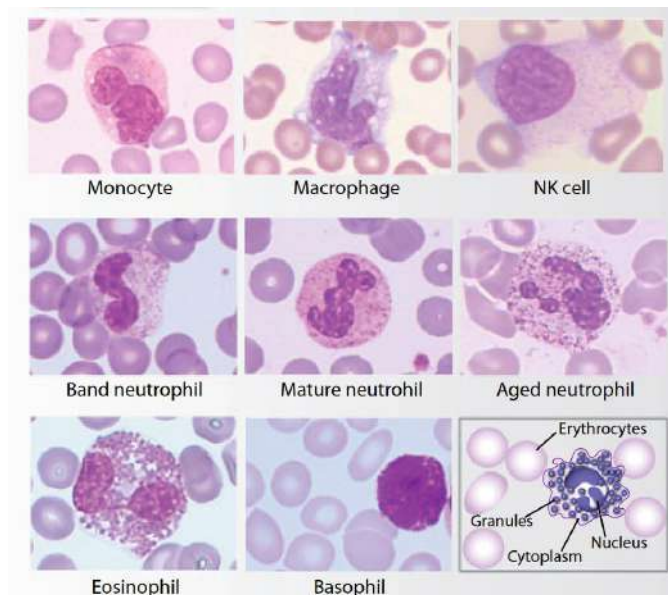
Imunitas Alamiah atau bawaan atau non-spesifik merupakan garis pertahanan pertama terhadap gangguan dari patogen. Mekanisme pertahanan imunitas ini tidak bergantung pada antigen (tidak spesifik) yang digunakan oleh pejamu segera atau dalam beberapa jam (menit sampai jam) setelah bertemu dengan antigen. Respons imun alamiah tidak memiliki memori imunologis sehingga tidak dapat mengenali atau “mengingat/memori” patogen yang sama bila tubuh terpapar patogen tersebut di masa mendatang. (Marshall *et al.*, 2018).

Fungsi penting dari imunitas bawaan adalah rekrutmen cepat sel imun ke tempat infeksi dan peradangan melalui produksi sitokin dan kemokin (protein kecil yang terlibat dalam sel-sel imunitas), komunikasi sel dan rekrutmen (Marshall *et al.*, 2018).

Komponen yang termasuk imunitas alamiah adalah lapisan fisik, yaitu kulit, mukosa, asam laktat, bahan biokimia, dan seluler. Kulit merupakan pertahanan pertama apabila tubuh terpapar benda asing. Pada bagian kulit terdiri dari berbagai macam bagian serta bahan yang dapat berperan penting seperti adanya sebum, antibiotik alamiah, pigmen kulit dan lain sebagainya. Jika kulit tidak mampu mempertahankan perannya, maka mikroorganisme dapat menembus lapisan tersebut dan dapat diatasi oleh peran sistem imun yang ada di lapisan lebih dalam dari bagian kulit. Salah satu bagian tersebut adalah peran seluler

yang terdapat pada pembuluh darah di bagian lapisan dibawah kulit.

Darah merupakan salah satu bagian dari sistem imun alamiah, terutama sel darah putih. Jenis sel darah putih diantaranya sel neutrophil, basophil, eosinophil, monosit, dan makrofag, serta sel Natural killer (sel NK) (Gambar 7.1). Namun sel limfosit tidak termasuk ke dalam sistem imun alamiah. Sel limfosit termasuk ke dalam sistem imun adaptif (Carlberg and Velleuer, 2022).



Gambar 7. 1. Sel imun pada Imunitas Alamiah

(sumber : Carlberg and Velleuer, 2022)

Fagosit termasuk monosit, makrofag, dan neutrofil. Mereka dapat menginternalisasi (fagositosis) patogen, antigen, dan puing-puing sel dan memusnahkannya. Makrofag juga dapat memproses dan menyajikan antigen, sehingga mereka dapat dikenali oleh sel T (Male, 2021).

Sel NK (Natural killer) merupakan sel yang dapat membunuh berbagai macam virus sel target yang terinfeksi atau berubah, terutama sel yang memiliki kehilangan atau pengurangan ekspresi molekul MHC kelas I, atau ekspresi molekul MHC alogenik. Sel NK dapat diidentifikasi melalui ekspresi *Cluster of Differentiation*-56 atau CD56 dan CD16. Sel NK membunuh target menggunakan mekanisme yang mirip dengan sel limfosit T sitotoksik atau CTL dengan komponen granula perforin dan granzymes menjadi yang paling penting (Male, 2021).

Komponen lain yang merupakan sistem imun alamiah adalah bahan humoral atau cairan tubuh seperti lisosim, komplemen, dan C-reaktif Protein (CRP), interferon (Male, 2021) serta proses inflamasi. Komplemen adalah sekelompok molekul serum yang terlibat dalam kontrol peradangan, penghapusan kompleks imun dan lisis patogen atau sel yang peka oleh antibodi, atau mediators dari keluarga collectin, ficolin, dan pentraxin (Male, 2021). Protein fase akut adalah molekul serum yang meningkat dengan cepat pada awal infeksi, seperti protein C-reaktif, serum amiloid-P, serum amyloid-A, dan *mannan-binding lectin* (MBL). Interferon (IFN) adalah sekelompok molekul yang membatasi penyebaran infeksi virus. Ada tiga jenis: IFN α dan IFN β , diproduksi oleh leukosit dan fibroblas, dan IFN γ , diproduksi oleh diaktifkan Sel T dan sel NK. Interferon yang berasal dari sel teraktivasi atau sel yang terinfeksi virus, berikatan pada reseptor dari sel terdekat, sehingga menginduksi untuk membuat protein antivirus. IFN α dan IFN β berikatan dengan reseptor IFN tipe I, sedangkan IFN γ berikatan dengan reseptor tipe II. IFN γ juga memiliki banyak lainnya fungsi imunomodulator (Male, 2021).

7.2.2 Imunitas Didapat

Imunitas didapat atau adaptif atau spesifik, bergantung pada antigen dan spesifik terhadap antigen tertentu, sehingga memerlukan jeda waktu antara pemaparan terhadap antigen dan

merespon secara maksimal. Ciri khas imunitas adaptif adalah kapasitas memori yang memungkinkan pejamu meningkatkan respons imun yang lebih cepat dan efisien setelah paparan antigen berikutnya (Marshall *et al.*, 2018).

Fungsi utama respon imun adaptif adalah: pengenalan antigen “non-self” yang spesifik, membedakannya dari antigen “self”; pembentukan jalur efektor imunologi spesifik patogen yang menghilangkan patogen spesifik atau sel yang terinfeksi patogen; dan pengembangan memori imunologis yang dapat dengan cepat menghilangkan patogen tertentu jika terjadi infeksi berikutnya. (Marshall *et al.*, 2018).

Imunitas bawaan dan adaptif bukanlah mekanisme pertahanan tubuh yang saling eksklusif, melainkan saling melengkapi, dengan adanya cacat atau kegagalan pada salah satu sistem akan mengakibatkan kerentanan tubuh atau respons yang tidak tepat (Marshall *et al.*, 2018).

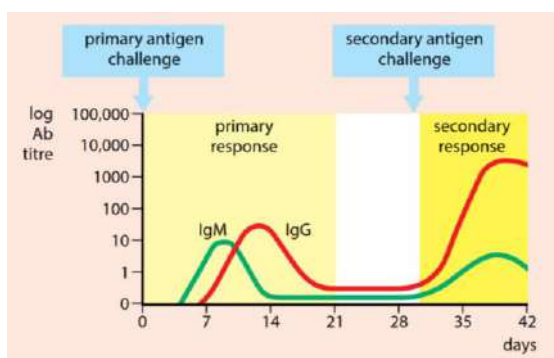
Jenis imunitas didapat atau adaptif diperankan oleh sel limfosit, baik limfosit B maupun limfosit T (gambar 9.2). Sel limfosit B memiliki tugas memproduksi antibodi atau immunoglobulin, sedangkan sel T tidak menghasilkan antibodi. Limfosit T akan menjadi limfosit efektor yang aktif (limfosit aktif) pada saat merespon adanya mikroorganisme, sedangkan limfosit B akan mengalami diferensiasi menjadi sel plasma untuk menghasilkan antibodi (Carlberg and Velleuer, 2022). Antibodi yang diproduksi adalah immunoglobulin G (IgG), immunoglobulin M (IgM), immunoglobulin A (IgA), immunoglobulin E (IgE), dan immunoglobulin D (IgD) (Carlberg and Velleuer, 2022)(Adlung, 2022).



Gambar 7. 2. Sel Imun Pada Sistem Imunitas

(sumber : Carlberg and Velleuer, 2022)

Antibodi yang dihasilkan sebagai respon adanya pertahanan tubuh terhadap mikroorganisme terdiri dari beberapa jenis, yaitu respon antibodi primer dan sekunder (gambar 9.3). Pada respon antibodi primer akan memiliki kualitas lebih rendah dibandingkan respon antibodi sekunder. Dapat dilihat pada gambar, antibodi primer memiliki puncak kuantitas titer antibodi lebih sedikit, respon lebih pendek dan mudah cepat menurun, sedangkan respon antibodi sekunder memiliki jumlah titer antibodi beberapa kalilipat yang dihasilkan serta mengalami penurunan dalam jangka yang lebih lama dibandingkan antibodi primer (Male, 2021).



Gambar 7. 3. Respon Antibodi Primer dan Sekunder

(Sumber: Male, 2021).

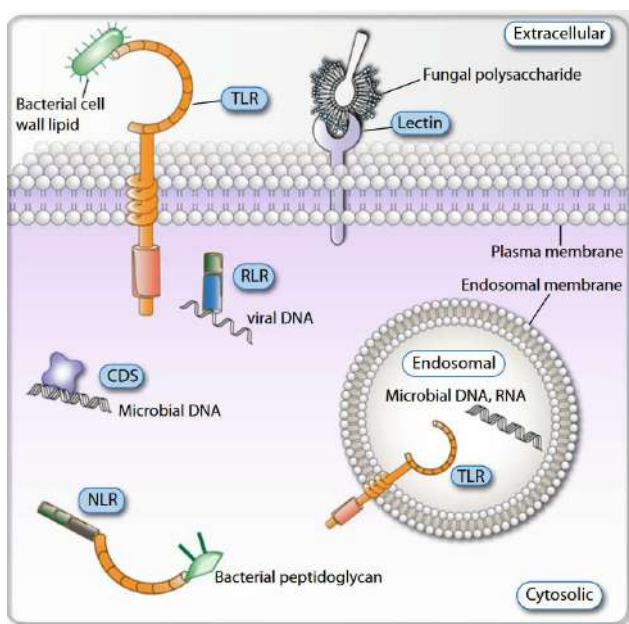
7.2.3 Respon Imun terhadap Bakteri

Sistem imun akan mengenali bakteri pertama kali oleh sistem imun alamiah. Sistem imun alamiah memiliki sel imun yang berperan dalam memusnahkan bakteri. Sel imun memiliki reseptor, dinamakan *pattern recognition receptors* atau PRR yang dapat mengenali salah satu pola antigen yang dinamakan *pathogen-associated molecular patterns* atau PAMP. Beberapa jenis PRR utama diantaranya adalah *Toll-like receptors* (TLRs), *nucleotide-binding oligomerization domain and leucine-rich repeat containing gene family* (NLRs), *retinoic acid-inducible gene* (RIG)-*I-like receptors* (RLRs), *C-type lectin receptors* (CLRs), and DNA-sensing molecules. Pada saat bakteri masuk ke dalam tubuh, maka dinding sel bakteri sebagai PAMP akan dikenali oleh PRR yang terkait pada dan di dalam membran sel imun, salah satunya adalah TLR (van der Poll, Shankar-Hari and Wiersinga, 2021). TLR adalah keluarga protein pertama yang memenuhi prediksi Janeway tentang fitur PRR. Setelah terjadi pengenalan, maka dapat menginduksi aktivitas yang merangsang kekebalan dan pertahanan inang (Fitzgerald and Kagan, 2020). TLR berada pada ekstraseluler dan intraseluler, sehingga dapat menjangkau antigen yang berada diluar sel maupun di dalam sel (Gambar 7.4) (Carlberg and Velleuer, 2022).

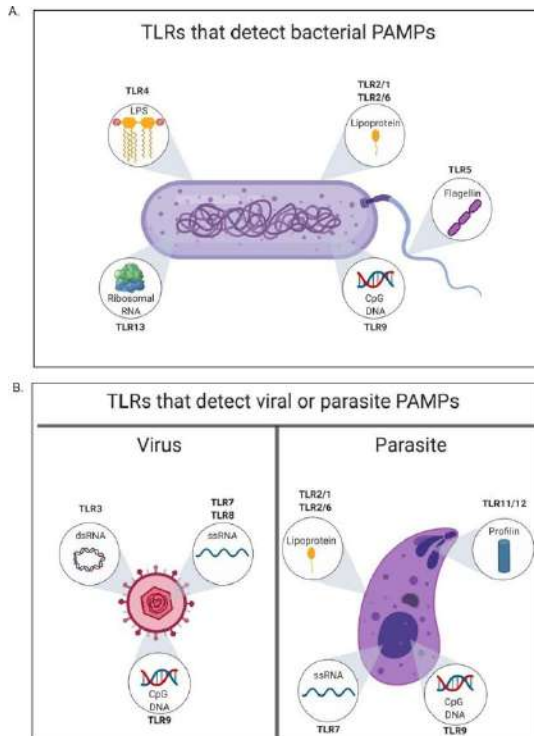
Bakteri memiliki bagian yang dapat dikenali oleh sel imun, bagian tersebut dinamakan *pathogen-associated molecular patterns* atau PAMP, diantaranya lipopolisakarida dan peptidoglikan. Peptidoglikan adalah komponen utama dinding sel bakteri gram positif, sedangkan lipopolisakarida adalah komponen utama dinding sel gram negatif. Peptidoglikan akan dikenali oleh TLR1, dan TLR2 sedangkan lipopolisakarida akan dikenali oleh TLR4. Lipoprotein akan dikenali oleh TLR1, TLR2, dan TLR 6 (Gonzales and Canton, 2022). CpGDNA akan dikenali oleh TLR9, ribosom RNA akan dikenali oleh TLR13, Lipoprotein akan dikenali oleh TLR1, TLR2, dan TLR 6, sedangkan flagelin

akan dikenali oleh TLR5 (gambar 7.5) (Fitzgerald and Kagan, 2020).

Mikroorganisme lain seperti virus dan parasit memiliki perbedaan bagian yang dikenali oleh reseptor sel imun. Pada virus terdapat dsRNA yang akan dikenali oleh TLR3. ssRNA dikenali oleh TLR7 dan TLR8. CpGDNA dikenali oleh TLR9. Sedangkan, pada parasit terdapat lipoprotein yang akan dikenali oleh TLR1, TLR2, TLR6. Propilin akan dikenali oleh TLR, ssRNA akan dikenali oleh TLR7 dan TLR 8 dan CpGDNA akan dikenali oleh TLR9 (gambar 7.5) (Fitzgerald and Kagan, 2020).



Gambar 7. 4. TLR dan Lokasi TLR di dalam dan luar
(Sumber: Carlberg and Velleuer, 2022).

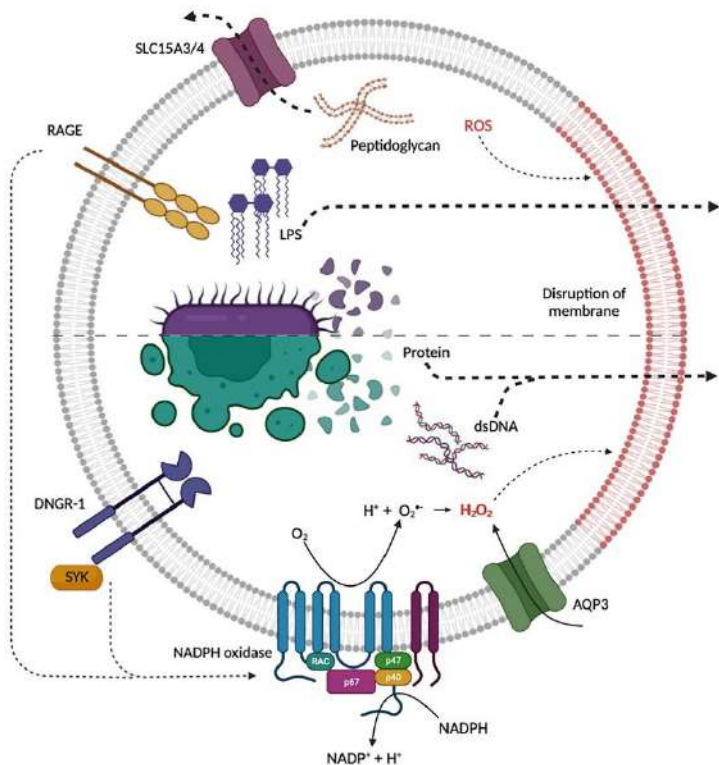


Gambar 7. 5. TRL yang dapat mengenali PAMP Bakteri (A), TLR yang mengenali Virus dan Parasit (B)

(Sumber: Fitzgerald and Kagan, 2020)

Beberapa sinyal dari bakteri seperti peptidoglikan, lipopolisakarida, protein bakteri, flagel, dsDNA (dari bakteri yang mati/sel rusak) (Gambar 7.6) (Gonzales and Canton, 2022) dari bakteri yang terinternalisasi oleh sel fagosit akan dilepaskan sehingga dapat mengakses sitosol melalui transporter atau menyebabkan destabilisasi membran sel fagosit. Baik RAGE dan DNGR-1 menginduksi produksi NADPH oksidase ROS, memicu kerusakan membran yang dimediasi ROS dan pelepasan protein, dsDNA dan LPS. NADPH oksidase dan AQP3 dapat direkrut ke organel endositik untuk menginduksi kerusakan membran yang bergantung pada ROS dan peroksidasi lipid. Sinyal yang dikeluarkan akan menginduksi adanya respon imun yang

mengarah pada timbulnya inflamasi (Gonzales and Canton, 2022).

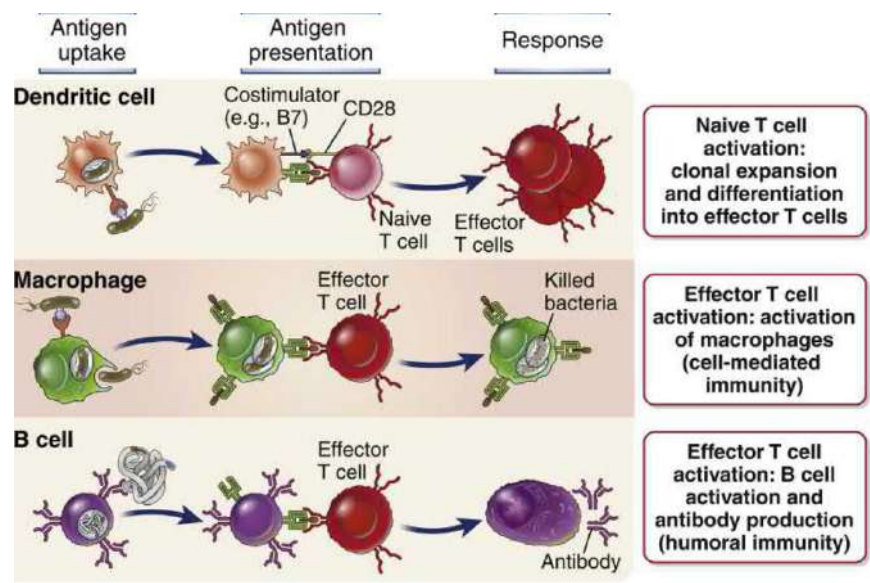


Gambar 7. 6. Mekanisme pengeluaran sinyal dari bakteri yang telah difagosit
(Sumber : Gonzales and Canton, 2022)

Pada Gambar 7.7 merupakan respon beberapa sel, seperti sel dendritik, makrofag dan limfosit B terhadap bakteri patogen. Antigen akan direspon oleh dendritik sel, untuk kemudian dipresentasikan kepada sel limfosit T naif sehingga akan mengakibatkan sel limfosit T mengalami proliferasi dan diferensiasi menjadi sel limfosit T efektor. Sel makrofag akan memfagosit sel bakteri dan mempresentasikannya kepada sel limfosit T efektor. Sel makrofag akan teraktivasi dan dapat

190

membunuh bakteri dengan optimal. Sel limfosit B akan mengenali bakteri (peptida bakteri) kemudian dipresentasikan kepada sel limfosit T efektor. Sel limfosit B akan teraktivasi dan mengalami diferensiasi menjadi sel plasma yang dapat menghasilkan antibodi (Abbas, Lichtman and Pillai, 2022).

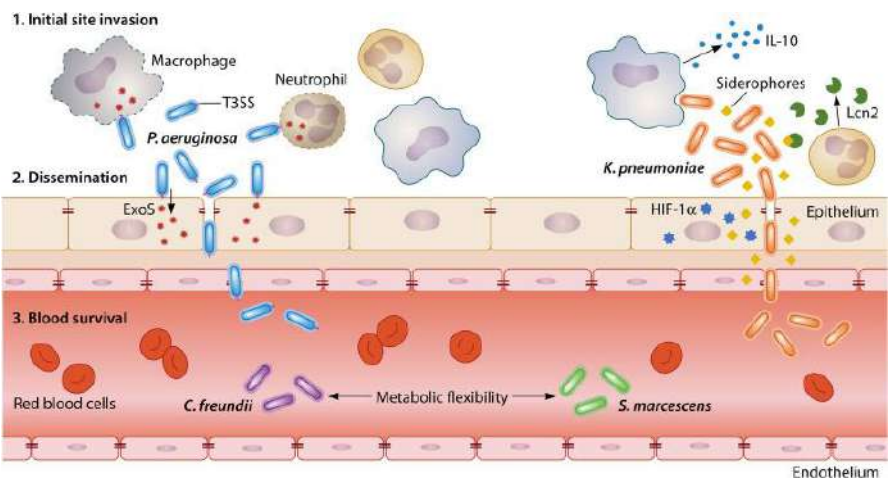


Gambar 7. 7. Respon Sel terhadap Bakteri
(Sumber : Abbas, Lichtman and Pillai, 2022)

7.2.4 Penghindaran Bakteri dari Sistem Imun

Bakteri dapat menghindari dari sistem imun, salah satunya dengan cara memproduksi kapsul dan juga eksotoksin, sehingga bakteri dapat menembus lapisan pertahanan pertama dan dapat bertahan di dalam darah, seperti yang terdapat pada Gambar 7.8. Pada tahap invasi, bakteri pertama kali berada pada tempat infeksi dan menghindari respon imun melalui mekanisme pembentukan kapsul dan menghasilkan eksotoksin (misal *P. aeruginosa*). Selanjutnya, bakteri menembus lapisan epitel host untuk menembus ke peredaran darah. Proses ini membutuhkan adhesin dan eksotoksin (misal *P. aeruginosa*) atau mengaktifkan HIF-1 (misal pada *K. Pneumonia*). Tahapan selanjutnya adalah

bertahan hidup dalam peredaran darah melalui fleksibilitas metabolisme (*C. Freundii* dan *S. Marcescens*) dan menghindari dari pemusnahan oleh sistem imun dengan memproduksi kapsul (Sumber : Holmes, Anderson and Mobley, 2021).



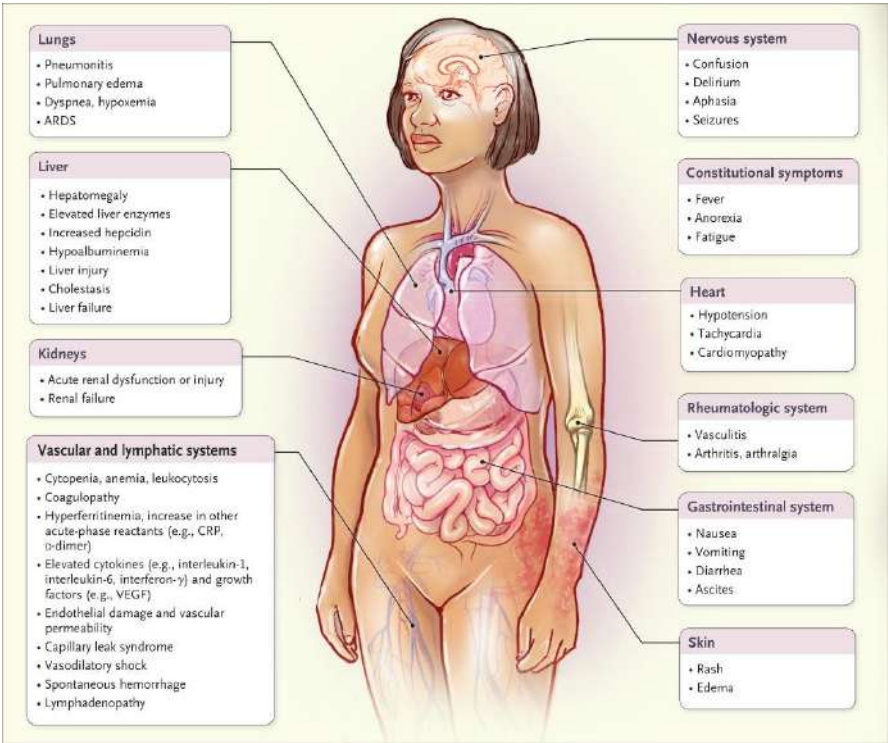
Gambar 7. 8. Tahapan Infeksi Bakteri dalam Tubuh menuju Peredaran Darah
(Sumber : Holmes, Anderson and Mobley, 2021)

7.2.5 Sitokin Storm (badai sitokin)

Sitokin adalah protein pensinyalan, banyak di antaranya terlibat dalam signaling antara sel-sel sistem kekebalan tubuh. Grup tersebut mencakup Interleukin (IL-1 hingga IL-40), interferon (IFN), *Tumor Necrosis Factor* (TNF), *Tumor Growth Factor* (TGF), dan *Colony Stimulating Factor* (CSF). Istilah limfokin pada awalnya digunakan bagi sitokin-sitokin yang diproduksi oleh limfosit (Male, 2021).

Infeksi oleh bakteri dapat menimbulkan berbagai macam gambaran klinis terutama jika terjadi badai sitokin. Badai sitokin adalah kondisi terjadinya limpahan jumlah sitokin yang dihasilkan akibat adanya infeksi (salah satunya infeksi bakteri).

Beberapa jenis sitokin dan bahan lain yang dapat menimbulkan badai sitokin dapat dilihat pada Gambar 7.10 Akibat yang ditimbulkan dapat dilihat berbagai organ dapat terkena dampaknya seperti pada pada gambar 7.9 dan bahkan dapat menimbulkan kematian sesuai dengan Gambar 7.11 (Fajgenbaum and June, 2020).



Gambar 7. 9. Gambaran Klinis Badai Sitokin
(Sumber : Fajgenbaum and June, 2020)

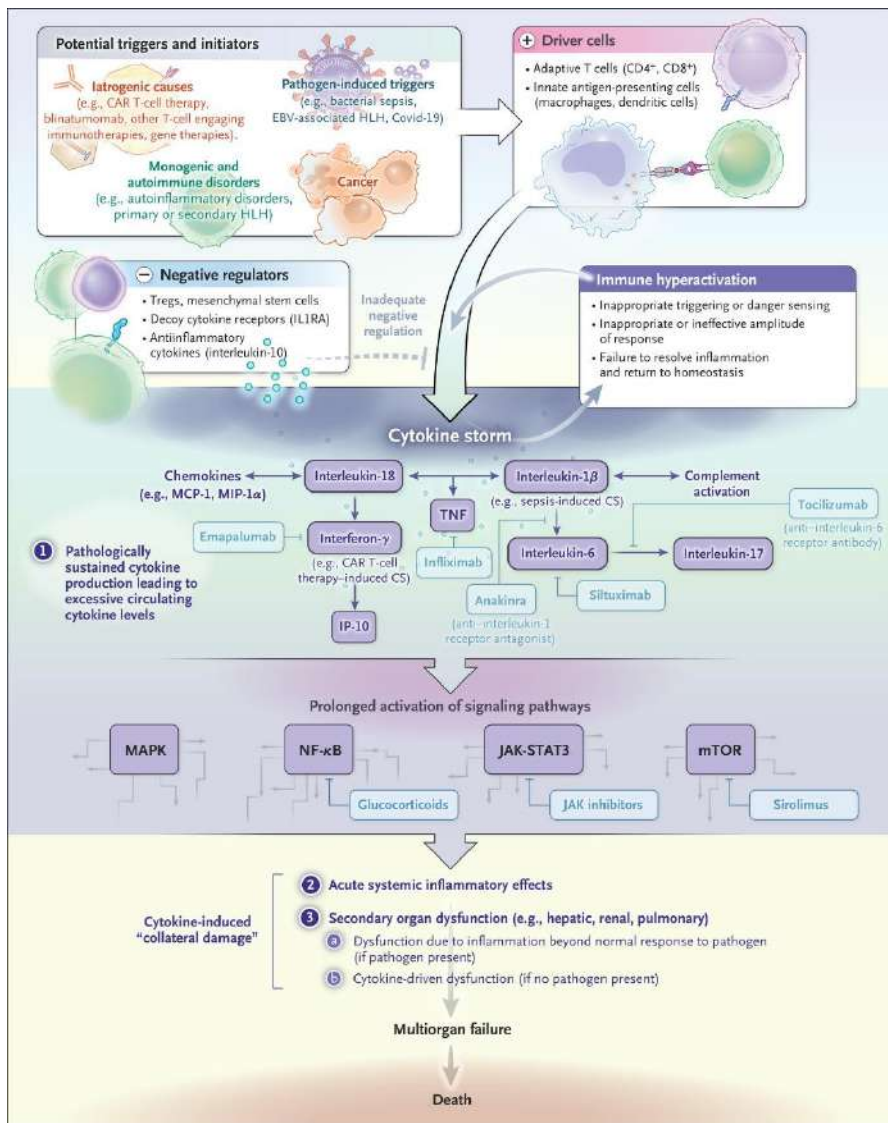
Table 1. Soluble Mediators in Cytokine Storm.^a

Mediator	Main Cell Source	Type and Function
Cytokines and growth factors		
Interleukin-1	Macrophages, epithelial cells, pyroptotic cells	Proinflammatory alarmin cytokine; pyrogenic function, macrophage and Th17 cell activation
Interleukin-2	T cells	Effector T-cell and regulatory T-cell growth factor
Interleukin-6	Macrophages, T cells, endothelial cells	Proinflammatory cytokine; pyrogenic function, increased antibody production, induction of acute-phase reactants
Interleukin-9	Th9 cells	Protection from helminth infections, activation of mast cells, association with type I interferon in Covid-19 ²⁶
Interleukin-10	Regulatory T cells, Th9 cells	Antiinflammatory cytokine; inhibition of Th1 cells and cytokine release
Interleukin-12	Dendritic cells, macrophages	Activation of the Th1 pathway; induction of interferon- γ from Th1 cells, CTLs, and NK cells; acting in synergy with interleukin-18
Interleukin-17	Th17 cells, NK cells, group 3 innate lymphoid cells	Promoting neutrophilic inflammation, protection from bacterial and fungal infections
Interleukin-18	Monocytes, macrophages, dendritic cells	Proinflammatory alarmin cytokine; activation of Th1 pathway, acting in synergy with interleukin-12
Interleukin-33	Macrophages, dendritic cells, mast cells, epithelial cells	Proinflammatory alarmin cytokine; amplification of Th1 and Th2 cells, activation of NK cells, CTLs, and mast cells
Interferon- γ	Th1 cells, CTLs, group 1 innate lymphoid cells, and NK cells	Proinflammatory cytokine; activation of macrophages
Tumor necrosis factor	Macrophages, T cells, NK cells, mast cells	Increasing vascular permeability; pyrogenic function
GM-CSF	Th17 cells	Proinflammatory cytokine
VEGF	Macrophages	Angiogenesis
Chemokines		
Interleukin-8 (CXCL8)	Macrophages, epithelial cells	Recruitment of neutrophils
MIG (CXCL9)	Monocytes, endothelial cells, keratinocytes	Interferon-inducible chemokine; recruitment of Th1 cells, NK cells, plasmacytoid dendritic cells
IP-10 (CXCL10)	Monocytes, endothelial cells, keratinocytes	Interferon-inducible chemokine; recruitment of macrophages, Th1 cells, NK cells
MCP-1 (CCL2)	Macrophages, dendritic cells, cardiac myocytes	Recruitment of Th2 cells, monocytes, dendritic cells, basophils
MIP-1 α (CCL3)	Monocytes, neutrophils, dendritic cells, NK cells, mast cells	Recruitment of macrophages, Th1 cells, NK cells, eosinophils, dendritic cells; pyrogenic function
MIP-1 β (CCL4)	Macrophages, neutrophils, endothelium	Recruitment of macrophages, Th1 cells, NK cells, dendritic cells
BLC (CXCL13)	B cells, follicular dendritic cells	Recruitment of B cells, CD4 T cells, dendritic cells $\dagger$
Plasma proteins		
CRP	Hepatocytes	Monomeric CRP increases interleukin-8 and MCP-1 secretion; interleukin-6 increases CRP expression
Complement	Hepatocytes, other cells	Complement activation contributes to tissue damage in cytokine storm; complement inhibition can reduce immunopathologic effects of cytokine storm
Ferritin	Ubiquitous	Primary site of iron storage in cells

^a BLC denotes B-lymphocyte chemoattractant; Covid-19 coronavirus disease 2019; CRP C-reactive protein; CTLs cytotoxic T lymphocytes; CXCL C-X-C motif chemokine ligand; GM-CSF granulocyte-macrophage colony-stimulating factor; IP-10 interferon-inducible protein 10; MCP-1 monocyte chemoattractant protein 1; MIG monokine induced by interferon- γ ; MIP-1 α and MIP-1 β macrophage inflammatory protein 1 α and 1 β , respectively; NK natural killer; Th1, Th2, Th9, and Th17 cells types 1, 2, 9, and 17 helper T cells, respectively; and VEGF vascular endothelial growth factor.

$\dagger$ In idiopathic multicentric Castleman's disease, the levels of CXCL13 are the most elevated of all the cytokines or chemokines.

Gambar 7. 10. Jenis Sitokin, Sel Penghasil Sitokin dan Fungsinya (Fajgenbaum and June, 2020)



Gambar 7. 11. Mekanisme Sitokirn Storm
(Fajgenbaum and June, 2020)

7.3 Penutup

Bakteri dapat menimbulkan respon imun ketika mulai masuk ke dalam tubuh baik melalui respon imun alamiah maupun respon imun didapat. Respon yang terjadi dimulai ketika ada proses pengenalan mikroba oleh sistem imun. Respon yang terjadi bertujuan untuk mengeliminasi mikroba patogen, agar tubuh terhindar dari segala resiko kemungkinan yang membahayakan tubuh berupa kerusakan organ bahkan kematian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A.K., Lichtman, A.H. and Pillai, S. (2022) *Cellular and Molecular Immunology*. 10th edn. Saunders/Elsevier.
- Adlung, L. (2022) *Cell and Molecular Biology for Non-Biologists*, *Cell and Molecular Biology for Non-Biologists*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65357-9>.
- Carlberg, C. and Velleuer, E. (2022) *Molecular Immunology: How Science Works*, *Molecular Immunology: How Science Works*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-04025-2>.
- Fajgenbaum, D.C. and June, C.H. (2020) 'Cytokine Storm', *New England Journal of Medicine*, 383(23), pp. 2255–2273. Available at: <https://doi.org/10.1056/nejmra2026131>.
- Fitzgerald, K.A. and Kagan, J.C. (2020) 'Toll-like Receptors and the Control of Immunity', *Cell*, 180(6), pp. 1044–1066. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.02.041>.
- Gonzales, G.A. and Canton, J. (2022) 'The Delivery of Extracellular "Danger" Signals to Cytosolic Sensors in Phagocytes', *Frontiers in Immunology*, 13(July), pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.944142>.
- Holmes, C.L., Anderson, M.T. and Mobley, H.L.T. (2021) 'Pathogenesis of Gram-Negative Bacteremia', *Clinical Microbiology Reviews*, 34(2). Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1128/CMR.00234-20>.
- Male, D. (2021) *Immunology An Illustrated Outline*. Sixth. Boca Raton and London New York: Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Marshall, J.S. *et al.* (2018) 'An introduction to immunology and immunopathology', *Allergy, Asthma and Clinical Immunology*, 14(2), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1186/S13223-018-0278-1/TABLES/4>.

- van der Poll, T., Shankar-Hari, M. and Wiersinga, W.J. (2021) 'The immunology of sepsis', *Immunity*, 54(11), pp. 2450–2464. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2021.10.012>.
- Wolf, A.J. and Underhill, D.M. (2018) 'Peptidoglycan recognition by the innate immune system', *Nature Reviews Immunology*, 18(4), pp. 243–254. Available at: <https://doi.org/10.1038/nri.2017.136>.

BAB 8

INFEKSI NOSOKOMIAL

Oleh Marsino O. R. O Rondo

8.1 Pendahuluan

Infeksi nosokomial, yang juga disebut sebagai infeksi terkait perawatan kesehatan / *healthcare-associated Infection* (HAI), adalah infeksi yang diperoleh selama proses perawatan kesehatan yang sebelumnya tidak ada selama waktu masuk (Sikora and Zahra, 2023). Hal ini merupakan masalah signifikan yang membutuhkan perhatian serius di seluruh dunia. Tingkat infeksi nosokomial secara universal adalah 0,14 persen, dan tingkat infeksi nosokomial ini meningkat sebesar 0,06 persen per tahun (Raoofi *et al.*, 2023). Namun, literatur lainnya menyebutkan bahwa sekitar 8,7% pasien di rumah sakit berisiko terpapar infeksi nosokomial yang mempersulit kondisi kompleks seperti kanker, pembedahan, atau kasus transplantasi organ lainnya, sehingga meningkatkan angka kematian. Dalam studi epidemiologis yang dilakukan oleh WHO di 14 negara di seluruh dunia, dilaporkan kasus infeksi nosokomial sebesar 8,7%. Data ini berkisar dari 5,0% kasus di wilayah Amerika Utara hingga 40% di Asia, Amerika Latin, dan wilayah Sahara Afrika (Zhang, Wu and Li, 2021).

Prevalensi HAI umumnya melebihi 25% di ICU di seluruh dunia dan HAI yang didapat di ICU terhitung lebih dari 20% dari semua HAI pada umumnya (Landelle and Pittet, 2016). Infeksi yang didapat di rumah sakit disebabkan oleh patogen virus, bakteri, dan jamur. Jenis yang paling umum adalah infeksi aliran darah, pneumonia (misalnya, *ventilator-associated pneumonia*),

infeksi saluran kemih, dan infeksi daerah operasi (Custodio, 2021).

8.2 Faktor Risiko dan Etiologi

Risiko infeksi yang didapat di rumah sakit tergantung pada praktik pengendalian infeksi di fasilitas kesehatan, status imunitas pasien, dan prevalensi berbagai patogen dalam masyarakat. Faktor risiko untuk HAI termasuk immunosupresi, usia yang lebih tua, lama tinggal di rumah sakit, beberapa komorbiditas yang mendasari, sering mengunjungi fasilitas kesehatan, dukungan ventilasi mekanik, prosedur invasif baru-baru ini, perangkat *indwelling*, dan tinggal di unit perawatan intensif / intensive care unit (ICU). Penerimaan antibiotik intravena dalam 90 hari terakhir merupakan salah satu faktor risiko utama untuk mengembangkan resistensi antimikroba terhadap beberapa obat. Sementara rawat inap memainkan peran utama dalam manajemen penyakit akut, dan hal tersebut meningkatkan risiko pasien yang rentan untuk beberapa patogen nosokomial dan sering mengalami resisten antimikroba. Patogen ini dapat diperoleh dari pasien lain, staf rumah sakit, atau fasilitas rumah sakit. Risiko lebih tinggi di antara pasien di ICU. Dalam studi prevalensi yang mencakup 231.459 pasien di 947 rumah sakit menyimpulkan bahwa sekitar 19,5% pasien di ICU mengalami setidaknya satu HAI (Monegro, Muppidi and Regunath, 2021).

Mayoritas infeksi nosokomial merupakan infeksi bakteri, jamur, dan virus. Namun, parasit juga memainkan peran penting dalam infeksi nosokomial, terutama di lingkungan perawatan kesehatan yang semakin kompleks dengan proporsi pasien *immunocompromised* yang terus meningkat. Peran beberapa parasit dalam infeksi nosokomial baru diketahui belakangan ini, misalnya, peran amoeba sebagai pembawa atau karier

Legionellae dan bakteri lain dalam sistem air dan pendingin udara rumah sakit. (Fürnkranz and Walochnik, 2021).

Organisme umum penyebab CLA-BSI adalah *Candida spp* (pada ICU dewasa), *Enterobacteriaceae* (bangsal dewasa, ruang ICU dan bangsal pediatrik, dan bangsal onkologi), dan *Staphylococcus aureus*. Patogen umum yang diketahui menyebabkan CAUTI adalah *Enterococcus*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas*, *Proteus*, *Klebsiella*, dan *Candida*. Menurut *National Healthcare Safety Network*, organisme penyebab umum untuk IDO termasuk (dalam urutan) *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus* koagulase-negatif, *Enterococcus*, *E. Coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter*, *Klebsiella pneumoniae*. Patogen yang paling umum untuk HAP dan VAP adalah *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*, sedangkan *E. Coli* dan *Klebsiella pneumoniae* dapat ditemukan dalam proporsi yang lebih tinggi di antara populasi anak-anak (Monegro, Muppidi and Regunath, 2021).

NHSN *Annual Update report* 2008 berisi data tentang patogen yang terkait dengan HAI dan pola resistensi antimikroba terkait yang dilaporkan antara Januari 2006 dan Oktober 2007. Secara keseluruhan, 463 rumah sakit melaporkan satu atau lebih HAI, menghasilkan total 28.502 HAI termasuk 10.064 (35,3%) kasus CLA-BSI. Menurut data NHSN, bakteri kokus gram positif tetap menjadi penyebab paling umum CLA-BSI. Stafilokokus koagulase-negatif adalah mikroorganisme penyebab paling sering pada pasien dewasa dan anak-anak, menyebabkan 34,1% kasus CLA-BSI di rumah sakit. Patogen lain yang menyebabkan CLA-BSI termasuk *Enterococcus sp.* (16%), *Candida sp.* (11,8%), dan *S. aureus* (9,9%). Basil gram negatif seperti *Klebsiella sp.*, *Escherichia coli*, *Enterobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, dan *Acinetobacter sp.* terhitung sebesar 17,7% dari CLA-BSI menurut data NHSN. Mikroorganisme resisten antimikroba biasanya terlibat dalam infeksi CLA-BSI. Data dari NHSN menunjukkan bahwa 56,8% isolat *S. aureus* resisten terhadap oksasilin /

Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus (MRSA), dan 36,4% *Enterococci* resisten vankomisin / *Vancomycin-resistant Enterococci* (VRE). Resistensi di antara mikroorganisme gram negatif juga muncul, dengan 27,1% isolat *Klebsiella pneumoniae* menunjukkan resistensi terhadap sefalosporin generasi ketiga, dan 23% isolat *Pseudomonas aeruginosa* menunjukkan resistensi terhadap karbapenem seperti imipenem dan meropenem (Mayhall, 2012).

Di negara berkembang, obat-obatan seperti antibiotik mudah didapatkan di apotek dan penggunaan berbagai macam antibiotik secara berlebihan di lingkungan rumah sakit telah menyebabkan munculnya mikroorganisme MDR yang menyebabkan infeksi nosokomial yang fatal dan sulit diobati. Bakteri MDR terpenting penyebab infeksi nosokomial antara lain *E. faecium*, *S. aureus*, *K. pneumoniae*, *A. baumannii*, dan *P. aeruginosa* (Darvishi *et al.*, 2020). Referensi lainnya menyebutkan bahwa isolat bakteri *multidrug-resistant* yang paling umum adalah *P. aeruginosa* (30,4%) dan *S. aureus* (21,7%) (Tolera *et al.*, 2018).

Selain itu, pada tahun 2017, WHO menerbitkan daftar spesies bakteri terpenting dan antibiotik yang resisten terhadap bakteri ini (Tabel 8.1). Kelompok patogen ini bertanggung jawab atas sebagian besar infeksi nosokomial MDR (Darvishi *et al.*, 2020).

Tabel 8. 1. Bakteri yang paling sering menyebabkan infeksi nosokomial MDR dan antibiotik yang resisten terhadap bakteri

Antibiotik	Bakteri
Karbapenem	<i>A. baumannii</i>
Karbapenem	<i>P.aeruginosa</i>
Karbapenem	Spesies <i>Enterobacter</i>

Antibiotik	Bakteri
Vankomisin	<i>E. faecium</i>
Methicillin-Vancomycin	<i>S.aureus</i>
Klaritromisin	<i>H.pylori</i>
Fluoroquinolon	Spesies <i>Campylobacter</i>
Fluoroquinolon	<i>Salmonella spp.</i>
-Fluoroquinolones Cephalosporins	<i>Neisseria gonorrhoeae</i>
Penisilin	<i>Streptokokus pneumonia</i>
Ampisilin	<i>Haemofilus influenza</i>
Fluoroquinolon	<i>Shigella Spp.</i>

Sumber: (Darvishi *et al.*, 2020)

8.3 Patofisiologi dan Klasifikasi

Patogen yang terkait dengan infeksi nosokomial dapat memiliki rute penularan atau transmisi yang berbeda. Rute transmisi yang paling umum adalah melalui kontak, dimana organisme ditularkan melalui kontak langsung atau tidak langsung. Mikroorganisme umum yang dapat ditularkan melalui kontak adalah bakteri yang resistan terhadap berbagai obat, *C. difficile*, dan rotavirus. Penularan droplet dapat terjadi ketika mikroorganisme ditransmisikan dari saluran pernapasan melalui droplet besar (lebih besar dari 5 mikron) dan menempuh jarak kurang dari 3 kaki. Contoh patogen infeksius yang ditularkan melalui rute droplet antara lain virus influenza, *Bordetella pertussis*, dan *Neisseria meningitidis*. Penularan melalui udara melibatkan transmisi organisme dari saluran pernapasan melalui droplet kecil (kurang dari 5 mikron) yang menempuh jarak jauh. Virus cacar air, tuberkulosis, campak, dan virus novel SARS-COV-

2 dapat ditularkan melalui rute *airborne* (Sikora and Zahra, 2023).

Jenis infeksi yang paling sering termasuk infeksi aliran darah terkait jalur sentral, infeksi saluran kemih terkait kateter, infeksi tempat operasi, dan pneumonia terkait ventilator (Khan, Baig and Mehboob, 2017).

8.3.1 Pneumonia Terkait Ventilator

Berdasarkan pedoman dari *Infectious Disease Society of America* (IDSA) dan *American Thoracic Society* (ATS), definisi pneumonia telah diubah untuk lebih mengidentifikasi pasien yang berisiko terhadap patogen yang resistan terhadap berbagai obat / *multidrug-resistant* (MDR). Definisi ini dibuat bertujuan untuk menghindari penggunaan antibiotik yang berlebihan. *Healthcare-acquired Pneumonia* (HCAP), yang sebelumnya banyak digunakan, saat ini menjadi tidak terpakai. Istilah *Hospital-acquired Pneumonia* (HAP) telah menggantikan HCAP. Sesuai pedoman IDSA, *Hospital-acquired Pneumonia* didefinisikan sebagai "pneumonia yang terjadi 48 jam atau lebih setelah masuk ke rumah sakit dan tidak tampak berinkubasi pada saat masuk rumah sakit." Menurut IDSA, *Ventilator-associated pneumonia* atau VAP didefinisikan sebagai "pneumonia yang berkembang lebih dari 48 hingga 72 jam setelah intubasi endotrakeal." Baik HAP dan VAP berhubungan dengan luaran klinis yang lebih buruk dan morbiditas dan mortalitas yang signifikan di seluruh dunia. Untuk pasien dengan HAP/VAP, pedoman IDSA terbaru merekomendasikan pengambilan sampel noninvasif dengan aspirasi trakea karena telah terbukti memiliki hasil yang tidak lebih rendah bila dibandingkan dengan pengambilan sampel invasif seperti *tracheal lavage* kuantitatif atau bronkoskopi. (Monegro, Muppidi and Regunath, 2021).

8.3.2 Infeksi Aliran Darah

Jenis HAI yang paling umum berikutnya adalah infeksi aliran darah, khususnya terkait jalur sentral / *central line-associated bloodstream infections* (CLA-BSI). Jalur sentral (juga dikenal sebagai kateter vena sentral) adalah kateter (*tube*) yang sering ditempatkan dokter di pembuluh darah besar di leher, dada, atau selangkangan untuk memberikan obat atau cairan atau untuk mengumpulkan darah untuk pemeriksaan medis. Kateter intravena (juga dikenal sebagai infus) sering digunakan untuk memberikan obat atau cairan ke dalam pembuluh darah di dekat permukaan kulit (biasanya di lengan atau tangan), untuk waktu yang cukup singkat. Jalur sentral berbeda dari infus karena jalur sentral mengakses vena utama yang dekat dengan jantung dan dapat tetap di tempatnya selama berminggu-minggu atau berbulan-bulan dan jauh lebih mungkin menyebabkan infeksi serius. Jalur sentral biasanya digunakan di unit perawatan intensif (CDC, 2019).

8.3.3 Infeksi Saluran Kemih

Infeksi saluran kemih terkait kateter / *catheter-associated urinary tract infection* (CAUTI) adalah infeksi saluran kemih yang terjadi akibat pemasangan kateter urin yang menetap untuk berbagai indikasi medis. CAUTI dapat diklasifikasikan sebagai ekstraluminal atau intraluminal. Infeksi ekstraluminal terjadi ketika bakteri melewati sepanjang permukaan ekstraluminal kateter dan masuk dari meatus uretra ke kandung kemih. Infeksi intraluminal timbul bila terdapat stasis urin, biasanya akibat drainase yang tersumbat atau infeksi ascendan dari sisi intraluminal kateter yang terkontaminasi. Bakteri dan patogen jamur biasanya menggunakan pembentukan biofilm untuk memfasilitasi pertumbuhan dan menyebar bersama perangkat yang ada di dalamnya (Sikora and Zahra, 2023).

8.3.4 Infeksi Darah Operasi

Infeksi daerah operasi (IDO) adalah infeksi pada insisi atau organ atau ruang yang terjadi setelah operasi. Pasien bedah awalnya terlihat dengan komorbiditas yang lebih kompleks dan munculnya patogen resisten antimikroba meningkatkan biaya dan tantangan untuk mengobati IDO. Pencegahan IDO semakin penting karena jumlah prosedur bedah yang dilakukan di Amerika Serikat terus meningkat. Pelaporan publik tentang proses, hasil, dan langkah-langkah peningkatan kualitas lainnya saat ini diperlukan. Diperkirakan bahwa sekitar setengah dari IDO dapat dicegah dengan penerapan strategi berbasis bukti (Berríos-Torres *et al.*, 2017).

8.4 Manifestasi Klinis

Manifestasi klinis penyakit infeksi nosokomial bervariasi tergantung pada jenis infeksi, patogen yang terlibat, dan tingkat keparahan penyakit. CLA-BSI bermanifestasi klinis dengan demam akibat bakteremia pada pasien yang terpasang jalur sentral pada saat infeksi atau dalam waktu 48 jam setelah pelepasan jalur sentral. Purulensi atau eritema pada tempat insersi dan disfungsi kateter dapat terjadi, namun tidak adanya hal tersebut seharusnya tidak mengurangi kecurigaan terhadap CLA-BSI. Kadang-kadang infeksi dengan komplikasi akibat infeksi aliran darah dapat merupakan manifestasi awal, seperti endokarditis, tromboflebitis supuratif, artritis septik, osteomielitis, atau abses (Sikora and Zahra, 2023).

Tanda dan gejala CAUTI mirip dengan infeksi saluran kemih lainnya, tetapi terjadi dengan pemasangan kateter uretra atau suprapubik, kateterisasi intermiten, atau dalam waktu 48 jam setelah pelepasan kateter. Tanda dan gejala umum adalah demam, nyeri suprapubik atau sudut kostovertebral, hematuria

akut, obstruksi kateter, disuria, dan urgensi (Sikora and Zahra, 2023).

Infeksi kulit dan jaringan lunak / *skin and soft tissue infection* (SSI) yang meliputi IDO dengan tanda dan gejala klinis yang berbeda berdasarkan lokasi, jenis infeksi, dan patogen yang terlibat. SSI biasanya terjadi dalam 30 hari pertama pasca operasi atau 90 hari setelah pemasangan perangkat prostetik. Tanda-tanda inflamasi, seperti eritema, hangat, dan nyeri, dan dehisensi luka, terlihat pada SSI. Drainase purulen dapat muncul tergantung pada karakteristik organisme yang terkena dan biasanya terjadi pada infeksi insisional superfisial. *Drain* pasca operasi juga dapat mengalirkan material purulen. Infeksi pada jaringan profundus dan spesifik organ biasanya lebih tersembunyi dan muncul dengan tanda-tanda yang lebih sistemik, seperti demam, kekakuan, nyeri yang lebih hebat dan luas, serta leukositosis (Sikora and Zahra, 2023).

Pneumonia dapat bermanifestasi dengan demam akut, batuk, produksi sputum purulen, dan penurunan oksigenasi. Untuk memenuhi kriteria HAP atau VAP, gejala harus muncul masing-masing setelah 48 jam rawat inap atau ventilasi. Pasien yang dibius dengan ventilasi mekanis dapat mengalami demam, peningkatan kebutuhan oksigen, dan bahan purulen dari penyedotan endotrakeal. Temuan pemeriksaan fisik dapat mengungkapkan suara napas kasar dan ronki pada auskultasi, dalam pengaturan efusi parapneumonik, mungkin ada penurunan suara napas (Sikora and Zahra, 2023).

8.5 Diagnosis

Untuk mendeteksi, mengidentifikasi dan mengobati infeksi bakteri dan virus, mikroorganisme yang menginfeksi perlu ditumbuhkan di bawah kondisi laboratorium yang menyerupai kondisi di mana mereka tumbuh secara optimal di dalam *host*

manusia. Berfokus terutama pada bakteri, terdapat beberapa pemeriksaan yang dilakukan di laboratorium mikrobiologi termasuk pewarnaan gram pada infeksi bakteri dan Ziehl-Nielsen pada infeksi mikobakterium serta penumbuhan bakteri pada media kultur. Selain itu, beberapa pemeriksaan laboratorium lain juga umum digunakan. Pemeriksaan ini dapat bervariasi sesuai dengan fasilitas yang tersedia di dalam laboratorium, dan beberapa spesimen mungkin harus dikirim ke laboratorium lain. Ada banyak pemeriksaan lain yang dilakukan di laboratorium untuk membantu deteksi dan identifikasi bakteri dan virus. Beberapa teknik ini, yang dapat diterapkan pada keduanya, dijelaskan secara singkat sebagai berikut (Weston, 2013):

- *Polymerase chain reaction* (PCR). PCR adalah teknik diagnostik yang relatif baru yang telah merevolusi deteksi patogen dengan memperkuat fragmen DNA jutaan kali sedemikian rupa sehingga deteksi spesifik patogen dimungkinkan. Ketika DNA bereplikasi, ia melakukan 'un-zip' menjadi dua bagian, dengan masing-masing setengah menjadi *template* untuk yang lain. Fragmen DNA dapat dibuat untuk 'un-zip' jika dipanaskan, yang memisahkan untaian. DNA didinginkan dan kemudian dipanaskan lagi, dan siklus ini diulang sekitar 10 kali, memperkuat DNA secara logaritmik. Hal ini digunakan dalam mendeteksi penyakit seperti HIV dan *Mycobacterium tuberculosis*, dan nilai khusus dalam mendeteksi gen resistensi antimikroba.
- Aglutinasi lateks. Antigen atau antibodi dapat diterapkan pada partikel lateks untuk mendeteksi reaksi antibodi atau antigen. Jika antigen ditambahkan ke partikel lateks berlapis antibodi, aglutinasi ('penggumpalan' partikel) akan terjadi dan antibodi dapat dideteksi dalam serum pasien.
- Imunofluoresensi. Antibodi spesifik untuk antigen yang dideteksi, yang mungkin berupa bakteri atau virus, diberi label atau 'ditandai' dengan pewarna fluoresen. Jika antibodi dan antigen bergabung, lingkaran fluoresen hijau terang akan terlihat di sekitar antigen dalam kasus bakteri,

atau berupa gumpalan fluoresen jika antigennya adalah virus.

- Serologi. Selama terjadi semua jenis infeksi, respons *host* membentuk antibodi. Produksi antibodi dan lamanya waktu untuk membentuk antibodi tergantung pada stimulasi antigenik. Jika terjadi infeksi berat, antibodi diproduksi pada awal penyakit dan meningkat tajam selama 10-21 hari berikutnya. Sampel serum darah yang dikumpulkan segera setelah timbulnya penyakit, dan sekali lagi pada fase pemulihan, dapat dibandingkan untuk perubahan kandungan antibodi. Pengenceran serum dapat dilakukan di mana patogen sulit dideteksi dalam kultur, dan uji serologis dapat dilakukan yang berfokus pada interaksi antara antigen dan antibodi spesifik. Salah satu tes yang paling umum digunakan adalah *enzym-linked immunosorbent assay* (ELISA) yang dikembangkan pada 1970-an untuk mendeteksi antibodi. *Well* plastik pada *plate* mikrotiter dilapisi dengan antigen spesifik, yang ditambahkan sampel dari spesimen pasien. Setiap antibodi spesifik dalam sampel akan mengikat antigen, mempengaruhi perubahan warna. Antibodi serum terhadap infeksi HIV dapat dideteksi dengan uji ELISA dalam waktu lima hingga tujuh minggu setelah infeksi.
- *Typing*. Strain bakteri terdiri dari 'turunan satu kultur mikroba murni', dan *typing* adalah teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi bakteri yang berbeda dalam suatu spesies dan membantu identifikasi dan keterkaitan kasus dalam wabah. Untuk *typing* kasus MRSA jika terjadi wabah di rumah sakit atau fasilitas kesehatan komunitas, misalnya, *typing* isolat positif MRSA dari pasien yang terkolonisasi atau terinfeksi akan dilakukan untuk mengidentifikasi tipe *spa* (*staphylococcal protein A* / protein stafilokokus A) dari masing-masing isolat untuk mengidentifikasi klon dari mana strain tersebut berasal. Ada sejumlah metode *typing* yang dapat digunakan tergantung pada organisme dan fasilitas yang tersedia. *Typing* juga biasa dilakukan untuk isolat *C. difficile* dan dapat menjadi alat yang berguna jika

terjadi periode peningkatan insiden atau wabah untuk membantu Tim Pencegahan dan Pengendalian Infeksi menentukan apakah infeksi silang telah terjadi.

- Sekuensing genom. DNA berisi gen sel dan kode genetiknya dan merupakan bagian integral dari berfungsinya sel. Informasi yang membentuk kode genetik terdiri dari empat nukleotida – A (adenosin), T (timin), G (guanin) dan C (cytosin) – yang dirangkai dalam sekuens panjang, menyerupai dua pita yang terjalin, yang terdiri dari ribuan juta huruf individu. Urutan di mana huruf-huruf ini muncul berbeda di semua organisme, dan karena itu dimungkinkan untuk menentukan urutan spesifik dan unik dari keempat nukleotida ini dalam suatu organisme. Jika urutan kemunculan huruf atau nukleotida ini dalam sekuens berubah, hal tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi mutasi.

Selain manifestasi klinis dan pemeriksaan fisik, sebagaimana dijelaskan sebelumnya, pemeriksaan laboratorium dan tes diagnostik lainnya digunakan untuk mengkonfirmasi diagnosis HAI. Tes darah rutin, yang meliputi hitung darah lengkap, panel metabolik, penanda inflamasi, dan analisis gas darah akan berguna untuk mengevaluasi dan mengidentifikasi etiologi dari HAI. Setiap jenis HAI memerlukan pemeriksaan yang berbeda, seperti yang ditunjukkan di bawah ini (Sikora and Zahra, 2023):

- CLA-BSI. Dengan kecurigaan klinis CLA-BSI, tanpa adanya infeksi lokal lainnya, pemeriksaan kultur darah harus dilakukan. Idealnya, sampel untuk kultur darah harus diambil dari dua tempat yang berbeda, misalnya, satu dari kateter vena sentral dan yang lainnya dari vena perifer sebelum memulai terapi antibiotik. Setiap bahan purulen di lokasi infeksi harus dikulturkan.
- CAUTI. Sampel urin harus dikumpulkan dari sampel aliran tengah setelah pelepasan kateter urin, jika memungkinkan.

Hal ini mencegah kemungkinan untuk mendapatkan bakteri yang ada dalam biofilm yang ada di dinding kateter. Urinalisis dan kultur urin harus dilakukan. Piuria umumnya ditemukan pada pasien yang dikateterisasi dengan bakteriuria. Bakteriuria, dengan pertumbuhan kultur 100.000 *colony forming units* (CFU)/mL bakteri uropatogenik tanpa gejala UTI, disebut sebagai bakteriuria asimtomatik dan biasanya tidak diobati. Pada pasien dengan manifestasi klinis CAUTI yang tidak dijelaskan oleh sumber infeksi lain, dan pertumbuhan kultur urin lebih besar dari 1.000 CFU/mL dengan satu atau lebih patogen didiagnosis dengan CAUTI.

- IDO. Presentasi klinis harus memandu evaluasi IDO. Bila dicurigai adanya IDO, sampel jaringan yang terinfeksi, drainase, atau bahan purulen harus dikultur dengan antibiogram. Swab dapat dilakukan pada luka yang dalam. Namun, swab superfisial dapat terkontaminasi dengan kolonisasi polimikrobial. Modalitas pencitraan yang berbeda dapat digunakan untuk mengidentifikasi organ atau IDO yang menempati ruang, terutama untuk memandu drainase cairan atau abses yang terinfeksi.
- VAP. Diagnosis klinis pneumonia harus dievaluasi lebih lanjut dengan temuan radiografi dan mikrobiologis. Rontgen dada paling sering digunakan dan dapat mengungkapkan infiltrat baru. Leukositosis atau leukopenia dapat ditekan. Sampel sputum harus diperoleh dengan pengambilan sampel non-invasif dari aspirasi atau ekspektorasi endotrakeal atau melalui bronkoskopi dengan *lavage* bronkoalveolar atau *brushing* spesimen. Sampel harus diperiksa dengan dilakukan pewarnaan bakteri dan dikultur dengan uji kepekaan antibiotik. Tergantung pada skenario klinis, media kultur khusus dapat diperlukan untuk menumbuhkan organisme seperti *Mycobacterium tuberculosis* atau jamur patogen.

8.6 Penatalaksanaan

Untuk CLA-BSI, pelepasan kateter vena sentral harus dipertimbangkan dalam keadaan tertentu dan tergantung pada organisme yang dikultur. Kateter vena sentral yang terinfeksi *Candida*, *S. aureus*, dan *Pseudomonas* harus diangkat dan diganti di tempat alternatif setelah kultur darah berikutnya kembali negatif. Terapi dan durasi antimikroba ditentukan oleh organisme spesifik pada kultur dan tingkat keparahan infeksi (Sikora and Zahra, 2023).

Manajemen kateter dan terapi antimikroba diperlukan untuk mengobati CAUTI. Meminimalkan penggunaan dan durasi pemasangan kateter adalah langkah pencegahan yang paling penting. Penilaian harian terhadap indikasi dan kebutuhan untuk melanjutkan kateterisasi harus dilakukan. Kateterisasi intermiten dikaitkan dengan tingkat CAUTI yang lebih rendah dan harus dipertimbangkan pada pasien yang benar-benar membutuhkannya. Pengangkatan kateter urin direkomendasikan setelah penggunaan selama dua minggu karena pembentukan biofilm dan respon yang tidak adekuat terhadap terapi antimikroba. Terapi antimikroba harus didasarkan pada kultur dan uji sensitivitas (Sikora and Zahra, 2023).

SSI ditatalaksana dengan debridemen jaringan yang rusak dan drainase cairan yang terinfeksi, termasuk abses. Terapi antimikroba pada awalnya harus dipilih dengan cakupan luas untuk patogen paling umum yang terkait dengan tempat infeksi tertentu. Mempersempit cakupan antimikroba harus dipandu oleh hasil kultur dan gambaran klinis pasien (Sikora and Zahra, 2023).

Hasil kultur respirasi harus memandu terapi antimikroba untuk mengobati HAP dan VAP. Jika sampel tidak dapat diperoleh, pengobatan antimikroba empiris harus dimulai berdasarkan pedoman rumah sakit dan antibiogram rumah sakit untuk HAP dan VAP. Pasien harus dinilai ulang setiap hari untuk kebutuhan

terapi antimikroba lanjutan dan tergantung pada tingkat kecurigaan penyakit (Sikora and Zahra, 2023).

8.7 Prognosis dan Komplikasi

Infeksi nosokomial merupakan penentu atau determinan hasil klinis yang penting bagi pasien di ICU (Kollef *et al.*, 2021). Prognosis infeksi nosokomial bervariasi pada jenis HAI, tingkat keparahan penyakit, dan patogen yang terlibat. Beberapa penelitian menunjukkan tingkat kematian 30 hari sekitar 10% pada pasien yang terkena HAI (Sikora and Zahra, 2023).

Komplikasi infeksi nosokomial cukup luas dan bergantung pada jenis HAI, tingkat keparahan penyakit, dan patogen yang terlibat. Komplikasi HAP/VAP termasuk: kegagalan pernapasan, empiema, efusi parapneumonik, dan sepsis. Komplikasi CLA-BSI adalah: tromboflebitis supuratif, endokarditis, artritis septik, osteomielitis, abses, dan sepsis. Komplikasi CAUTI meliputi keterlibatan saluran kemih bagian atas dan sepsis. Sementara itu, komplikasi IDO termasuk penyembuhan luka yang tertunda, reaksi rejeksi / penolakan perangkat implan/prostetik, operasi ulang atau pengangkatan perangkat/prostetik yang terinfeksi, pembentukan abses, infeksi rongga tubuh, dan sepsis (Sikora and Zahra, 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Berríos-Torres, S.I. *et al.* (2017) 'Centers for Disease Control and Prevention Guideline for the Prevention of Surgical Site Infection, 2017', *JAMA Surgery*, 152(8), pp. 784–791. Available at: <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2017.0904>.
- CDC (2019) *Central Line-associated Bloodstream Infections: Resources for Patients and Healthcare Providers | HAI*. Available at: <https://www.cdc.gov/hai/bsi/CLA-BSI-resources.html> (Accessed: 12 August 2021).
- Custodio, H.T. (2021) 'Hospital-Acquired Infections: Practice Essentials, Background, Pathophysiology'. Available at: <https://emedicine.medscape.com/article/967022-overview#a1>.
- Darvishi, M. *et al.* (2020) 'Nosocomial Infections, Challenges and Threats: A Review Article', *Iranian Journal of Medical Microbiology*, 14(2), pp. 162–181. Available at: <https://doi.org/10.30699/ijmm.14.2.162>.
- Fürnkranz, U. and Walochnik, J. (2021) 'Nosocomial Infections: Do Not Forget the Parasites!', *Pathogens*, 10(2), p. 238. Available at: <https://doi.org/10.3390/pathogens10020238>.
- Khan, H.A., Baig, F.K. and Mehboob, R. (2017) 'Nosocomial infections: Epidemiology, prevention, control and surveillance', *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(5), pp. 478–482. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.01.019>.
- Kollef, M.H. *et al.* (2021) 'Nosocomial Infection', *Critical Care Medicine*, 49(2), p. 169. Available at: <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000004783>.
- Landelle, C. and Pittet, D. (2016) 'Definition, epidemiology, and general management of nosocomial infection', in A. Webb *et al.* (eds) *Oxford Textbook of Critical Care*. Oxford University Press, p. 0. Available at: <https://doi.org/10.1093/med/9780199600830.003.0283>.

- Mayhall, C.G. (ed.) (2012) *Hospital epidemiology and infection control*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.
- Monegro, A.F., Muppidi, V. and Regunath, H. (2021) 'Hospital Acquired Infections', in *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441857/> (Accessed: 12 August 2021).
- Raofi, S. *et al.* (2023) 'Global prevalence of nosocomial infection: A systematic review and meta-analysis', *PLOS ONE*, 18(1), p. e0274248. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274248>.
- Sikora, A. and Zahra, F. (2023) 'Nosocomial Infections', in *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559312/> (Accessed: 18 August 2023).
- Tolera, M. *et al.* (2018) 'Bacterial Nosocomial Infections and Antimicrobial Susceptibility Pattern among Patients Admitted at Hiwot Fana Specialized University Hospital, Eastern Ethiopia', *Advances in Medicine*, 2018, p. e2127814. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/2127814>.
- Weston, D. (2013) *Fundamentals of infection prevention and control: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- Zhang, B., Wu, X.L. and Li, R. (2021) 'A Meta-Analysis on Evaluation of Nosocomial Infections Amongst Patients in a Tertiary Care Hospital', *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, p. e4386423. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/4386423>.

BAB 9

MEKANISME KERJA ANTIBIOTIK DAN MEKANISME RESISTENSI

Oleh Dewi Peti Virgianti

9.1 Pendahuluan

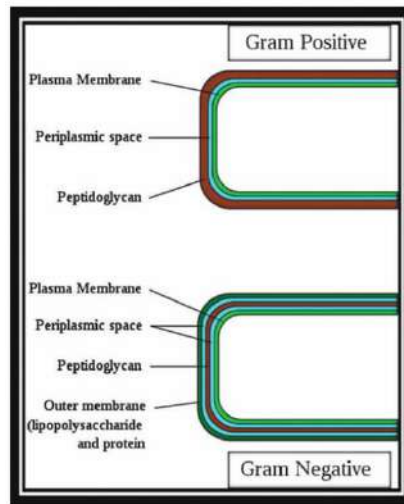
Umat manusia senantiasa berjuang melawan penyakit menular. Optimisme bahwa infeksi dapat dikendalikan dan dicegah muncul melalui penemuan antibiotik. Namun, infeksi masih menjadi penyebab utama kematian di negara berkembang di dunia. Hal ini disebabkan oleh kemunculan penyakit baru, atau kemunculan kembali penyakit yang dahulu telah dapat dikendalikan dan lebih spesifik lagi karena resistensi terhadap antimikroba. Kemunculan resistensi antimikroba tidak dapat dihindari untuk hampir setiap obat baru, dan hal ini merupakan masalah utama dalam pengobatan infeksi mikroba pada rumah sakit maupun komunitas.

Bab ini bermaksud untuk membahas mekanisme aksi dan perkembangan resistensi pada antimikroba yang umum digunakan. Sebelumnya, kita perlu untuk memahami mengenai anatomi dasar sel bakteri, klasifikasi antibiotik berdasarkan mekanisme kerjanya, dan mekanisme umum pada resistensi antibiotik.

1. Anatomi Dasar Sel Bakteri

Bakteri Gram positif terdiri dari membran sitoplasma dan dikelilingi oleh dinding sel yang kuat dan kaku. Sebaliknya, bakteri Gram negatif terdiri dari dinding sel tipis yang dikelilingi oleh membran lipid kedua yang disebut

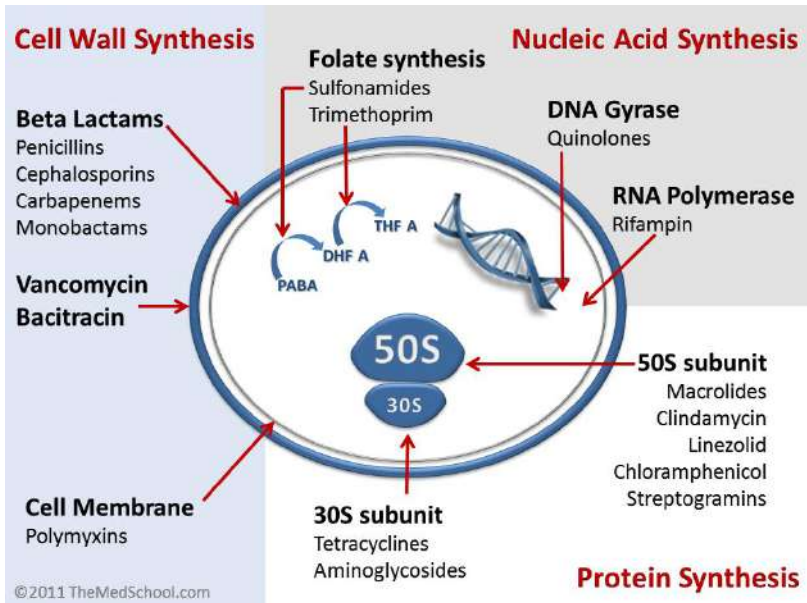
membran luar (*Outer Membrane*). Jarak antara membran luar dan membran sitoplasma disebut periplasma (Gambar 1). Membran luar adalah lapisan pelindung tambahan pada Bakteri Gram negatif dan mencegah masuknya beragam zat ke dalam bakteri. Namun membran ini mengandung saluran yang disebut porin, yang memungkinkan masuknya berbagai macam molekul seperti obat-obatan (Hauser 2015). Dinding sel adalah lapisan yang keras yang memberi bakteri bentuk yang khas dan mencegahnya dari tekanan osmotik dan mekanis. Membran sitoplasma mencegah ion mengalir masuk atau keluar sel dan mempertahankan komponen sitoplasma dan bakteri dalam ruang tertentu.



Gambar 9. 1. Struktur dinding sel bakteri (Kapoor et al. 2017)

2. Klasifikasi Antibiotik Berdasarkan Mekanisme Aksi

Antibiotik diklasifikasikan berdasarkan mekanisme aksinya, seperti yang dijelaskan pada Gambar 9.2.



Gambar 9. 2. Mekanisme aksi antibiotik

(https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Antibiotics_Mechanisms_of_action.png)

3. Antibiotik yang menarget dinding sel

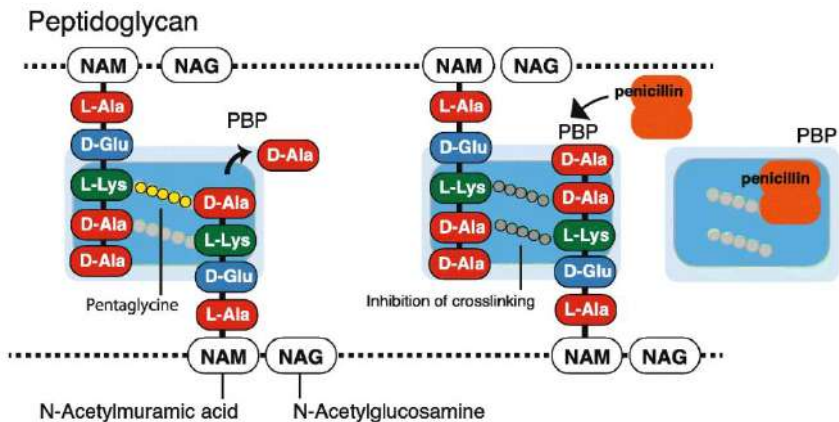
Sel bakteri dikelilingi oleh dinding sel yang terbuat dari peptidoglikan, yang terdiri dari polimer gula yang panjang. Peptidoglikan mempunyai ikatan silang dari untaian glikan yang diakibatkan oleh aksi transglukosidase, dan rantai peptida memanjang dari gula dalam polimer dan membentuk ikatan silang, satu peptida ke peptida lainnya (Kahne et al. 2005). Bagian D-alanil D-alanin dari rantai peptida dihubungkan silang oleh residu glisin dengan kehadiran protein pengikat penisilin (PBP) (Reynold 1989). Tautan silang ini memperkuat dinding sel. β -laktam dan glikopeptida menghambat sintesis dinding sel.

Antibiotik beta-laktam

Target utama antibiotik β -laktam adalah PBP. Cincin β -laktam menyerupai D-alanil D-alanin yang merupakan bagian dari rantai peptida yang normalnya terikat oleh PBP. PBP berinteraksi dengan cincin β -laktam namun tidak berfungsi untuk sintesis peptidoglikan baru. Gangguan pada lapisan peptidoglikan tersebut menyebabkan bakteri lisis (Gambar 3) (Dzidic et al. 2008).

Glikopeptida

Glikopeptida berikatan dengan bagian D-alanil D-alanin rantai samping peptida dari subunit prekursor peptidoglikan. Molekul obat vankomisin yang besar mencegah pengikatan subunit D-alanil ini dengan PBP, yang menyebabkan penghambatan sintesis dinding sel (Gambar 3) (Dzidic et al. 2008; Grundmann, et al. 2006).

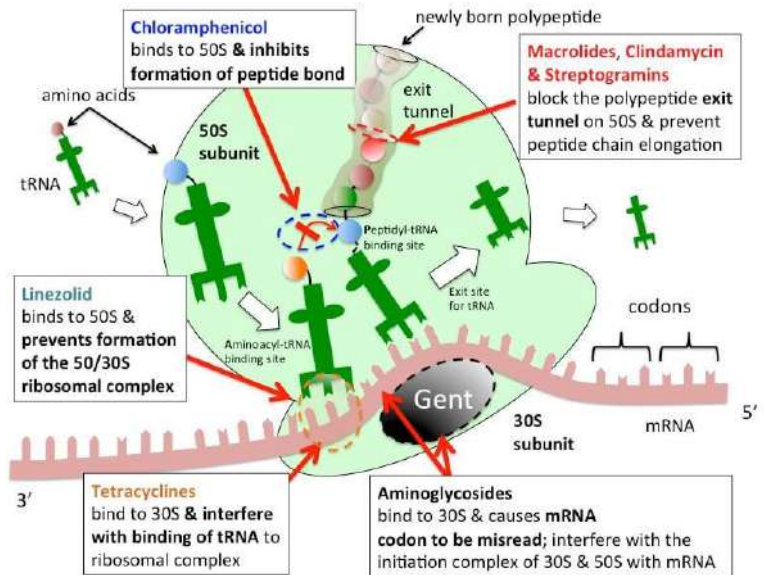


Gambar 9. 3. Mekanisme aksi dari antibiotik yang menarget dinding sel

(<https://basicmedicalkey.com/penicillins-cephalosporins-and-other-%CE%B2-lactam-antibiotics/>)

4. Penghambat biosintesis protein

Informasi dalam DNA bakteri digunakan untuk mensintesis molekul RNA yang disebut sebagai messenger RNA (m-RNA), proses ini dikenal sebagai transkripsi (Gambar 4). Kemudian struktur makromolekul yang disebut ribosom mensintesis protein yang terkode dalam m-RNA, proses ini disebut translasi. Protein biosintesis dikatalisis oleh ribosom dan faktor sitoplasma. Ribosom 70S bakteri terdiri dari dua subunit ribonukleoprotein, subunit 30S dan 50S (Yoneyama & Katsumata 2006). Antimikroba menghambat biosintesis protein dengan menargetkan subunit 30S atau 50S dari ribosom bakteri (Vannuffell & Cocito 1996).



Gambar 9. 4. Mekanisme aksi antibiotik yang menghambat biosintesis protein

(<https://microbenotes.com/protein-synthesis-inhibitors/>)

Inhibitor subunit 30S

Aminoglikosida

Aminoglikosida (AG) adalah molekul bermuatan positif yang menempel pada OM yang bermuatan negatif mengarah ke pembentukan pori-pori besar, dan dengan demikian memungkinkan penetrasi antibiotik di dalam bakteri. Target utama tindakannya adalah ribosom bakteri; untuk masuk, di sana harus melewati membran sitoplasma yang membutuhkan mekanisme transportasi secara aktif yang bergantung pada energi yang membutuhkan oksigen dan kekuatan proton aktif. Oleh karena itu, AG bekerja pada kondisi aerobik dan memiliki aktivitas yang buruk terhadap bakteri anaerob. AG ini bersinergi dengan antibiotik yang menghambat sintesis dinding sel (seperti β -laktam dan glikopeptida) hal itu memungkinkan penetrasi AG yang lebih besar di dalam sel dan di dosis rendah. AG berinteraksi dengan ribosom subunit 30S melalui ikatan hidrogen. Mereka menyebabkan kesalahan pembacaan pada mRNA dan penghentian terjemahan yang terlalu awal pada proses translasi.

Tetrasiklin

Tetrasiklin, seperti tetrasiklin, klortetrasiklin, doksisisiklin, atau minosiklin, bertindak berdasarkan urutan gen lestari pada 16S r RNA subunit ribosom 30S untuk mencegah pengikatan t-RNA ke site A (Yoneyama & Katsumata 2006; Wise 1999).

Inhibitor subunit 50S

Kloramfenikol

Kloramfenikol berinteraksi dengan urutan sekuens lestari peptidil transferase pada 23S r RNA subunit 50S. Oleh karena itu, ia menghambat sintesis protein dengan mencegah pengikatan t-RNA ke site A pada ribosom (Yoneyama & Katsumata 2006; Vannuffel & Cocito 1995).

Makrolida

Makrolida mempengaruhi tahap awal sintesis protein, yaitu translokasi, dengan menargetkan sekuen lestari pusat peptidil transferase pada 23S r-RNA dari subunit ribosom 50S (Yoneyama & Katsumata 2006; Wise 1999). Hal ini menyebabkan pelepasan prematur rantai peptida yang tidak lengkap. Makrolida, lincosamides, dan streptogramins B menunjukkan mekanisme aksi yang serupa.

Oksazolidinon

Linezolid adalah golongan baru antibiotik yang sepenuhnya sintetik. Oksazolidinon mengganggu sintesis protein di beberapa bagian tahapan: (i) menghambat sintesis protein dengan mengikat RNA 23Sr subunit 50S dan (ii) menekan penghambatan 70S dan berinteraksi dengan peptidil-t-RNA (Lambert 2005; Bozdogan & Appelbaum 2004).

5. Penghambat replikasi DNA

Kuinilon

Fluoroquinolones (FQ) menghambat enzim DNA girase pada bakteri, yang dapat memotong DNA beruntai ganda, menghasilkan supercoils negatif dan kemudian menutup kembali ujung untai. Hal ini diperlukan untuk mencegah hal supercoiling positif berlebihan pada untai ketika mereka terpisah pada saat replikasi atau transkripsi. DNA girase terdiri dari dua Subunit A dan dua subunit B. Sebuah subunit melaksanakan pemotongan DNA, subunit B menimbulkan superkoil negatif, dan kemudian subunit A menutup kembali untaianya. FQ terikat pada Subunit dengan afinitas tinggi dan mengganggu fungsi pemotongan dan penyegelan kembali untai tersebut. Pada bakteri Gram positif, target utama FQ adalah topoisomerase IV yang berfungsi memisahkan untai DNA anak setelah replikasi DNA. Afinitas yang lebih besar terhadap enzim

ini dapat memberikan potensi yang lebih tinggi melawan bakteri Gram positif. Sebagai pengganti DNA girase atau topoisomerase IV, sel mamalia memiliki topoisomerase II, yang memiliki afinitas sangat rendah terhadap FQ, sehingga FQ memiliki toksisitas rendah terhadap sel (Yoneyama & Katsumata 2006; Wise 1999; Higgins et al. 2003).

6. Penghambat metabolisme asam folat

Sulfonamida dan trimetoprim

Masing-masing obat ini menghambat tahapan yang berbeda dalam metabolisme asam folat. Kombinasi obat sulfa dan trimetoprim bekerja pada tahap berbeda pada jalur biosintetik yang sama, sehingga menunjukkan sinergi dan penurunan tingkat mutasi penyebab resistensi (Yoneyama & Katsumata 2006). Sulfonamida menghambat dihidropteroat sintase dengan cara yang kompetitif dengan afinitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan substrat alami, asam p-amino benzoat. Agen seperti trimetoprim bertindak pada tahap lanjutan pada sintesis asam folat dan menghambat enzim dihidrofolat reduktase (Yoneyama & Katsumata 2006).

9.2 Mekanisme Resistensi Antimikroba

Pencegahan akumulasi antimikroba baik dengan mengurangi serapan atau meningkatkan efflux antimikroba dari sel melalui perubahan permeabilitas membran luar

Molekul obat dapat ditransfer ke sel dengan difusi melalui porin, difusi melalui bilayer dan dengan pengambilan sendiri. Saluran porin tersebut terletak pada OM bakteri Gram-negatif. Molekul hidrofilik berukuran kecil (β -laktam dan kuinolon) dapat melintasi OM hanya melalui porin. Penurunan jumlah saluran porin menyebabkan penurunan jumlah antibiotik β -laktam

antibiotik dan FQ yang masuk ke dalam sel, sehingga menyebabkan resistensi terhadap kelas-kelas antibiotik ini. *Pseudomonas aeruginosa* mendapatkan resistensinya terhadap semua golongan antibiotik melalui mekanisme ini, yaitu disebabkan oleh permeabilitas OM yang rendah.

Pompa efflux

Mekanisme protein membran yang mengekspor antibiotik dari sel dan mempertahankan konsentrasi intraselulernya yang rendah disebut pompa efflux (Dzidic et al. 2008). Pada kecepatan yang sama, dimana antimikroba ini memasuki sel, mekanisme efflux memompa mereka keluar lagi, sebelum mereka mencapai targetnya (Wise 1999). Pompa-pompa ini terletak dalam membran sitoplasma, berbeda dengan porin yang terletak di OM. Antibiotik dari semua kelas kecuali polimiksin adalah rentan terhadap aktivasi sistem efflux (Lambert 2002). Pompa efflux bisa bersifat spesifik terhadap antibiotik. Kebanyakan dari mereka adalah multidrug transporter yang mampu memompa berbagai macam antibiotik yang tidak berhubungan – makrolida, tetrasiklin, dan FQ – dan karenanya berkontribusi secara signifikan pada organisme yang resisten terhadap beberapa obat (Dzidic et al. 2008).

Modifikasi molekul target

Variasi alami atau perubahan pada target site antimikroba sehingga mencegah pengikatan obat adalah mekanisme resistensi yang umum terjadi. Perubahan target site sering kali disebabkan oleh mutasi spontan gen bakteri pada kromosom. Karena interaksi antibiotik dengan molekul target umumnya cukup spesifik, perubahan kecil pada molekul target dapat menjadi efek penting pada pengikatan antibiotik.

- a. Perubahan subunit 30S atau subunit 50S: Perubahan subunit pada ribosom menyebabkan resistensi terhadap obat yang mempengaruhi sintesis protein, yaitu makrolida,

tetrasiklin, kloramfenikol, dan AG. Ikatan AG dengan subunit ribosom 30S (Lambert 2022), sedangkan kloramfenikol, makrolida, lincosamides, dan streptogramin B berikatan dengan subunit ribosom 50S menekan sintesis protein (Tenover 2006).

- b. Perubahan PBP: Modifikasi PBP merupakan mekanisme yang lebih disukai pada resistensi bakteri Gram positif, sedangkan produksi β -laktamase merupakan penyebab berkembangnya mekanisme resistensi pada bakteri Gram-negatif. Adanya mutasi pada protein pengikat penisilin menyebabkan penurunan afinitas terhadap antibiotik β -laktam. Resistensi *Enterococcus faecium* terhadap ampicilin dan *Streptococcus pneumoniae* terhadap penisilin terjadi melalui mekanisme ini. Demikian pula, pada *Staphylococcus aureus*, resistensi terhadap metisilin dan oksasilin dikaitkan dengan integrasi elemen genetik yang dapat berpindah – “kaset kromosom mec stafilokokus” – ke dalam kromosom *S. aureus* yang mengandung gen resistensi mec A (Dzidic et al. 2008; Alekshun dan Levy 2007; Hiramatsu et al. 2001)). Gen mec A mengkode protein PBP2a, protein pengikat penisilin yang baru, yang diperlukan untuk mengubah protein PBP stafilokokus yang asli. PBP2a menunjukkan resistensi yang tinggi terhadap Antibiotik β -laktam. Strain *S. aureus* yang telah resisten terhadap metisilin dapat resisten silang terhadap semua antibiotik β -laktam, streptomisin, dan tetrasiklin dan dalam beberapa kasus juga terhadap eritromisin (Grundmann et al. 2006).
- c. Perubahan prekursor dinding sel: Sintesis dinding sel di Bakteri gram positif dapat dihambat oleh glikopeptida, misalnya, vankomisin atau teicoplanin, melalui pengikatan terhadap residu D-alanyl-D-alanin dari prekursor peptidoglikan. D-alanil-alanin diubah menjadi D-alanil-laktat sehingga glikopeptida tidak dapat berikatan silang

dengannya, maka berkembanglah resistensinya (Dzidic et al. 2008; Grundmann et al. 2006). Strain *E. faecium* dan *Enterococcus faecalis* memiliki resistensi yang tinggi terhadap vankomisin dan teicoplanin (resistensi tipe Van A). Resistensi tipe Van B dan Van C menunjukkan resistensi terhadap vankomisin tetapi sensitif terhadap teicoplanin (Giedraitiene et al. 2011).

- d. DNA girase dan topoisomerase IV yang telah bermutasi menyebabkan resistensi FQ: Kuinolon berikatan dengan DNA girase subunit A. Mekanisme resistensi melibatkan modifikasi dua enzim: DNA girase (dikode oleh gen *gyr A* dan *gyr B*) dan topoisomerase IV (dikode oleh gen *par C* dan *par E*) (Kim et al. 2002). Mutasi pada gen *gyr A* dan *par C* mengarah ke kegagalan replikasi dan akibatnya FQ tidak dapat mengikat DNA.
- e. Mekanisme perlindungan ribosom menyebabkan resistensi menjadi tetrasiklin.
- f. Mutasi RNA polimerase menyebabkan resistensi terhadap rifampisin.

Inaktivasi antibiotik

Terdapat tiga enzim utama yang dapat menonaktifkan antibiotik seperti β -laktamase, enzim pengubah aminoglikosida, dan kloramfenikol asetiltransferase (AAC) (Dockrell et al. 2004).

Beta-laktamase

β -laktamase menghidrolisis hampir semua β -laktam yang memiliki ester dan ikatan Amida, misalnya penisilin, sefalosporin, monobaktam, dan karbapenem. Sekitar 300 β -laktamase diketahui sampai saat ini. β -laktamase adalah enzim umum yang diklasifikasikan menggunakan dua sistem klasifikasi utama: Ambler (struktural) dan Bush–Jacoby–Medeiros (fungsional) (Alekhun & Levy 2007). Sistem klasifikasi Ambler dijelaskan sebagai berikut:

- a. β -laktamase kelas A: Juga disebut sebagai penisilinase; ini peka terhadap asam klavulanat. Terdapat dua β -laktamase kelas A yang biasa ditemui pada anggota *Enterobacteriaceae* yaitu ditetapkan sebagai TEM-1, SHV-1. Ini adalah penisilinase dengan sedikit atau tanpa aktivitas melawan sefalosporin (Rice et al. 2003). β -laktamase kelas A adalah nenek moyang β -laktamase spektrum luas/ Extended-spectrum β -laktamase (ESBL). ESBL adalah enzim yang telah mengubah profil substrat karena substitusi asam amino yang memungkinkan hidrolisis sebagian besar sefalosporin. ESBL resisten terhadap penisilin, sefalosporin generasi ketiga (misalnya, ceftazidime, cefotaxime, ceftriaxone), aztreonam, cefamandole, cefoperazone, tetapi sensitif terhadap metoksi-sefalosporin, misalnya sefamisin dan karbapenem dan dapat dihambat oleh inhibitor β -laktamase, misalnya asam klavulanat, sulbaktam, atau tazobaktam (Jacoby & Munoz-Price 2005; Bonnet 2004).
- b. β -laktamase kelas B: Ini adalah metallo- β -laktamase. Ini memerlukan enzim seperti seng atau logam berat untuk katalisis dan aktivitasnya dihambat oleh zat pengkhelat. Kelas enzim ini resisten terhadap inaktivasi oleh klavulanat, sulbaktam, aztreonam, dan karbapenem. Misalnya, New Delhi metallo- β -laktamase (Ramussen & Bush, 1997).
- c. β -laktamase Kelas C: Ini juga disebut sefalosporinase. Ini diproduksi oleh semua bakteri Gram-negatif kecuali *Salmonella* dan *Klebsiella*. β -laktamase kelas C menghidrolisis sefalosporin termasuk sefalosporin spektrum luas. Jika dibandingkan dengan β -laktamase kelas A, sefalosporin ini memiliki rongga yang besar, dan sebagai hasilnya, mereka mampu mengikat penisilin spektrum luas yang besar. Contoh dari jenis ini adalah Amp C β -laktamase. Enzim kelas ini resisten terhadap semua β -laktam kecuali karbapenem. Mereka tidak dihambat oleh klavulanat (Crichlow et al. 1999; Lobkovsky et al. 1994).
- d. β -laktamase Kelas D: Ini adalah enzim hidrolisis oksasilin – paling umum ditemukan pada *Enterobacteriaceae* dan *P. aeruginosa*. Enzim penghidrolisis oksasilin memberikan resistensi terhadap penisilin, kloksasilin, oksasilin, dan

methisilin. Mereka dihambat secara lemah oleh asam klavulanat namun dihambat oleh natrium klorida (Naas & Nordmann 1999).

Enzim pengubah aminoglikosida (AGE's)

AG dinetralkan oleh enzim spesifik: Fosforil-transferase, nukleotidil-transferase atau adenilil-transferase, dan AAC. Enzim pengubah aminoglikosida/ aminoglycoside-modifying enzyme (AMEs) ini mengurangi afinitas molekul yang dimodifikasi, menghambat pengikatan pada subunit ribosom 30S (Strateva & Yordanov 1999), dan memberikan resistensi spektrum yang diperluas terhadap AG dan FQ (Maurice et al. 2008). AME diidentifikasi pada strain *S. aureus*, *E. faecalis*, dan *S. pneumoniae*.

Kloramfenikol asetil transferase

Beberapa bakteri Gram-positif dan Gram-negatif dan beberapa strain *Haemophilus influenzae* resisten terhadap kloramfenikol, dan mereka memiliki enzim kloramfenikol transasetilase yang mengasetilasi gugus hidroksil kloramfenikol. Kloramfenikol yang dimodifikasi tidak dapat berikatan dengan subunit ribosom 50S dengan baik (Tolmasky 2000).

Mekanisme resistensi berbagai antibiotik dijelaskan pada Tabel 9.1.

Table 1: Resistance mechanism of individual antibiotics			
Antibiotic class	Resistance type	Resistance mechanism	Common example
Aminoglycoside	Decreased uptake	Changes in outer membrane	<i>P. aeruginosa</i>
	Enzymatic modification	AGE's	Gram-negative bacteria
Beta-lactams	Altered PBP	PBP 2a	Mec A in <i>S. aureus</i> , CONS, <i>S. pneumoniae</i>
	Enzymatic degradation	Penicillinase which are classified as per ambler classification	Gram-negative bacteria
Glycopeptides	Altered target	D-alanyl-alanine is changed to D-alanyl-D-lactate	Vancomycin resistance in <i>E. faecium</i> and <i>E. faecalis</i>
Macrolides	Altered target	Methylation of ribosomal active site with reduced binding	<i>erm</i> -encoded methylases in <i>S. aureus</i> , <i>S. pneumoniae</i> , and <i>S. pyogenes</i>
	Efflux pumps	Mef type pump	<i>S. pneumoniae</i> and <i>S. pyogenes</i>
Oxazolidinones	Altered target	Mutation leading to reduced binding to active site	<i>E. faecium</i> and <i>S. aureus</i>
Quinolones	Altered target	Mutation leading to reduced binding to active site(s)	Mutations in <i>gyr A</i> in enteric Gram-negative bacteria and <i>S. aureus</i>
	Efflux	Membrane transporters	Mutations in <i>gyr A</i> and <i>par C</i> in <i>S. pneumoniae</i> . Nor-A in <i>S. aureus</i>
Tetracyclines	Efflux	New membrane transporters	<i>tet</i> genes encoding efflux proteins in Gram-positive and Gram-negative bacteria
	Altered target	Production of proteins that bind to the ribosome and alter the conformation of the active site	<i>tet</i> (M) and <i>tet</i> (O) in Gram-positive and Gram-negative bacteria species
Chloramphenicol	Antibiotic inactivation	Chloramphenicol acetyl transferase	CAT in <i>S. pneumonia</i>
	Efflux pump	New membrane transporters	<i>eml A</i> gene and <i>flo</i> gene efflux in <i>E. coli</i>
Sulfa drugs	Altered target	Mutation of genes encoding DHPS	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. pneumoniae</i>

DHPS=Dihydropteroate synthase, *P. aeruginosa*=*Pseudomonas aeruginosa*, *S. aureus*=*Staphylococcus aureus*, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*, *E. faecium*=*Enterococcus faecium*, *E. faecalis*=*Enterococcus faecalis*, *S. pyogenes*=*Streptococcus pyogenes*, *E. coli*=*Escherichia coli*, PBP=Penicillin binding protein, AGE's=Aminoglycoside modifying enzymes, CAT=Chloramphinecol acetyl transferases (Kapoor et al. 2017).

DAFTAR PUSTAKA

- Alekshun, MN & Levy, SB 2001, 'Molecular mechanisms of antibacterial multidrug resistance', *Cell*, vol. 128, pp. 1037-50.
- Bonnet, R 2004, 'Growing group of extended-spectrum beta-lactamases: The CTX-M enzymes', *Antimicrob Agents Chemother*, vol. 48, pp. 1-14.
- Bozdogan, B & Appelbaum, PC 2004, 'Oxazolidinones: Activity, mode of action, and mechanism of resistance', *Int J Antimicrob Agents*, vol. 23, pp. 113-9.
- Crichlow, GV, Kuzin, AP, Nukaga, M, Mayama, K, Sawai, T & Knox, JR 1999, 'Structure of the extended-spectrum class C beta-lactamase of *Enterobacter cloacae* GC1, a natural mutant with a tandem tripeptide insertion', *Biochemistry*, vol. 38, pp. 10256-61.
- Dockrell, HM, Goering, RV, Roitt, I, Wakelin, D & Zuckerman, M. 2004, 'Attacking the enemy: Antimicrobial agents and chemotherapy' In: Mims, C, Dockrell, HM, Goering, RV, Roitt, I, Wakelin, D & Zuckerman, M, editors, *Medical Microbiology, Netherlands, Elsevier Mosby*, pp. 473-507.
- Džidic, S, Šuškovic, J & Kos, B 2008, 'Antibiotic resistance mechanisms in bacteria: Biochemical and genetic aspects', *Food Technol Biotechnol*, vol. 46, pp. 11-21.
- Giedraitiene, A, Vitkauskiene, A, Naginiene, R & Pavilonis, A 2011, 'Antibiotic resistance mechanisms of clinically important bacteria', *Medicina (Kaunas)*, vol. 47, pp. 137-46.
- Grundmann, H, Aires-de-Sousa, M, Boyce J & Tiemersma, E 2006, 'Emergence and resurgence of meticillin-resistant *Staphylococcus aureus* as a public-health threat', *Lancet*, vol. 368, pp. 874-85.
- Hauser, AR 2015, 'Cell envelope', In: *Antibiotic Basic for Clinicians*. 2nd ed. ,New Delhi: Wolters Kluwer (India) Pvt. Ltd., p. 3-5.

- Higgins, PG, Fluit, AC & Schmitz FJ 2003, 'Fluoroquinolones: Structure and target sites', *Curr Drug Targets*, vol. 4, pp. 181-90.
- Hiramatsu, K, Cui, L, Kuroda, M & Ito, T 2001, 'The emergence and evolution of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*', *Trends Microbiol*, vol. 9, pp. 486-93.
- Jacoby, GA & Munoz-Price, LS 2005, 'The new beta-lactamases' *N Engl J Med*, vol. 352, pp. 380-91.
- Johnston, NJ, Mukhtar, TA & Wright, GD 2002, 'Streptogramin antibiotics: Mode of action and resistance', *Curr Drug Targets*; vol. 3, pp.335-44.
- Kahne, D, Leimkuhler, C, Lu, W & Walsh, C 2005, 'Glycopeptide and lipoglycopeptide antibiotics', *Chem Rev*, vol. 105, pp. 425-48.
- Kapoor, G, Saigal, S & Elongavan, A 2017, 'Action and Resistance Mechanisms of Antibiotics: A Guide for Clinicians', *Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology*, vol. 33, pp. 300-5.
- Kim, YH, Cha, CJ & Cerniglia, CE 2002, 'Purification and characterization of an erythromycin esterase from an erythromycin-resistant *Pseudomonas* sp.', *FEMS Microbiol Lett*, vol. 210, pp. 239-44.
- Lambert, PA 2002, 'Mechanisms of antibiotic resistance in *Pseudomonas aeruginosa*', *J R Soc Med*, vol. 95, No. 41, pp. 22-6.
- Lambert, PA 2005, 'Bacterial resistance to antibiotics: Modified target sites', *Adv Drug Deliv Rev*, vol. 57, pp. 1471-85.
- Lobkovsky, E, Billings, EM, Moews, PC, Rahil, J, Pratt, RF & Knox JR, 1994, 'Crystallographic structure of a phosphonate derivative of the Enterobacter cloacae P99 cephalosporinase: Mechanistic interpretation of a beta-lactamase transition-state analog', *Biochemistry*, vol. 33, pp. 6762-72.

- Ma, L, Chang, FY, Fung, CP, Chen, TL, Lin, JC, Lu, PL 2005, 'Variety of TEM-, SHV-, and CTX-M-type beta-lactamases present in recent clinical isolates of *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, and *Enterobacter cloacae* from Taiwan', *Microb Drug Resist*, vol. 11, pp. 31-9.
- Maurice, F, Broutin, I, Podglajen, I, Benas, P, Collatz, E & Dardel, F 2008, 'Enzyme structural plasticity and the emergence of broad-spectrum antibiotic resistance', *EMBO Rep*, vol. 9, pp. 344-9.
- Naas, T & Nordmann, P 1999, 'OXA-type beta-lactamases', *Curr Pharm*, vol. 5, pp. 865-79.
- Rasmussen, BA & Bush, K 1997, 'Carbapenem-hydrolyzing beta-lactamases', *Antimicrob Agents Chemother*, vol. 41, pp. 223-32.
- Reynolds, PE 1989, 'Structure, biochemistry and mechanism of action of glycopeptide antibiotics', *Eur J Clin Microbiol Infect*, vol. 8, pp. 943-50.
- Rice, LB, Sahm, D & Bonomo R 2003, 'Mechanisms of resistance to antibacterial agents' In: Murray PR, editor. *Manual of Clinical Microbiology*, 8th ed. Washington, DC, ASM Press, pp. 1084-7.
- Strateva, T & Yordanov, D 2009, '*Pseudomonas aeruginosa* – A phenomenon of bacterial resistance', *J Med Microbiol*, vol. 58, No. 9, pp. 1133-48.
- Tenover, FC 2006, 'Mechanisms of antimicrobial resistance in bacteria', *Am J Med*, vol. 119, No. 6, pp. S3-10.
- Tolmasky, ME 2000, 'Bacterial resistance to aminoglycosides and beta-lactams: The Tn1331 transposon paradigm', *Front Biosci*, vol. 5, pp. 20-9.
- Vannuffel, P & Cocito, C 1996, 'Mechanism of action of streptogramins and macrolides', *Drugs*, vol. 51, no. 1, pp. 20-30.

- Wise, RA 1999, 'Review of the mechanisms of action and resistance of antimicrobial agents', *Can Respir J*, vol. 6, pp. 20A-2A.
- Yoneyama, H & Katsumata, R 2006, 'Antibiotic resistance in bacteria and its future for novel antibiotic development', *Biosci Biotechnol Biochem*, vol. 70, pp. 1060-75.

BAB 10

STERILISASI DAN BIOPSIDA

Oleh Qurrota Aýun

10.1 Pendahuluan

Sterilisasi mengacu pada proses anti-mikroba di mana semua mikroorganisme dibunuh atau dihilangkan di dalam atau pada suatu zat dengan menerapkan proses yang berbeda. Mikroba bereaksi dengan cara mereka sendiri terhadap efek antimikroba dari berbagai perlakuan fisik atau senyawa kimia, dan efektivitas pengobatan juga bergantung pada banyak faktor lain (misalnya kepadatan populasi, kondisi mikroorganisme, konsentrasi zat aktif, faktor lingkungan). Sterilisasi memiliki peran krusial dalam berbagai bidang seperti kesehatan, farmasi, produksi makanan, industri dan kesehatan hewan. Proses ini bisa dilakukan melalui metode seperti autoklaf dengan uap bertekanan tinggi, penggunaan panas kering, atau penggunaan bahan kimia sterilisasi seperti glutaraldehida atau formaldehida. Ada juga opsi menggunakan metode fisik seperti radiasi. Penting untuk diingat bahwa sterilisasi bukanlah peristiwa satu kali, melainkan proses berkelanjutan, sehingga setiap komponen harus dilaksanakan dengan benar untuk memastikan keberhasilan sterilisasi.

Biopsi telah digunakan sejak lebih dari 150 tahun untuk menegakkan diagnosis suatu kondisi medis yang tidak diketahui. Biopsi merupakan salah satu metode tertua dan paling andal yang hingga saat ini masih digunakan. Di sisi lain, biopsida (*biopsy*) adalah tindakan medis di mana sebagian kecil dari jaringan atau sel diambil dari tubuh seseorang untuk pemeriksaan di bawah

mikroskop. Meskipun biopsi dan sterilisasi adalah tindakan medis yang berbeda, keduanya memiliki keterkaitan dalam penggunaan instrumen steril.

10.2 Sterilisasi

Sterilisasi adalah proses membunuh semua mikroorganisme (bakteri, virus, dan jamur) dengan menggunakan bahan fisik atau kimia (Kumar *et al.*, 2019). Jika dilakukan dengan benar, prosedur sterilisasi akan memastikan bahwa endospora bakteri dan spora jamur yang sangat resisten pun dapat terbunuh. Proses sterilisasi mencakup penggunaan panas, radiasi, bahan kimia, atau tindakan fisika untuk menghilangkan mikroba (Tóth *et al.*, 2013). Jenis sterilisasi harus selalu dipilih sesuai kebutuhan, dengan mempertimbangkan kualitas bahan dan alat yang digunakan serta kemungkinan dampak buruk sterilisasi terhadap bahan dan alat tersebut. Sterilisasi sampel lingkungan tidak hanya harus menonaktifkan mikroorganisme, namun idealnya juga memiliki efek kecil pada sifat fisiko-geokimia bahan sampel.

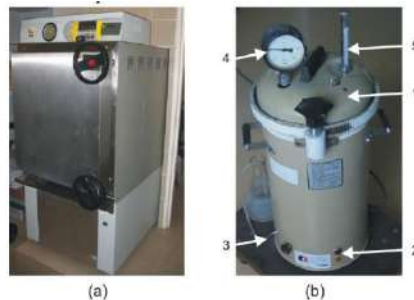
Sterilisasi di laboratorium mikrobiologi mengacu pada proses sterilisasi yang dilakukan pada saat penyiapan media kultur, reagen dan peralatan yang berperan menjamin terjaganya kondisi steril. Sterilisasi di laboratorium mikrobiologi dilakukan dengan metode berikut: Metode fisik yaitu penggunaan panas, filtrasi, pasteurisasi dan radiasi. Metode kimia yaitu dengan menggunakan bahan kimia seperti metil bromida, formaldehida, natrium azida dan merkuri klorida.

10.2.1 Sterilisasi Panas (termal)

Sterilisasi panas dibagi menjadi dua yaitu sterilisasi dengan uap jenuh bertekanan tinggi umumnya menggunakan autoklaf, sedangkan sterilisasi panas kering melibatkan penggunaan oven.

Kedua metode ini merupakan teknik sterilisasi yang paling sering digunakan.

Sterilisasi basah (uap bertekanan tinggi) merupakan metode sterilisasi yang efektif dan paling sulit dilakukan namun sering menjadi pilihan untuk mensterilkan instrumen dan barang-barang lain yang digunakan di fasilitas kesehatan. Keuntungan menggunakan sterilisasi basah yaitu lebih cepat, lebih hemat energi, dan tidak terlalu merusak dibandingkan sterilisasi api terbuka atau panas kering. Alat sterilisasi uap disebut juga autoklaf menggunakan uap kering bertekanan untuk menghasilkan suhu yang cukup tinggi untuk menghancurkan mikroba (Gambar 10.1). Suhu yang digunakan adalah 121°C selama minimal 15 menit. Ini akan membunuh semua bakteri, protozoa, jamur dan virus, tetapi tidak akan menonaktifkan prion sepenuhnya.



Gambar 10. 1. Tipe autoklaf. (a) autoklaf otomatis dioperasikan dengan aliran uap eksternal. (b) autoklaf manual dengan bagian-bagian (1). tutup, (2). Saklar, (3). katup pemeras, (4). Pengukur tekanan (5). Termometer (Tóth *et al.*, 2013)

Metode sterilisasi dengan panas kering (*oven*) cocok digunakan di iklim lembab namun memerlukan pasokan listrik secara terus-menerus, sehingga tidak praktis di banyak daerah terpencil (pedesaan). Selain itu, penggunaan suhu yang lebih tinggi pada sterilisasi panas kering hanya dapat digunakan pada benda kaca atau logam karena akan melelehkan zat lain.

Sterilisasi dalam oven udara panas dilakukan pada suhu 160°C dan dipertahankan atau ditahan selama satu jam karena spora bakteri akan terbunuh pada suhu ini. Sterilisasi panas kering menyebabkan perubahan struktur protein, kerusakan akibat oksidasi, dan potensi efek beracun akibat peningkatan konsentrasi elektrolit saat tidak terdapat air (Kumar *et al.*, 2019). Sterilisasi panas kering dilakukan dengan suhu yang dapat disesuaikan seperti inkubator. Untuk mencapai suhu ruangan yang seragam, udara panas disirkulasikan. Sterilisasi dengan panas kering terbatas pada alat yang terbuat dari logam, kaca atau porselen, dan bahan stabil termo lainnya, seperti gliserol, parafin lunak, minyak dan lemak. Dalam sistem sterilisasi panas kering, bahan-bahan tersebut harus tahan terhadap suhu yang diperlukan untuk membunuh bakteri pembentuk spora pada 160°C selama 45 menit; 180°C selama 25 menit; dan 200°C selama 10 menit (Tóth *et al.*, 2013).

Peralatan laboratorium seperti alat bedah dan jarum inokulasi dapat disterilkan dengan cepat dan aman dengan cara dipanaskan sampai 'merah' dalam nyala api bunsen atau lampu spiritus. Merebus adalah cara paling sederhana dan tertua dalam menggunakan panas lembab. Suhu air mendidih tidak melebihi 100°C pada tekanan atmosfer normal. Bakteri pembentuk endospora yang tahan panas dapat bertahan dalam perlakuan panas perebusan selama 10-30 menit, sehingga tidak ada efek sterilisasi yang diharapkan dari perebusan.

Pasteurisasi adalah proses memanaskan setiap partikel susu atau produk susu. Pasteurisasi melibatkan pemanasan makanan sampai suhu yang membunuh mikroorganisme penyebab penyakit dan secara substansial mengurangi tingkat organisme pembusuk (Watts, 2016). Pasteurisasi membunuh mikroba (terutama bakteri) pada makanan dan minuman, seperti susu, jus, makanan kaleng, dan lain-lain. Pasteurisasi ditemukan pada abad ke-19 oleh ilmuwan Perancis yang bernama Louis Pasteur. Tidak seperti sterilisasi, pasteurisasi tidak bertujuan

untuk membunuh seluruh mikroorganisme yang terdapat dalam makanan. Sebaliknya, tujuannya adalah mengurangi jumlah patogen yang hidup sehingga resiko penyakit menjadi lebih kecil (dengan asumsi produk yang dipasteurisasi disimpan dengan benar dan dikonsumsi sebelum tanggal kedaluwarsa). Selain dapat menginaktivasi mikroba, pasteurisasi berhasil digunakan untuk menonaktifkan enzim jus buah seperti polifenoloksidase (PPO), lipoksigenase (LOX), peroksidase (POD), dan pektinmetilesterase (PME), yang bertanggung jawab terhadap penurunan kualitas (Ağçam *et al.*, 2018). Dengan demikian, umur simpan jus buah yang diproses secara termal dapat diperpanjang selama beberapa bulan tanpa masalah keamanan atau penurunan kualitas yang signifikan pada suhu rendah atau suhu ruangan

Tyndallisasi (sterilisasi intermiten) adalah metode sterilisasi panas yang lama dan memakan waktu (Tóth *et al.*, 2013). Selama metode ini, media atau larutan dipanaskan hingga suhu di atas 90°C selama 30 menit selama empat hari berturut-turut, dan zat ditempatkan dalam inkubator pada suhu 37°C atau disimpan pada suhu kamar dalam waktu yang berselang-seling. Bentuk vegetatif dihancurkan selama perlakuan panas. Endospora yang dapat berkecambah selama masa inkubasi dihancurkan selama perlakuan panas berturut-turut. Dengan cara ini, setelah hari keempat perlakuan panas, tidak ada sel hidup yang tersisa di dalam zat tersebut. Prosedur ini hanya berfungsi pada media kaldu yang mendukung pertumbuhan organisme pembentuk spora. Ini tidak berguna untuk mensterilkan air atau buffer

10.2.2 Sterilisasi Radiasi

Sterilisasi radiasi adalah proses fisik yang didasarkan pada aksi energi radiasi dengan materi. Untuk tujuan sterilisasi, radiasi pengion diterapkan. Istilah radiasi pengion mencakup semua jenis radiasi yang membawa energi yang mampu menghasilkan rangkaian ionisasi (pembentukan ion) dalam materi. Dua jenis

radiasi pengion digunakan untuk tujuan sterilisasi: sinar elektromagnetik dengan panjang gelombang di bawah 100 nm (0,55.0 meV) misalnya. sinar gamma dan sinar-X serta radiasi sel, yaitu elektron mono-energi yang bergerak cepat ($3,0 \cdot 10,0$ meV) (Kaminski *et al.*, 2021). Kemanjuran sterilisasi radiasi pengion terletak pada daya tembusnya yang baik pada bahan yang diikuti dengan efek membunuh patogen.

Ultraviolet (UV) dan radiasi pengion dapat juga digunakan untuk sterilisasi terutama untuk bahan yang peka terhadap panas. Spektrum penuh radiasi UV dapat merusak mikroba namun hanya sebagian kecil yang bertanggung jawab atas apa yang disebut germicidal. Efek "germicidal" yang sangat kuat dapat dicapai pada sekitar 265 nm. Karena penyerapan maksimum UV pada DNA terjadi pada panjang gelombang tersebut. Penyebab utama kematian sel adalah pembentukan dimer pirimidin pada asam nukleat. Bakteri mampu memperbaiki asam nukleatnya setelah rusak menggunakan mekanisme yang berbeda; Namun, di luar tingkat kerusakan tertentu, kapasitas sistem enzim tidak mencukupi dan akumulasi mutasi menyebabkan kematian. Lampu UV (pembasmi bakteri patogen) banyak digunakan di rumah sakit dan laboratorium (misalnya di lemari pengaman biologis) untuk dekontaminasi udara dan permukaan apa pun yang terbuka. Kerugian penggunaan radiasi UV adalah tidak menembus kaca, lapisan tanah, air, dan zat lainnya.

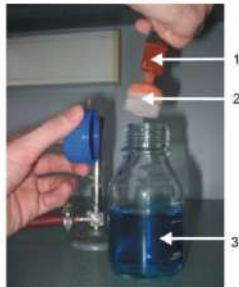
Di antara radiasi pengion berenergi tinggi, sinar- γ dari nuklida radioaktif dengan suhu 60°C umumnya digunakan untuk sterilisasi jarum suntik sekali pakai, perban, obat-obatan dan makanan tertentu (misalnya rempah-rempah). Keuntungan radiasi gamma adalah penetrasinya yang dalam melalui kemasan. Kerugiannya adalah hamburan ke segala arah, yang memerlukan keadaan khusus untuk penerapannya.

Proses sterilisasi menggunakan radiasi melibatkan penggunaan sinar ultraviolet (UV), sinar gamma dan sinar X. Radiasi UV digunakan untuk melakukan sterilisasi pada permukaan dan benda transparan, serta sterilisasi area kerja. Namun, radiasi UV tidak efektif dalam sterilisasi permukaan yang berdebu, dan juga bisa menyebabkan kerusakan pada beberapa jenis plastik (Jawetz, 1987)

10.2.3. Sterilisasi Filtrasi

Filtrasi adalah suatu cara untuk menghilangkan partikel-partikel besar dari suatu larutan. Metode Filtrasi digunakan untuk memisahkan produk terlarut yang rusak karena panas misalnya air, serum, racun, antibiotik, vitamin dan lain-lain (Ptiwari *et al.*, 2009). Tergantung pada ukuran pori-pori di filter, partikel dengan ukuran berbeda dapat tertahan. Beberapa filter dirancang hanya untuk menyaring kotoran, sementara beberapa filter menyaring bakteri namun memungkinkan virus melewatinya, dan beberapa filter bahkan menyaring virus bila digunakan secara seri, seperti pada kasus filter udara partikulat efisiensi tinggi (HEPA) (Korsman, 2012). Metode sterilisasi ini digunakan untuk media khususnya yang sensitif terhadap panas (seperti serum, media yang mengandung protein atau zat-zat labil lainnya). Jika penelitian membutuhkan filtrat bebas bakteri, dapat diperoleh melalui membran filter dengan ukuran pori 0,45 mikron. Sedangkan jika penelitian memerlukan larutan virus yang bebas dari partikel, maka digunakan membran filter dengan ukuran pori sebesar 0,22 mikron. Dahulu, filter serap yang terbuat dari asbes atau tanah diatom telah digantikan oleh porselen tanpa lapisan atau kaca sinter. Saat ini, filter tersebut telah digantikan oleh membran nitroselulosa dengan porositas yang bervariasi, polivinilidena fluorida (PVDF), dan jenis filter lainnya (Tóth *et al.*, 2013).

Filter membran yang terbuat dari polivinil alkohol (PVA), ester selulosa, pelat polisulfon atau nilon, dilapisi dengan resin melamin tahan panas, dengan ukuran pori efektif 20-30 μm , memberikan efisiensi yang sangat baik dengan ketebalan hanya 2-3 mm (Berovic, 2005). Dalam filter tersebut, semua pori-pori di membran memiliki ukuran relatif sama dan cukup kecil untuk mencegah penetrasi bakteri.



Gambar 10. 2. Sterilisasi filter menggunakan syringe ; (1) larutan vitamin (2) saringan filter (3) hasil larutan yang telah disterilkan (Tóth *et al.*, 2013).

10.2.4. Sterilisasi Kimia

Metode sterilisasi kimia melibatkan proses desinfeksi alat atau instrumen melalui perendaman dalam larutan desinfektan. Pentingnya pelaksanaan proses sterilisasi sangat besar, terutama di lingkungan rumah sakit, sebagai tindakan preventif untuk menghindari infeksi nosokomial. Keberhasilan upaya ini akan dipengaruhi oleh tingkat kebersihan dan jumlah mikroorganisme yang ada pada bahan, alat, dan lingkungan kerja. Beberapa desinfektan tingkat tinggi dapat menghancurkan endospora setelah terpapar dalam kurun waktu yang cukup lama yaitu antara 10 hingga 24 jam. Disinfektan umum yang bisa digunakan untuk sterilisasi kimia diantaranya glutaraldehid dan formaldehida. Proses sterilisasi dilakukan dengan merendam bahan selama setidaknya 10 jam dalam larutan glutaraldehid dengan konsentrasi 2-4% atau setidaknya 24 jam dalam

formaldehida dengan konsentrasi 8%. Glutaraldehida, seperti Cidex®, sering kali persediaannya sedikit dengan harga yang sangat mahal. Meskipun demikian, glutaraldehid adalah satu-satunya bahan sterilisasi yang praktis untuk beberapa instrumen seperti laparoskop yang tidak dapat dipanaskan. Antara glutaraldehid maupun formaldehida memerlukan penanganan khusus dan dapat meninggalkan residu pada instrumen yang disterilkan. Oleh karena itu, membilasnya dengan air steril menjadi sangat penting jika barang tersebut harus tetap steril. Tanpa pembilasan, residu ini dapat menyebabkan bagian laparoskop menjadi lengket dan mengaburkan lensa (Linda *et al.*, 2013).

Glutaraldehid, hidrogen peroksida, orto-ftalaldehida, asam perasetat dengan hidrogen peroksida, merupakan disinfektan tingkat tinggi yang dapat diandalkan (Rutala & Weber, 2013). Penting untuk diperhatikan, bahwa sebagian besar disinfektan berdampak negatif pada bahan organik, yang harus dicuci terlebih dahulu jika akan digunakan (Korsman, 2012).

10.3 Biopsida (*Biopsy*)

Biopsy, berasal dari kata Yunani (*bio-kehidupan; opsia-penglihatan*) yang secara umum diterjemahkan sebagai "visi kehidupan" (Ali *et al.*, 2012). Biopsi didefinisikan sebagai pengambilan jaringan dari organisme hidup untuk tujuan pemeriksaan mikroskopis dan diagnosis. Istilah "Biopsi" diperkenalkan dalam bahasa medis pada tahun 1879 oleh Ernest Besnier (Kumaraswamy *et al.*, 2012). Biopsi dilakukan dengan tujuan untuk memastikan diagnosis klinis dan radiografi, untuk merencanakan prosedur bedah, serta untuk menentukan pengangkatan lesi secara menyeluruh (Shetty & Britto, 2017). Jaringan patologis diambil bersama dengan jaringan sehat di sekitarnya. Tindakan yang dapat merusak jaringan hasil biopsi

sebaiknya dihindari karena jaringan kering dapat mengganggu pemeriksaan. Oleh sebab itu, jaringan harus segera difiksasi.

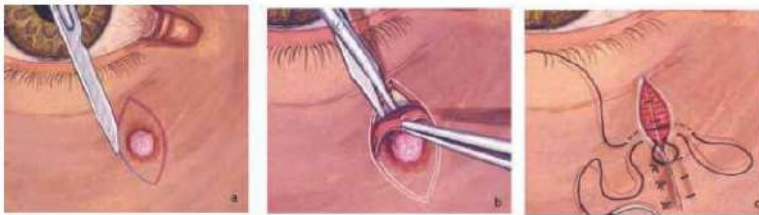
Instrumen medis seperti sarung tangan bedah, jarum suntik serta barang-barang lain yang bersentuhan langsung dengan darah atau jaringan seharusnya steril dan perlu melewati proses sterilisasi. Dalam praktik saat ini, biopsi Jaringan mengacu pada prosedur medis yang melibatkan pengambilan sampel jaringan melalui jarum atau pembedahan seperti insisi atau eksisi, tergantung sebagian besar jaringan yang diambil untuk dilakukan pemeriksaan di bawah mikroskop.

10.3.1 Biopsi Insisi

Pemotongan sampel jaringan menggunakan pisau bedah dengan cara melakukan sayatan pada kulit hingga menemukan massa, kemudian diambil sedikit untuk diperiksa. Metode ini dapat diterapkan pada lesi yang besar dan secara patologis mencapai kedalaman hingga ke dermis bawah atau subkutis. Prinsip dari teknik ini adalah mengambil seluruh lesi atau sebagian yang berbatasan dengan kulit normal (Sitorus & Julianto, 2018). Biopsi insisi memberikan sampel jaringan yang representatif untuk tujuan diagnostik. Teknik yang digunakan untuk biopsi insisi biasanya sederhana dengan cara membuat sayatan berbentuk elips, dengan perbandingan panjang dan lebar 3:1, dibuat dengan pisau bedah berukuran 15. Sayatan dibuat dibagian bawah (inferior), ini dilakukan agar perdarahan tidak menyulitkan proses bedah. Ujung elips dibagian depan (anterior) diangkat dengan hati-hati menggunakan tang jaringan, dan bagian bawahnya dipotong (Oliver *et al.*, 2004). Perdarahan dihentikan dengan menjahit bagian dalam kulit menggunakan benang yang diserap (absorbable), dan penutupan luka dijahit dengan benang yang tidak diserap (non-absorbable) (Sitorus & Julianto, 2018).

10.3.2 Biopsi Eksisi

Biopsi eksisi melibatkan pengangkatan seluruh lesi dengan tujuan fungsional dan estetika, serta untuk memastikan diagnosis klinis. Metode ini juga dikenal dengan sebutan eksisi elips yang mencapai lapisan jaringan lemak subkutan (Sitorus & Julianto, 2018). Tindakan ini disarankan hanya untuk lesi yang terbukti jinak. Faktor-faktor seperti ukuran, aksesibilitas dan anatomi daerah dari lesi harus dipertimbangkan. Lesi kecil, yang memiliki tangkai, atau yang tumbuh ke arah luar pada area yang mudah dijangkau adalah kandidat ideal untuk biopsi eksisi (Shetty & Britto, 2017). Untuk lesi yang dicurigai sebagai kanker, terutama melanoma maligna, direkomendasikan untuk mengambil seluruh lesi untuk pemeriksaan histopatologis guna memastikan diagnosis dan menentukan derajat keganasan. Perhatikan Gambar 10.3. dimana terlihat elips yang ditarik di sekeliling lesi dengan ujung miring menuju pusat lesi. Hal ini menghasilkan spesimen berbentuk kuku yang paling dalam di bawah pusat lesi dan menyisakan luka yang dapat ditutup dengan mudah (Avon & Klieb, 2012; Oliver *et al.*, 2004).



Gambar 10. 3. Metode biopsi eksisi. (a). sayatan dibuat pada sepanjang garis yang ditandai. (b). Mengisolasi lesi dari jaringan sekitarnya. (c). menjahit luka pada area bekas lesi (Sitorus & Julianto, 2018).

10.3.3 Biopsi Plong (*Punch*)

Tahun 1887 EL Keyes, pertama kali memperkenalkan biopsi *Punch*. *Punch* adalah alat pemotong berbentuk silinder dengan diameter yang bervariasi antara 1,5 – 10 mm. Sebagian besar

biopsi dilakukan dengan menggunakan *punch* berdiameter 3 mm. Untuk biopsi pada wajah, ukurannya biasanya tidak melebihi 5 hingga 6 mm, sedangkan untuk tubuh, tidak lebih besar dari 8 hingga 10 mm. Sementara untuk folikel rambut pada bagian kepala ukurannya sekitar 6 mm (Wardhani, 2017). Biopsi *punch* biasanya digunakan sebagai alternatif biopsi sayatan untuk lesi kecil di lokasi yang dapat diakses. Teknik ini biasanya digunakan oleh dokter kulit untuk mengambil sampel ruam kulit dan massa kecil (Gambar 10.4). Biopsi *punch* mudah dilakukan, memiliki sedikit komplikasi, dan jika berukuran kecil, dapat sembuh tanpa perlu dilakukan penjahitan.



Gambar 10. 4. Alat punch diarahkan secara vertikal terhadap permukaan kulit, kemudian pisau punch didorong ke arah berlawanan dengan kulit sambil pisau diputar (Sitorus & Julianto, 2018)

10.3.4 Biopsi Kuretase

Penggunaan kuret bundar dalam melakukan biopsi kulit adalah untuk lesi kecil. Kuret memiliki diameter sekitar 3,5 mm sehingga hasil biopsi berupa fragmen kecil (Wardhani, 2017). Prosesnya melibatkan mengikis lesi menggunakan kuret. Metode ini efektif untuk mengangkat kanker kulit non-melanositik. Terdapat dua jenis kuret yang umum digunakan, yaitu kuret tipe Volkman dan kuret berbentuk cincin yang tajam (Sitorus & Julianto, 2018).

10.3.5 Biopsi Sikat (*Brush*)

Biopsi *Brush* digunakan untuk mengumpulkan sel dari semua lapisan epitel melalui tekanan kuat dengan gerakan rotasi. Sikat atau bulu (*bristle*) digunakan untuk mengambil jaringan dengan tujuan mengumpulkan sel-sel untuk pemeriksaan sitologi. Pendarahan tepat menunjukkan kedalaman pengumpulan sel yang cukup. Sampel kemudian dipindahkan ke kaca objek dan dikirim ke laboratorium untuk dianalisis (Avon & Klieb, 2012). Teknik ini menunjukkan penyebaran sel yang lebih baik pada slide objektif dibandingkan dengan apusan. Biopsi *Brush* untuk skrining massal terhadap dugaan pra-keganasan dan keganasan (Singh et al., 2016).

10.3.6 Biopsi *Snip*

Metode ini efektif untuk mengatasi lesi yang memiliki tangkai (*pedunculated*), di mana lesi ditarik dari dasarnya dan kemudian dipotong. Penggunaan gunting *Gradle* adalah umum dalam teknik ini. Penting untuk tidak menarik lesi terlalu keras dengan forsep agar tidak merusak kulit secara berlebihan. Untuk menghentikan perdarahan dalam metode ini, cukup dengan menekan lesi. Namun, jika terdapat lesi yang lebih besar atau melibatkan pembuluh darah, maka cairan hemostasis kimiawi atau teknik bedah listrik dapat digunakan sebagai alternatif (Sitorus & Julianto, 2018).

DAFTAR PUSTAKA

- Ağçam, E., Akyildiz, A., & Dündar, B. (2018). Chapter 17: Thermal Pasteurization and Microbial Inactivation of Fruit Juices. In G. Rajauria & B. K. Tiwari (Eds.), *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis* (pp. 309–339). Elsevier Inc. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2014-0-02764-5>
- Ali, F. M., Patil, A., Ahire, V., Patil, K., Deshpande, R., Prasant, M., & Tahasildar, S. (2012). Oral Biopsy in General Dental Practice: A Review. *International Journal of Medicine and Public Health*, 2(1), 3–6. <https://doi.org/10.4103/2230-8598.108397>
- Avon, S.-L., & Klieb, H. B. E. (2012). Oral Soft-Tissue Biopsy: An Overview. *Journal of the Canadian Dental Association*, 78, 1–9.
- Berovic, M. (2005). Sterilisation in Biotechnology. *Biotechnology Annual Review*, 11, 257–279. [https://doi.org/10.1016/S1387-2656\(05\)11008-4](https://doi.org/10.1016/S1387-2656(05)11008-4)
- Jawetz, E. (1987). *Review Of Medical Microbiology* (Seventh Ed, Vol. 7, Issue 3). Lange Medical Publications.
- Kaminski, A., Izabela Uhrynowska-Tyszkiewicz, & Stachowicz, W. (2021). Sterilisation by Irradiation Artur. In G. Galea, M. Turner, & S. Zahra (Eds.), *Essentials of Tissue and Cells Banking* (Second Edi, pp. 1–288). Springer i. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71621-9>
- Korsman, S. N. J. (2012). Disinfection and Sterilisation. *Virology*, 32–33.
- Kumar, A., Murthy, L. N., Jeyakumari, A., & Laly, S. S. J. (2019). Sterilization Technique Used In Microbiology. In *Training Manual on Microbiological Examination of Seafood Pathogens*. Mumbai Research Center of Central Institute of Fisheries Technology.

- Kumaraswamy, K. L., Vidhya, M., Rao, P. K., & Mukunda, A. (2012). Oral biopsy: Oral pathologist's perspective. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 8(2), 192–198. <https://doi.org/10.4103/0973-1482.98969>
- Linda, T., Débora, B., & McIntosh, N. (2013). Infection Prevention Guidelines for Healthcare Facilities with Limited Resources. In *Jhpiego* (Vol. 372, Issue 9642). JHPIEGO Corporation.
- Oliver, R. J., Sloan, P., & Pemberton, M. N. (2004). Oral Biopsies: Methods and Applications. *British Dental Journal*, 196(6), 329–333. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4811075>
- Ptiwari, R., Hoondal, S., & Tewari, R. (2009). *Laboratory Techniques in Microbiology and Biotechnology*. Departments of Microbiology and Biotechnology, Panjab University.
- Rutala, W. A., & Weber, D. J. (2013). Disinfection and Sterilization: An Overview. *American Journal of Infection Control*, 41, S2–S5. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2012.11.005>
- Shetty, V. R., & Britto, F. P. (2017). Biopsy-An Overview. *World Journal of Pharmaceutical and Life Sciences*, 3(10), 37–39.
- Singh, H., Charaya, N., Poonia, M., Kaur Sidhu, S., & Singh Sihmar, S. (2016). Biopsy-A Vision of Life. *International Journal of Contemporary Medical Research*, 3(6), 1734–1737. www.ijcmr.com
- Sitorus, E. P., & Julianto, I. (2018). Teknik – Teknik Biopsi Kulit. *Cermin Dunia Kedokteran*, 45(6), 466–471.
- Tóth, E. M., Borsodi, A. K., Felföldi, T., Vajna, B., Sipos, R., & Márialigeti, K. (2013). *Practical Microbiology : Based on The Hungarian Practical Notes Entitled " Mikrobiológiai Laboratórium Gyakorlatok "*. Department of Microbiology, Institute of Biology, Faculty of Science, Eötvös Loránd University.
- Wardhani, S. R. (2017). Biopsi Dalam Bidang Dermatologi. *Jounal Kristen Maranatha*, 5(2), 14–23.

Watts, S. (2016). A Mini Review on Technique of Milk Pasteurization. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 5(5), 99–101.

BAB 11

PEMERIKSAAN BAKTERI

Oleh Rochmanah Suhartati

Pemeriksaan bakteri biasanya dilakukan untuk mengetahui keberadaan bakteri dalam suatu objek. Misalnya pada bidang kesehatan, pemeriksaan bakteri digunakan dalam menegakkan diagnosis suatu penyakit melalui pemeriksaan laboratorium. Pemeriksaan Bakteri merupakan proses penting dalam ilmu mikrobiologi untuk mengidentifikasi dan menganalisis jenis bakteri pada suatu sampel atau bahan.

Pemeriksaan bakteri di laboratorium meliputi tahapan pra analitik, analitik dan post analitik. Pra analitik yaitu persiapan sampel, persiapan alat dan bahan, transportasi sampel. Analitik yaitu melakukan berbagai jenis pemeriksaan sesuai dengan keperluan/kebutuhan. Jenis -jenis pemeriksaan bakteri dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Pemeriksaan Morfologi dan Struktur bakteri
 - a. Pewarnaan sederhana
 - b. Pewarnaan Diferensial
 - 1) Pewarnaan Gram
 - 2) Pewarnaan Basil Tahan Asam (BTA)
 - 3) Pewarnaan Spora
 - c. Pewarnaan Khusus
 - 1) Pewarnaan Kapsul
 - 2) Pewarnaan Granula
 - 3) Pewarnaan Falgel
2. Pemeriksaan Gerak/Motilitas bakteri
 - 1) Tetes Tegak dan Tetes gantung
 - 2) Pertumbuhan Media Semisolid

3. Pemeriksaan Kultur
4. Pemeriksaan Biokimia
5. Pemeriksaan Serologi
6. Pemeriksaan Uji Sensitivitas Antibiotik
7. Pemeriksaan Molekuler

11.1 Pemeriksaan Morfologi dan Struktur Bakteri

Tiga jenis pewarnaan bakteri untuk mengamati morfologi dan struktur bakteri menggunakan zat warna yang bersifat asam atau basa yang dapat mewarnai sel bakteri melalui Teknik pewarnaan sederhana, pewarnaan differensial dan pewarnaan khusus.

1. Pewarnaan sederhana

Merupakan pewarnaan bakteri yang hanya menggunakan satu jenis zat warna saja contoh: Methylen blue, Carbol Fuchsin, Kristal Violet, Safranin. Pewarnaan ini dipergunakan untuk melihat bentuk sel bakteri. Pewarnaan sederhana hanya memperlihatkan morfologi sel bakteri saja. Adapun beberapa jenis zat warna yang dapat digunakan untuk pewarnaan ini adalah carbol fuchsin (merah, methylen blue (biru), safranin (merah), fuchsin (merah), kristal violet (ungu). Warna bakteri akan terlihat sesuai dengan warna zat yang digunakan (Didimus T. Boleng, 2015).

a. Prinsip Pewarnaan Sederhana

Mewarnai sel bakteri menggunakan zat warna yang memiliki sifat basa atau alkali. Sifat basa memiliki ion positif akan mudah bereaksi/berikatan dengan dinding sel bakteri yang memiliki muatan negatif.

b. Tujuan

Untuk melihat bentuk morfologi dan konfigurasi sel bakteri. Komposisi zat warna untuk pewarnaan sederhana dapat menggunakan zat sebagai berikut :

- 1) Methylen Blue (methylen blue 1 gram, potassium hidroksida 10% etanol 96% 100 mL).
- 2) Kristal Violet (kristal violet 2 gram, etil alkohol 95% 20 mL, ammonium oxalat 0,8 gram, akuades steril 100 mL)
- 3) Carbol Fuchsin (Fuchsin 0,3 gram, etanol 95% 10 mL, Fenol 5 mL, akuades steril 85 mL).

Aplikasi pewarnaan sederhana sebagai alternatif dapat menggunakan zat warna yang berasal tumbuhan seperti ekstrak methanol bunga Rosella namun metode pewarnaan sederhana pada bakteri *Staphylococcus aureus* memiliki kelemahan yaitu nilai akurasi dan presisi dibawah standar. Hasil penelitiannya menunjukan pewarnaan sederhana bakteri *Escherichia coli* memiliki nilai akurasi memenuhi standar pada konsentrasi 50% dan 75% dan nilai presisi yang tidak memenuhi standar pada semua konsentrasi, maka metode pewarnaan sederhana menggunakan ekstrak metanol bunga Rosella (*Hibiscus sabdariffa* L) memiliki validitas dibawah standar dan tidak dapat menggantikan methylen blue (Saputra, Bintari and Risandiansyah, 2022).

Interpretasi hasil pewarnaan sederhana:

- 1) Methylen blue (sel bakteri: biru)
- 2) Kristal violet (sel bakteri: ungu)
- 3) Carbol fuchsin (sel bakteri : merah)

2. Pewarnaan Diferensial

Pewarnaan diferensial merupakan pewarnaan dengan menggunakan lebih dari satu jenis zat warna. Pewarnaan ini dilakukan untuk membedakan tipe sel bakteri atau bagian-bagian sel lainnya. Zat kimia sebagai pewarna yang digunakan biasanya lebih dari satu jenis dan memiliki fungsi untuk membedakan sifat-sifat

bakteri. Pewarnaan diferensial dapat terbagi menjadi tiga yaitu:

a. Pewarnaan Gram

Pewarnaan ini ditemukan oleh Hans Cristian Gram pada tahun 1884. Nama pewarnaan ini sesuai dengan nama dari nama penemunya.

1) Prinsip pewarnaan gram

Membedakan bakteri berdasarkan perbedaan komposisi kandungan peptidoglikan pada dinding sel bakteri. Bakteri gram positif mengandung lapisan peptidoglikan yang sangat tebal sedangkan bakteri gram negatif memiliki kandungan peptidoglikan yang rendah (tipis). Zat warna kristal violet akan mewarnai sel bakteri dan lugol sebagai pemordan dapat memperkuat ikatan kristal violet-Iod sehingga warna ungu terikat kuat dan kontras. Melalui penambahan alkohol 96% dinding sel bakteri gram positif dengan kandungan peptidoglikan yang tebal dapat mempertahankan warna kristal violet karena sel terdehidrasi sehingga warna ungu kristal violet tetap berada di dalam sel bakteri gram positif, sedangkan dinding sel bakteri gram negatif dengan lapisan peptidoglikan yang tipis, sel akan terekstraksi yang menyebabkan zat warna kristal violet luntur, maka bakteri gram negatif kehilangan zat warna dan menjadi transparan. Selanjutnya penambahan zat warna pembanding Safranin akan mewarnai bakteri gram negatif menjadi merah (Dwidjoseputro, 2005).

2) Tujuan

Untuk membedakan bakteri menurut sifat dan golongan gram positif dan gram negatif berdasarkan struktur dinding selnya.

3) Prinsip Pewarnaan

Pewarnaan gram tergantung dari reaksi dinding sel terhadap zat warna safranin atau kristal violet. Contoh dari bakteri gram positif ialah *Streptococcus pyogenes*, *Clostridium sp*, *Bacillus sp*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, sedangkan bakteri gram negatif misalnya *Salmonella typhi*, *Klebsiella*, *Escherichia coli* dan beberapa bakteri tidak terwarnai dengan pewarnaan gram, misalnya *Mycobacterium sp*.

Prinsip pewarnaan gram membedakan kemampuan dinding sel bakteri dalam menyerap zat warna dasar (kristal violet) setelah pencucian alkohol 96%. Bakteri Gram positif akan tampak berwarna ungu disebabkan dinding selnya mengikat kristal violet lebih kuat dibandingkan gram negative karena memiliki lapisan lipid yang tipis, sedangkan sel gram negatif mengandung lebih banyak lipid sehingga pori-pori mudah membesar dan kristal violet mudah larut saat pencucian alkohol (Fardiaz. S, 2002).

Pewarnaan gram bertujuan untuk membedakan bakteri apakah gram positif atau gram negatif. Dalam melakukan pewarnaan gram, bakteri dicampur dengan tetesan air steril pada gelas objek, kemudian dioleskan dibagian tengah gelas obyek sehingga membentuk lapisan tipis yang selanjutnya difiksasi. Teteskan kristal violet pada olesan bakteri

tersebut dan digenangi selama satu menit, lalu dicuci dengan air mengalir, dan dikeringkan. Teteskan yodium (lugol) selama satu menit, dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan. Selanjutnya diberi larutan pemucat yaitu alkohol 95%, tetes demi tetes sampai zat warna ungu tidak terlihat lagi, lalu dicuci pada air mengalir dan dikering anginkan. Kemudian digenangi lagi dengan safranin selama 30 detik, lalu dicuci dan dibiarkan kering di udara. Warna merah pada olesan bakteri menunjukkan bakteri gram negatif dan jika warna ungu menunjukkan bakteri gram positif.

Pewarnaan gram dapat digunakan dalam taksonomi mikroba. Pekerjaan ini dapat dilakukan untuk memisahkan anggota-anggota bakteri ke dalam dua kelompok berdasarkan perbedaan dinding selnya. Bakteri gram positif memiliki dinding sel yang lebih sederhana, dengan jumlah peptidoglikan yang relatif banyak. Dinding sel bakteri gram-negatif memiliki peptidoglikan yang lebih sedikit dan secara struktural lebih kompleks. Bagian luar sel pada dinding bakteri gram negatif mengandung lipopolisakarida, yaitu karbohidrat yang terikat dengan lipid (Smith and Hussey, 2020). Bakteri Gram Positif adalah bakteri yang memiliki dinding sel dengan lapisan peptidoglikan yang tebal. Bakteri ini akan berwarna ungu jika diwarnai dengan pewarnaan Gram. Contohnya : *Bacillus subtilis* Sedangkan Bakteri gram Negatif adalah bakteri yang memiliki dinding sel dengan lapisan peptidoglikan yang tipis. Bakteri ini akan berwarna merah muda atau merah, jika diwarnai dengan pewarnaan gram. Contohnya: *Escherichia coli*.

Tahapan persiapan pewarnaan yaitu sampel suspensi bakteri di siapkan di dalam tabung reaksi. Kaca objek disterilisasi dengan cara dicuci, lalu dimasukkan kedalam larutan desinfektan, kemudian dimasukkan kedalam larutan alkohol 70%. Setelah kaca objek dilakukan sterilisasi, di lap menggunakan kapas sampai mengeluarkan suara berdecit. Lingkari bagian bawah kaca objek dengan spidol sebagai area untuk pengolesan sampel bakteri. Ose difiksasi dengan cara dibakar dengan pembakar spirtus sampai ose berpijar. Ose didinginkan dengan cara didekatkan dengan pembakar spirtus. Olesan bakteri dibuat dari suspensi bakteri di atas kaca obyek yang bersih dan bebas lemak dengan menggunakan ose yang sudah difiksasi. Setelah pengolesan, kaca objek dilewatkan di atas api pembakar spirtus sampai sampel di atas kaca objek berubah warna menjadi pucat (keputih-putihan). Kemudian letakkan kaca objek di atas bak warna, genangi olesan tersebut dengan pewarna karbol gentian violet selama 1 menit, buang zat warna yang berlebih, lalu dibilas dengan air suling. Genangi olesan dengan lugol selama 2 menit, buang lugol yang berlebih lalu bilas dengan air suling. Cuci olesan dengan pemucat alkohol 95% tetes demi tetes selama 30 detik atau sampai zat warna larut, lalu bilas dengan air suling. Genangi olesan dengan pewarna pembanding fuchsin selama 30 detik, buang warna yang berlebih, bilas dengan air suling lalu keringkan dengan kertas saring. Teteskan sedikit minyak emersi pada gelas objek, lalu diperiksa dibawah mikroskop dengan pembesaran 10X dan 100X (J Vandepitte et al, 2003).

b. Pewarnaan Basil Tahan Asam (BTA)

Pewarnaan basil tahan asam digunakan untuk memeriksa bakteri melalui metode pewarnaan Zeihl Nelssen. Pewarnaan ini merupakan pewarnaan diferensial yang dapat mengidentifikasi bakteri tahan asam seperti *Mycobacterium sp.* Bakteri tahan asam memiliki ciri organisme yaitu dinding sel tebal dilapisi oleh lapisan lilin yang tahan asam yang mengandung asam mikolat, asam lemak, lilin dan lipid yang kompleks. Dinding sel ini tahan terhadap senyawa senyawa kimia sehingga memerlukan pewarnaan khusus dengan perlakuan pemanasan.

Genus utama *Mycobacterium*, memiliki konsentrasi asam mikolat, suatu lipid, yang tinggi di dinding selnya. Meskipun sulit untuk diwarnai, begitu zat warna masuk ke dalam dinding sel, sel tidak akan mudah menghilangkan zat warna atau menghilangkan warna. Kemampuan bakteri untuk tahan terhadap dekolorisasi oleh asam-alkohol memberikan bakteri tahan asam mempertahankan warna dasar carbol fuchsin tidak luntur. Fenol dalam karbol fuchsin dapat meningkatkan penetrasi zat warna carbol fuchsin masuk ke dalam dinding lapisan lilin bakteri. Bakteri tahan asam memiliki hasil pewarnaan yang tidak kontras pada prosedur pewarnaan gram, tampak hasil pewarnaan lemah pada gram-positif atau gram-variabel. Bakteri tersebut harus dikarakterisasikan menggunakan prosedur pewarnaan tahan asam. karena dinding selnya mengandung banyak lipid, sehingga digunakan pewarnaan tahan asam (BTA) (Hussey, Marise; Zayaitz, 2008).

Pemanasan sampai keluar uap pada metoda ini digunakan untuk memasukkan zat warna utama yaitu karbol fuchsin ke dinding sel. Sekali masuk, ia tidak akan keluar: Namun penghilang warna asam-alkohol akan mengeluarkannya dari dinding sel yang tidak cepat asam karena pewarna primer tidak mengikat kuat pada dinding sel. Bakteri tidak tahan asam juga akan menyerap warna karbol fuchsin, namun pencucian dengan asam alkohol akan menghilangkannya zat warna carbol fuhsin karena tidak terikat kuat pada dinding sel. Setelah pencucian air maka bakteri tidak tahan asam akan menyerap zat warna pembanding metylen blue. Hasil pewarnaan metoda zeihl nelssen bakteri tahan asam berwarna merah dan bakteri tidak tahan asam berwarna biru. Contoh Bakteri Tahan Asam (BTA) adalah genus *Mycobacterium* dan *Nocardia* (tahan asam lemah). Karena sifatnya ini, pewarnaan ini sangat membantu dalam identifikasi penyakit yang disebabkan oleh bakteri tahan asam, khususnya tuberkulosis dan kusta. Selain itu, pewarnaan digunakan untuk mengetahui keberadaan bakteri tahan asam dari jaringan paru-paru pada pasien yang menjalani terapi antibiotik.

Tahapan persiapan pewarnaan diawali dengan pembuatan preparat olesan sampel membentuk oval dengan ukuran panjang dan lebar 2 x 3 cm, kemudian dikeringkan dan difiksasi dengan dilewatkan pada ujung lidah api Bunsen sampai tampak noda putih pada kaca objek. Kemudian teteskan *carbol fuchsin* diatas noda olesan tersebut sampai menutupi seluruh permukaan sampel pada kaca objek, dilanjutkan dengan pemanasan sampai uap keluar dan dinginkan selama 5 menit. Buang *carbol fuchsin*

yang melekat pada kaca objek, cuci air dan cuci dengan laturan asam alkohol sampai warna carbol fuchsin hilang atau memudar, cuci dengan air kemudian teteskan methylen blue pada permukaan noda biarkan selama 1 menit, cuci dengan air dan keringkan objek glass. Periksa secara mikroskopis dengan perbesaran 1000x ditambah minyak imersi maka bakteri tahan asam akan tampak berwarna merah sedangkan bakteri tidak tahan asam akan tampak berwarna biru(Tortora, G. J.; Funke, B. R.; Case, 2018).

c. Pewarnaan Spora

Endospora merupakan karakteristik yang sangat penting dari beberapa bakteri, bentuk spora digunakan bakteri untuk mempertahankan sel dalam kondisi lingkungan yang merugikan seperti pengeringan, paparan bahan kimia, panas yang ekstrim, dll. Endospora bakteri merupakan struktur yang paling resisten di antara semua organisme hidup, dan mereka dapat hidup dalam kondisi dehidrasi yang tidak aktif selama ratusan dan ratusan tahun Endospora bukan untuk reproduksi, satu spora terbentuk di dalam sel vegetatif. ketika spora berkecambah, akan dihasilkan satu sel vegetatif. rangsangan untuk terjadinya sporulasi dapat bervariasi antara lain kekurangan nutrisi, pengeringan, bahan kimia, panas, dll. Saat spora terbentuk di dalam sel vegetatif, dinding spora berubah secara kimia dan menebal. proses sporulasi ini mengubah kemampuan pewarnaan bagian spora bakteri semakin tahan terhadap zat-zat pewarna, melalui pemanasan uap akan meningkatkan penetrasi zat warna pewarna ke dalam dinding sel spora(Hussey, 2013).

Pewarnaan Spora dapat dilakukan dengan metoda Klein, Scaniaeffer Fulton dan Wirtz. Paling sering digunakan adalah metoda Klein. Pada metoda Klein endospore akan terwarnai oleh zat warna utama *carbol fuchsin* berwarna merah sedangkan sel vegetatif akan terwarnai oleh zat warna pembanding metylen blue. Letak spora pada sel vegetative dapat dibedakan menjadi tiga yaitu :

- Spora sentral yaitu spora yang terletak pada bagian tengah sel bakteri.
- Spora terminal yaitu spora yang terletak pada bagian ujung sel bakteri.
- Spora subterminal adalah spora yang terletak pada tengah dan ujung tengah sel bakteri.

Prinsip pewarnaan spora yaitu pemanasan akan mengembangkan atau membuka lapisan terluar sehingga zat warna carbol fuchsin mudah masuk kedalam spora sehingga berwarna merah. Melalui pendinginan zat warna carbol fuchsin akan tetap berada dalam spora, perlakuan pencucian dengan asam alkohol. dapat melepaskan zat warna carbol fuchsin pada bagian sel vegetatif sehingga menjadi transparan maka dengan penambahan zat warna pembanding metylen blue akan mewarnai bagian sel bakteri. Metoda yang digunakan adalah Klein.

Prosedur pewarnaan spora dapat dilakukan dengan membuat suspensi bakteri dan tambahkan carbol fuchsin perbandingan 1:1 panaskan dalam waterbath pada suhu 80°C selama 10 menit, suspensi tersebut dibuat sediaan diatas objek glass. Teteskan asam sulfat 1% selama 2 detik, cuci dengan air

mengalir, teteskan methylen blue selama 1 menit, cuci dengan air dan keringkan dengan dikeringkan atau dapat menggunakan kertas serap untuk menyerap air pada permukaan. Amati dibawah mikroskop perbesaran 1000x dengan minyak imersi. Hasil pewarnaan spora akan tampak berwarna merah dan sel bakteri berwarna biru (J Vandepitte et al, 2003).

3. Pewarnaan Khusus

a. Pewarnaan Kapsul

Banyak bakteri pathogen baik gram positif maupun gram negatif memiliki dinding sel dilapisi oleh lapisan yang dikenal sebagai Kapsul. Lapisan terdiri dari polisakarida, bahan yang tersusun kapsul dapat berupa lapisan glikokalik dan air, beberapa spesies mengandung polypeptide atau protein. Bagian kapsul tidak mampu menyerap zat warna atau tinta cina. Dalam klinik beberapa kasus pathogen terhadap manusia ditemukan banyak serotype bakteri yang telah teridentifikasi memiliki kapsul diantaranya adalah bakteri *Escherichia coli*, *Streptococcus pneumonia* dan *Klebsiella pneumonia*.

Prinsip pewarnaan kapsul pewarna dasar berinteraksi dengan ion negatif pada sel bakteri dan pewarna asam akan mewarnai latar belakang sel bakteri setelah pewarnaan selesai, kapsul terlihat bening membentuk halo sekitar dinding sel bakteri diantara latar belakang dan sel akan berwarna sesuai dengan zat warna yang digunakan prinsip ini digunakan pada metoda Anthonie. Metoda lain yang digunakan untuk pewarnaan kapsul adalah burry gins.

Salah satu prosedur pemeriksaan spora dapat dilakukan dengan metoda Anthonie dilakukan persiapan dan prosedur yaitu dengan menyiapkan olesan sampel pada kaca objek dari kultur media cair kaldu susu biarkan kering (jangan memanaskan olesan untuk menghindari kerusakan kapsul, karena dengan pemanasan kapsul akan rusak, tutupi olesan dengan zat warna kristal violet 1% selama 2 menit, bilas perlahan dengan larutan tembaga sulfat 20%, keringkan preparat di udara (jangan menghapus untuk mengeringkan atau membersihkan), lakukan pemeriksaan dibawah mikroskop perbesaran 1000x dengan minyak imersi, bakteri akan tampak berwarna keunguan sedangkan kapsul terlihat zona bening (halo) disekitar dinding sel bakteri (Roxana B and Ann C, 2013).

4. Pewarnaan Granula

Granula metakromatik merupakan granula volutin yang mengandung polifosfat, asam ribonukleat, dan protein. Bakteri memiliki granula metakromatik memiliki fungsi sebagai sumber cadangan energi. Bakteri yang memiliki granula metakromatik sering ditemukan pada beberapa pathogen tertentu yang memiliki bentuk khas batang dengan granula seperti *Corynebacterium diphteri* yaitu dalam sitoplasma sel bakteri memiliki granula pada kedua ujung sel nya, berbentuk khas seperti barbel. Ada tiga metoda pewarnaan granula yaitu pewarnaan Loeffler, Albert dan Neisser. Paling sering digunakan adalah metoda Albert dan Neisser. Cara pewarnaan granula metoda Albert Pertama, buatlah sediaan. Kemudian sediaan ditetaskan Zat Warna Albert dan biarkanlah selama 3-5 menit. Selanjutnya dicuci sediaan dengan air mengalir, letakkanlah sediaan dalam posisi vertikal, dan

keringkan dengan cara diangin-anginkan, pada cara ini tidak terdapat penggunaan lugol seperti pada cara pewarnaan Albert yang sebelumnya. Komposisi zat Warna Albert terdiri dari toluidine blue 0,15 g, malachite green 0,20 g, glacial acetic acid 1 ml, etanol 96% 2 ml, dan akuades 100 ml. Hasil pewarnaan Albert contohnya adalah bakteri *Corynebacterium diphtheriae* berbentuk batang kurus dan berwarna hijau. Granula metakromatik akan berwarna hijau-hitam. Formasi bakteri tersebut seperti jajaran huruf V, ataupun huruf Cina.

Selain metode Albert dapat juga menggunakan cara pewarnaan Granula metode Neisser yaitu dengan Langkah buatlah sediaan bakteri diatas kaca objek, fiksasi sediaan, dan tunggu sampai dingin. Kemudian tuangkan Neisser AB pada sediaan dan biarkan selama 1 menit. Buang sisa Neisser AB dari kaca objek. Tuangkan Neisser C pada sediaan dan biarkan selama 1,5 menit. selanjutnya buang sisa Neisser C dari kaca objek, keringkan dengan kertas pengering. Amati di bawah mikroskop perbesaran 1000x dengan minyak imersi. Hasil Granula akan tampak bitnik bitnik berwarna biru kehitaman. Komposisi zat pewarnaan Neisser terdiri dari Neisser A mengandung biru metilen 0,1 g, alkohol 96% 2 ml, asam asetat pekat 5 ml, dan akuades 95 ml dan zat Warna Neisser B mengandung kristal violet 1 g, alkohol 96% 10 ml, dan akuades 300 ml, sedangkan zat warna Neisser C mengandung crysoidine 2 g dan akuades (panas) 300 ml (Chylen Setiyo, Rini, 2020).

5. Pewarnaan Flagel

Struktur pada bagian flagel bakteri tersusun oleh protein yang disebut flagelin, bagian ini tidak bercabang, berukuran panjang (5-16 μm) dan sangat kecil (tipis), diameter flagel antara 12-30 nm. Ukuran yang sangat tipis

menyebabkan flagel tidak bisa diamati dengan jelas menggunakan mikroskop cahaya biasa. Flagel hanya tampak jelas jika diperiksa menggunakan mikroskop fase kontras. Namun jika dalam laboratorium hanya memiliki mikroskop cahaya, maka untuk mengamati struktur flagel dengan jelas perlu dilakukan pewarnaan terlebih dahulu dengan mengaplikasikan zat warna. Pewarnaan yang biasa digunakan untuk mewarnai flagel adalah metode pewarnaan gray (Mellies, 2013).

Pewarnaan flagel menggunakan zat pewarna khusus. Komposisi terdiri dari kristal violet, tannic acid, aluminum potassium phosphate dan fenol. Kristal violet berfungsi sebagai zat warna utama untuk mewarnai flagel dan sel bakteri. Fenol atau Fenil Alkohol selama proses pewarnaan akan menguap sehingga menyebabkan zat warna kristal violet meresap disekitar flagel. Kristal violet yang meresap akan menyebabkan flagel nampak lebih jelas. Zat tannic acid dan aluminum potassium phosphate dapat berfungsi sebagai mordant yang dapat memperkuat ikatan zat warna dengan flagela. Fenol juga berfungsi sebagai zat anti jamur pada prosedur ini.

Metode pewarnaan flagel bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya struktur flagel pada dinding sel bakteri. Langkah ini menjadi salah satu bagian dari kegiatan identifikasi untuk menentukan jenis bakteri. Selain itu metode ini juga dapat digunakan untuk mengetahui tipe-tipe flagela bakteri.

11.2 Pemeriksaan Gerak/Motilitas bakteri

Pemeriksaan gerak bakteri dapat juga diamati secara mikroskopis dengan menggunakan metoda tetes tegak dan tetes gantung, pengamatan ini harus dilihat pergerakan bakteri

dibawah mikroskop. Pemeriksaan gerak bakteri dapat dilakukan dengan menggunakan media semi solid untuk melihat pergerakan bakteri yang memiliki flagel. Bakteri yang memiliki flagel dikultur secara tegak lurus pada media semi solid atau media Sulfur Indol Motility (SIM), setelah inkubasi pada suhu yang sesuai dapat diamati pertumbuhan bakteri. Bakteri yang memiliki flagel akan menunjukkan gerak positif dan dapat dilihat dengan ciri pertumbuhan bakteri yang menyebar menjauhi tusukan sedangkan bakteri yang tidak memiliki flagel akan menunjukkan gerak pasif, ditandai dengan pertumbuhan bakteri hanya pada sekitar tusukan dan tidak menyebar (Patricia Shields and Cathcart, 2011).

11.3 Pemeriksaan Kultur

Pemeriksaan kultur dari berbagai spesimen atau sampel berupa darah dapat menegaskan diagnosis penyebab bakteremia, demikian juga dengan kultur urine biasanya digunakan sebagai penegak diagnosis untuk penyakit infeksi saluran kemih. Pemeriksaan kultur bertujuan untuk mengisolasi dan identifikasi bakteri penyebab penyakit pada manusia, kultur juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi bakteri penyebab penyakit yang bersumber dari makanan (*foodborne disease*). Ada banyak cara untuk melakukan kultur dalam mengidentifikasi bakteri yaitu Kultur pada media cair, media padat, media semisolid. Teknik kultur dapat dilakukan inokulasi dengan cara cawan gores, cawan tuang dan cawan sebar. Bakteri yang telah di inokulasikan pada media yang tepat akan membentuk kekeruhan sebagai suspensi pada media cair, sedangkan pada media padat hasil pertumbuhan tampak koloni dengan karakteristik tertentu (Jawetz, 2013). Pertumbuhan koloni bakteri pada media selektif memiliki karakteristik khas sehingga mampu membedakan jenis bakteri yang satu dengan yang lainnya.

Pemeriksaan Bakteri melalui kultur dapat dilakukan dengan:

1. Kultur Darah untuk mendeteksi bakteriemia, darah dikultur pada media Blood Agar, Manitol Salt Agar, Agar Coklat.
2. Kultur urine untuk mendeteksi bakteri penyebab infeksi saluran kemih pada media Mac Conkey, Manitol Salt Agar.
3. Kultur BTA dilakukan pada bahan pemeriksaan sputum untuk menegaskan diagnosis Tuberkulosis yang disebabkan *Mycobacterium tuberculosis*. Medium yang digunakan adalah MGIT (Mycobacterium Growth Indicator Tube), Lowenstein Jensen.
4. Kultur Gaal dilakukan untuk pemeriksaan Bakteri penyebab deman typhoid yaitu *Salmonella typhi*.
5. Kultur Swab dilakukan dengan swab vagina, urethra atau mata untuk pemeriksaan *Neisseria gonorrhoeae*. Medium yang digunakan Agar Coklat, Agar Coklat Thayer Marthin.
6. Kultur Faeces dilakukan untuk mendeteksi bakteri penyebab penyakit saluran pencernaan seperti *Escherichia coli*, *Shigella dysenteriae*, *Vibrio cholera*. Medium yang digunakan untuk kultur seperti Mac Conkey Agar, Cystine Tellurit Broth, *Salmonella Shigella Agar*, Alkali Pepton, TCBS (Giuliano, Patel and Kale-Pradhan, 2019), (Tortora, G. J.; Funke, B. R.; Case, 2018).

Contoh hasil pemeriksaan bakteri hasil kultur adalah sebagai berikut :

Media cair Typticase Soya Broth hasil pemeriksaan positif pertumbuhan bakteri ditandai adanya kekeruhan.

Media Manitol Salt Agar (MSA) hasil pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus* menunjukkan koloni bulat, cembung diameter 2-4mm, warna media kuning bersifat mannitol fermenter sedangkan *Staphylococcus epidermidis* memiliki karakteristik yang sama namun warna koloni putih dan bersifat non manitol fermenter sehingga media dapat berubah menjadi merah.

Media Salmonella Shigella Agar hasil pertumbuhan bakteri Salmonella menunjukkan karakteristik koloni bulat, cembung diameter 2-4 mm, terdapat bintik hitam ditengah koloni.

11.4 Pemeriksaan Biokimia

Pemeriksaan uji biokimia dilakukan untuk melihat karakteristik bakteri melalui uji biokimia untuk membantu identifikasi bakteri melalui reaksi kimia. Uji Biokimia biasanya dilakukan terhadap bakteri gram positif dan gram negative untuk melihat kemampuan bakteri dalam memfermentasikan berbagai jenis karbohidrat seperti glukosa, laktosa, sukrosa, mannitol, katalase, oksidase dll (Saimin *et al.*, 2020), (Karah *et al.*, 2020) (Febrianti and Ningsih, 2023).

Pemeriksaan uji biokimia dapat dilakukan dengan uji:

- 1) Katalase
- 2) Oksidase
- 3) Fermentasi gula: Glukosa, laktosa, sukrosa, mannitol
- 4) TSIA (Triple Sugar Iron Agar)
- 5) SIM (Sulfur Indol Motility)
- 6) Simmon Citrat
- 7) Metyl Red
- 8) Voges Proskauer

Pemeriksaan Serologi

Pemeriksaan serologi dapat dilakukan untuk mengetahui keberadaan antibodi dalam darah terhadap bakteri tertentu yang menyebabkan infeksi di dalam tubuh. Pemeriksaan serologi yang dapat dilakukan yaitu pemeriksaan sebagai berikut:

- 1) Pemeriksaan Salmonella dengan Uji serologi test widal
- 2) Pemeriksaan Brucella dengan uji Rose Bengal Test (RBT), Complement Fixation Test (CFT), Enzyme-linked Immunosorbent Assay (ELISA).

- 3) Pemeriksaan C-Reaktif Protein (CRP) untuk jenis infeksi yang disebabkan oleh bakteri (Siti Nuraeni, Arief Fadillah and Saputra, 2022).

11.5 Pemeriksaan Uji Sensitivitas Antibiotik

Pemeriksaan sensitivitas antibiotik digunakan untuk menguji kepekaan bakteri terhadap suatu antibiotik. Uji ini dapat digunakan untuk diagnosis Identifikasi bakteri tertentu seperti dalam pemeriksaan bakteri *Staphylococcus* dapat digunakan untuk membedakan bakteri *Staphylococcus aureus* dengan *Staphylococcus saprophyticus* melalui uji sensitivitas terhadap antibiotik novobiocin. Bakteri *Streptococcus pyogenes* grup A dengan bakteri *Streptococcus beta hemolysis* grup lainnya seperti grup B dapat dibedakan dengan uji antibiotik bacitrasin. Bakteri *Streptococcus pneumonia* dapat di uji menggunakan antibiotik Optochin. Pemeriksaan uji sensitivitas antibiotik dilakukan dengan cara difusi cakram, pengenceran atau dilusi. Beberapa contoh cara uji sensitivitas antibiotik dapat menggunakan metode Kirby bauer, Minimal Inhibitor Concentration (MIC) dan Epsilometer test (Soleha, 2015).

11.6 Pemeriksaan Molekuler

Pemeriksaan bakteri dilakukan dengan pendekatan molekuler merupakan sebuah terobosan baru dalam mendeteksi bakteri patogen sebagai penyebab infeksi, pemeriksaan molekuler mempunyai keunggulan diantaranya lebih spesifik dan sensitif serta lebih cepat. Saat ini berkembang pemeriksaan bakteri dengan reaksi berantai polimerase (PCR), amplifikasi isothermal yang dimediasi loop (LAMP), sidik jari, dan polimorfisme panjang fragmen restriksi (RFLP). Metode Polymerase Chain Reaction (PCR) merupakan salah satu teknologi biologi molekuler yang dapat mengamplifikasi

rangkaian DNA atau RNA tertentu menjadi jutaan salinan yang disebut amplikon. Metode ini dapat digunakan untuk deteksi cepat, spesifik dan sensitif terhadap beberapa bakteri yang sulit dikultur, khususnya bakteri yang sulit dibiakkan dan membutuhkan waktu lama untuk tumbuh. Saat ini metode PCR telah dikembangkan dan diterapkan untuk mendiagnosis berbagai penyakit yang disebabkan oleh bakteri. Metode ini sederhana dan efektif dalam mendeteksi bakteri, namun efektivitasnya bergantung pada spesifisitas primer yang digunakan. Sensitivitas dan spesifisitas tes menggunakan metode PCR terus meningkat melalui pengembangan dan modifikasi tes, sehingga mengarah pada pengembangan teknik PCR standar termasuk PCR konvensional dan PCR real-time (PCR kuantitatif), PCR multiplex dan nested PCR (Huber *et al.*, 2022), (Amalia *et al.*, 2020).

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, N. *et al.* (2020) Akankah Perkembangan Metode Deteksi Biomolekuler Era 4.0 Mampu Menggantikan Pemeriksaan Laboratorium Bakteri Secara Konvensional, *Seminar Nasional Riset Kedokteran (sensorik)*, p. 2020. Available at: www.ncbi.nlm.nih.gov/BLA.
- Chylen Setiyo, Rini, J. (2020) *Bakteriologi Dasar*. UMISIDA Press.
- Didimus T. Boleng (2015) *Konsep Konsep Dasar Bakteriologi*. Edited by UMM Press. Malang.
- Dwidjoseputro (2005) *Dwidjoseputro. 2005. Dasar-Dasar Mikrobiologi. Djambatan: Jakarta.*
- Fardiaz. S (2002) *Mikrobiologi Pangan 2*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Febrianti, T. and Ningsih, I. (2023) 'Pratista Patologi Permasalahan dan Pemeriksaan Serratia sp Pratista Patologi', 8(2), pp. 40–46.
- Giuliano, C., Patel, C. R. and Kale-Pradhan, P. B. (2019) 'A guide to bacterial culture identification and results interpretation', *P and T*, 44(4), pp. 192–200.
- Huber, F. *et al.* (2022) 'Rapid Bacteria Detection from Patients' Blood Bypassing Classical Bacterial Culturing', *Biosensors*, 12(11), p. 994. doi: 10.3390/bios12110994.
- Hussey, Marise; Zayaitz, A. (2008) 'Acid-Fast Stain Protocols', *American Society of Microbiology*, (September 2008), pp. 1–12. Available at: <http://www.microbelibrary.org/component/resource/laboratory-test/2870-acid-fast-stain-protocols>.
- Hussey, M. A. (2013) 'Endospore Stain Protocol', *American Society for Microbiology*, (September 2007), pp. 1–11.
- J Vandepitte et al (2003) *Basic Laboratory Procedures in Clinical Bacteriology*. WHO. Available at: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>.
- Jawetz, M. & A. (2013) *Medical Microbiology*. 26 th. New York: Mc. Graw Hill Lange.

- Karah, N. *et al.* (2020) 'Guideline for urine culture and biochemical identification of bacterial urinary pathogens in low-resource settings', *Diagnostics*, 10(10). doi: 10.3390/diagnostics10100832.
- Mellies, J. (2013) 'Bacterial Flagella Stain Protocol', *ASM Microbe Library*, (September 2008), pp. 1–8. Available at: <http://www.microbelibrary.org/component/resource/laboratory-test/3153-bacterial-flagella-stain-protocol>.
- Patricia Shields and Cathcart, L. (2011) 'Motility Test Medium Protocol', *American Society for Microbiology*, (November 2011), pp. 1–7.
- Roxana B, . Hughes and Ann C, S. (2013) 'Capsule Stain Protocols', *American Journal of Microbiology*, (September 2007), pp. 1–12. Available at: http://www.microbelibrary.org/index2.php?option=com_resource&cont...article&article=3041&category_id=1&format=html&print=1&Itemid=73.
- Saimin, J. *et al.* (2020) 'Microbiological and biochemical contamination analysis of refilled drinking-water in Abeli, Kendari, Southeast Sulawesi', *Indonesian Biomedical Journal*, 12(2), pp. 124–129. doi: 10.18585/inabj.v12i2.871.
- Saputra, B. E., Bintari, Y. R. and Risandiansyah, R. (2022) 'Uji Validasi Akurasi Dan Presisi Metode Pewarnaan Sederhana Staphylococcus Aureus Dan Escherichia Coli Menggunakan Esktrak Metanolik Hibiscus Sabdariffa Linn', *Jurnal Bio Komplementer Medicine*, 9(1), pp. 1–13. Available at: <http://riset.unisma.ac.id/index.php/jbm/article/view/15621>.
- Siti Nuraeni, H., Arief Fadillah, M. and Saputra, T. (2022) 'Gambaran C-Reaktif Protein (CRP) Pada Pasien Demam Tifoid di Laboratorium Klinik Pinang Sari 2 Description of C-Reactive Protein (CRP) in Typhoid Fever Patients in Clinic Laboratory of Pinang Sari 2', *Journal of Medical Laboratory Research*, 1(1), pp. 13–18.

- Smith, A. and Hussey, M. (2020) 'American Society for Microbiology: Gram Stain Protocols', *American Society for Microbiology*, (September 2020), pp. 1–9. Available at: www.asmscience.org.
- Soleha, T. U. (2015) 'Uji Kepekaan Terhadap Antibiotik', *Juke Unila*, 5(9), p. 121.
- Tortora, G. J.; Funke, B. R.; Case, C. L. (2018) *Microbiology*. Pearson.

BIODATA PENULIS



Mustika Sari H. Hutabarat, S.Si.T., M.Biomed

Dosen Program Studi DIV Teknologi Laboratorium Medis
Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Katolik Musi Charitas
Palembang

Penulis lahir di Palembang 30 Maret 1993. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi DIV Teknologi Laboratorium Medis Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Katolik Musi Charitas Palembang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan DIV Teknologi Laboratorium Medis dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Biomedik Konsentrasi Mikrobiologi.

BIODATA PENULIS



Dokter Dito Anurogo, M.Sc., Ph.D. (Candidate)

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), setebal hampir 300 halaman.

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, jurnanisme, 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: 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. Gadjah 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



Andi Fatmawati, S.Si.M.Kes

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Makassar tanggal 09 Oktober 1977. Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 di Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin Makassar dan Magister Kesehatan (M.Kes) diselesaikan pada Program Studi Biomedik-Mikrobiologi, Universitas Hasanuddin, Makassar. Bekerja sebagai dosen Prodi D3 Teknologi Laboratorium Medis, Poltekkes Muhammadiyah Makassar.

BIODATA PENULIS



Revita Permata Hati, STP, MSi

Doesen Program Studi S1 Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi
Dan Bisnis, Universitas BTH

Penulis bernama Revita Permata Hati, STP, MSi yang dilahirkan pada September 25, 1992 di Bogor, Jawa Barat. Penulis adalah Dosen Sarjana Teknologi Pangan (STP), Gugus Kendali Mutu (GKM) Fakultas Teknologi dan Bisnis (FTB), Universitas Bakti Tunas Husada (BTH) Tasikmalaya. Penulis diberi kepercayaan Pada tahun akademik 2014/2015–2017/2018 menjadi Asisten Dosen di Program Diploma Tiga (D3) Supervisor Jaminan Mutu Pangan (SJMP), Institut Pertanian Bogor (IPB), Bogor-16151 dan Pada tahun 2013/2014 penulis diberi kepercayaan menjadi Staff Research and Development - Asisten Manager (R&D) di PT Sentral Multimitra Gemilang (SMG Food), Bogor-16310. Penulis memperoleh Gelar Sarjana Teknologi Pangan dari Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Sahid Jakarta (USAHID) dan Magister Ilmu Pangan dari Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University. Penulis melakukan penelitian dan fokus studi di bidang mikrobiologi dan keamanan pangan. Penulis aktif berperan dan berpartisipasi dalam berbagai aktivitas pelatihan, seminar nasional dan internasional. Penulis aktif menulis dan beberapa tulisannya telah diterbitkan.

Penulis telah mempublikasikan hasil penelitiannya dalam journal nasional dan internasional. Pembaca dapat mengirimkan pesan digital dengan penulis melalui alamat email (revita.p.h@gmail.com) serta dapat mengikuti google scholar penulis (<https://s.id/RevitaPermataHati>).

BIODATA PENULIS



Indas Wari Rahman, S.Si., M.Kes

Dosen Prodi D-IV Teknologi Laboratorium Medis

Penulis lahir di Kabupaten Enrekang Sulawesi Selatan tanggal 25 Februari 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D-IV Teknologi Laboratorium Medis, Universitas Megarezky Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada jurusan Biologi Sains dan S2 jurusan Biomedik di Universitas Hasanuddin. Penulis saat ini menekuni bidang Mikrobiologi dengan aktif mengajar dan membimbing mahasiswa dalam pengajaran, praktek dan penelitian.

BIODATA PENULIS



Nurfitri Arfani, S.Si., M.Si

Dosen Prodi D-IV TLM Universitas Megarezky

Penulis lahir di Ujung Pandang, 25 Maret 1993. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi DIV Teknologi Laboratorium Medis Universitas Megarezky. Penulis telah menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi di Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar (UINAM) dan melanjutkan S2 pada Jurusan Biologi di Universitas Brawijaya (UB).

BIODATA PENULIS



Meri, SKM., M. Imun

Dosen Program Studi D3 Analis Kesehatan
Fakultas Ilmu Kesehatan Bakti Tunas Husada

Penulis lahir di Kota Tasikmalaya, 16 Maret 1981. Pendidikan formal: SDN 2 Cikalang Tasikmalaya, SMPN 1 Tasikmalaya, SMAN 2 Tasikmalaya, D3 Analis Kesehatan Universitas Bakti Tunas Husada Tasikmalaya, S1 Kesehatan Masyarakat Universitas Siliwangi Tasikmalaya, dan S2 Imunologi di Universitas Airlangga Surabaya. Kini penulis sebagai Dosen Tetap di Universitas Bakti Tunas Husada Tasikmalaya, sejak 2017, dengan jabatan saat ini adalah Lektor 300, dan penempatan di Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Pengurus Jurnal JUPEMAS sebagai Editor, Reviewer Jurnal Kesehatan dengan SINTA 4 (Journal of Health/JoH) dan Reviewer di Jurnal Pengabdian Masyarakat (ABDIKAN). Penulis berpengalaman sebagai Ahli Teknologi Laboratorium Medis (ATLM) di beberapa laboratorium di Rumah Sakit Swasta dan Institusi Pendidikan) dari tahun 2003-2016. Penulis merupakan dosen pengampu utama mata kuliah Imunologi, Hematologi, dan Manajemen Laboratorium, Virologi, Imunohematologi, Sitohistoteknologi, Kimia Klinik, dan Instrumen Laboratorium. Hobi yang ditekuni adalah menulis buku. Karya buku sekitar 24 buku. Alamat email: merimeriani1@gmail.com atau meri@universitas-bth.ac.id,Whatsapp/telegram: 085217894100.

BIODATA PENULIS



dr. Marsino O. R. O. Rondo, Sp.A, M.M, M.A.R.S

Dosen FK Unsrat Manado

Staf Medis RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou Manado

Penulis lahir di Manado tanggal 01 Juli 1988. Penulis adalah dokter tetap di RSUP Prof. dr. R. D. Kandou Manado dan staf dosen pada Program Studi Ilmu Kesehatan Anak, Fakultas Kedokteran, Universitas Sam Ratulangi Manado. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kedokteran Umum di Fakultas Kedokteran, Universitas Sam Ratulangi Manado, melanjutkan S2 Dual Degree pada Jurusan Magister Manajemen dan Magister Administrasi Rumah Sakit di Universitas Pelita Harapan Jakarta dan menempuh Pendidikan Profesi Dokter Spesialis Anak di Fakultas Kedokteran, Universitas Sam Ratulangi Manado.

BIODATA PENULIS



Qurrota Aýun, M.Si.

Dosen Program Studi Biologi

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam As-Syafi'iyah

Penulis merupakan Lulusan S-1 dari Program Studi Biologi Universitas Islam As-Syafi'iyah (UIA) dan lulusan S-2 pada Program studi Mikrobiologi Institut Pertanian Bogor (IPB). Saat ini, penulis bekerja sebagai dosen tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam As-Syafi'iyah, Jatiwaringin. Bidang yang penulis tekuni adalah mikrobiologi. Selain mengajar, penulis tergabung dalam tim Gugus penjaminan mutu Fakultas dan semenjak tahun 2022 hingga sekarang bertugas sebagai ketua Auditor Mutu Internal (AMI) Universitas. Penulis pernah menjadi penerima hibah dari Kementerian Pendidikan Kebudayaan, Riset dan Teknologi melalui Pendanaan Penelitian Dosen Pemula (PDP) pada tahun 2021 dan 2022. Aktif menulis artikel di berbagai Jurnal ilmiah dan beberapa buku yang telah diterbitkan diantaranya buku Mikrobiologi Dasar, Virologi, Mikrobiologi: konsep dasar dan teknik laboratorium, Pengantar Ilmu Biokimia, Kimia Organik dan Genetika.