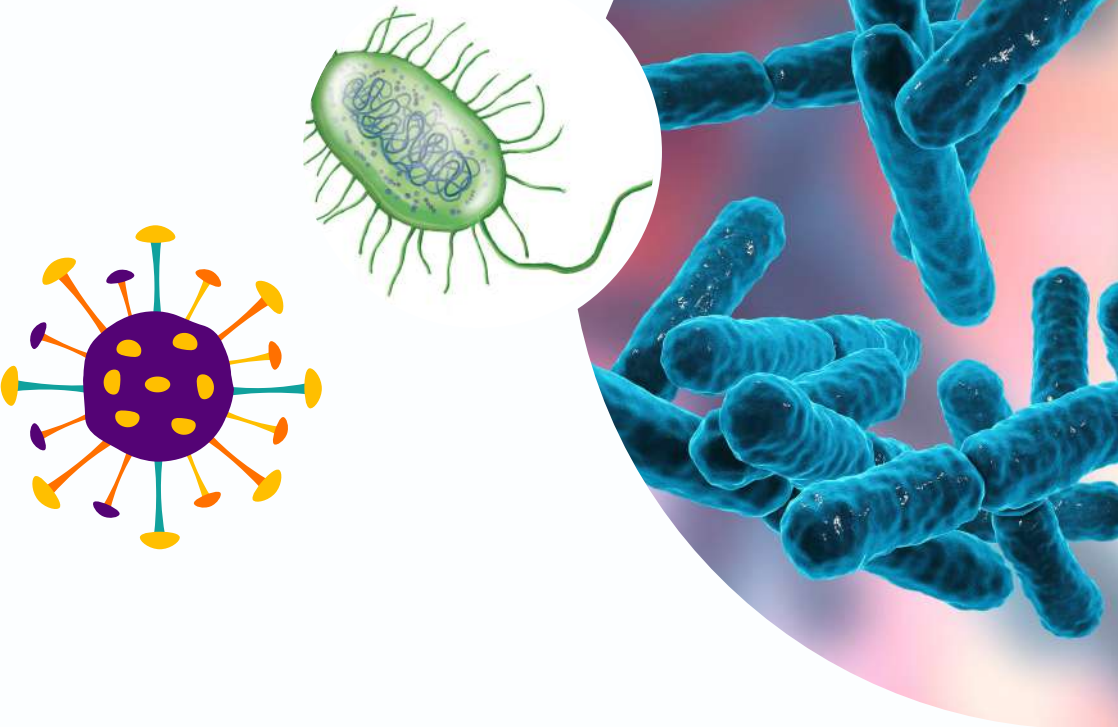




MIKROORGANISME DAN BAKTERIOLOGI

**Rahayu Wulan, Deswidya S Hutaauruk, Rizqi Yanuar Pauzi,
Andi Indrawati, Rina Hidayati Pratiwi, I Wayan Suanda,
Firdaus Fahdi, Dina Aribah, Stormy Vertygo, Lismayana Hansur,
Rury Eryna Putri**

MIKROORGANISME DAN BAKTERIOLOGI

**Rahayu Wulan
Deswidya S Hutaauruk
Rizqi Yanuar Pauzi
Andi Indrawati
Rina Hidayati Pratiwi
I Wayan Suanda
Firdaus Fahdi
Dina Aribah
Stormy Vertygo
Lismayana Hansur
Rury Eryna Putri**



GET PRESS INDONESIA

MIKROORGANISME DAN BAKTERIOLOGI

Penulis :

Rahayu Wulan
Deswidya S Hutauruk
Rizqi Yanuar Pauzi
Andi Indrawati
Rina Hidayati Pratiwi
I Wayan Suanda
Firdaus Fahdi
Dina Aribah
Stormy Vertygo
Lismayana Hansur
Rury Eryna Putri

ISBN : 978-623-125-139-8

Editor : Mila Sari S.ST., M.Si

Penyunting : Tri Putri Wahyuni S.Pd

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

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

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

Cetakan pertama, April 2024

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

KATA PENGANTAR

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

Buku Ini Membahas Pengertian Mikroorganisme, Ruang Lingkup Mikroorganisme, Pertumbuhan Mikroorganisme, Pengamatan Mikroorganisme, Mikroorganisme Dan Bakteriologi, Pengertian Bakteri, Struktur Bakteri, Reproduksi Bakteri, Jenis-jenis Bakteri, Peranan Bakteri Dalam Kehidupan.

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

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

Padang, April 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	ix
BAB 1 PENGERTIAN MIKROORGANISME.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.1.1 Domain Bakteri.....	3
1.1.2 Domain Archaea.....	3
1.1.3 Domain Eukarya.....	4
1.2 Pengertian Mikroorganisme	4
1.2.1 Sifat Umum Sel Mikroorganisme.....	5
1.2.2 Sifat Khusus Sel Mikroorganisme.....	7
1.3 Cakupan Mikroorganisme	9
1.4 Pentingnya Ilmu Mikrobiologi	10
DAFTAR PUSTAKA	12
BAB 2 RUANG LINGKUP MIKROORGANISME	15
2.1 Pendahuluan.....	15
2.2 Karakteristik Mikroorganisme	16
2.2.1 Fungi.....	17
2.2.2 Bakteri.....	18
2.2.3 Protozoa.....	19
2.2.4 Virus	20
2.3 Peran Mikroorganisme.....	21
2.4 Pengendalian Mikroorganisme	22
DAFTAR PUSTAKA	24
BAB 3 STRUKTUR MIKROORGANISME DAN UKURAN ...	27
3.1 Bakteri.....	27
3.1.1 Flagellum	28
3.1.2 Pili.....	29
3.1.3 Fimbriae.....	29
3.1.4 Kapsul.....	30
3.1.5 Dinding Sel.....	30
3.1.6 Membran Sitoplasma	32
3.1.7 Mesosom.....	33
3.1.8 Sitoplasma dan Komponen Internal.....	33

3.2 Fungi	34
3.3 Virus	35
DAFTAR PUSTAKA	37
BAB 4 PERTUMBUHAN MIKROORGANISME.....	39
4.1 Pendahuluan	39
4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroorganisme.....	40
4.2.1 Sumber Nutrisi.....	40
4.2.2 Faktor Lingkungan	42
4.3 Waktu Generasi	45
4.4 Fase Pertumbuhan Mikroorganisme.....	46
4.5 Metode Pengukuran Pertumbuhan Mikroorganisme.....	48
DAFTAR PUSTAKA	50
BAB 5 PENGAMATAN MIKROORGANISME	51
5.1 Pendahuluan	51
5.2 Pengamatan Mikroorganisme	52
5.2.1 Persiapan Sampel.....	54
5.2.2 Pemilihan Mikroskop yang Sesuai	55
5.3 Pembuatan Preparat Mikroorganisme	57
5.4 Penyiapan dan Fiksasi Sampel	59
5.5 Pewarnaan Sampel.....	61
5.6 Pembuatan Sediaan <i>Smear</i>	63
DAFTAR PUSTAKA.....	66
BAB 6 MIKROORGANISME BAGI KEHIDUPAN MANUSIA	67
6.1 Pendahuluan	67
6.2 Mikroorganisme.....	69
6.2.1 Prokariotik dan Eukariotik.....	73
6.2.2 Pertumbuhan Mikroorganisme	74
6.3 Mikroorganisme Bagi Kehidupan Manusia.....	77
6.3.1 Mikroorganisme Menguntungkan.....	79
6.3.2 Mikroorganisme Merugikan	80
6.4 Pemanfaatan Mikroorganisme	82
6.4.1 Kesehatan	84
6.4.2 Makanan dan Minuman.....	84
6.4.3 Pertanian.....	85
6.4.4 Industri.....	85

6.4.5 Lingkungan.....	87
DAFTAR PUSTAKA	88
BAB 7 BAKTERI	93
7.1 Pengertian Bakteri	93
7.2 Morfologi Bakteri.....	95
7.3 Bentuk Bakteri.....	96
DAFTAR PUSTAKA	100
BAB 8 STRUKTUR BAKTERI.....	101
8.1 Dinding Sel dan Membran Plasma.....	102
8.2 Glikokaliks (Kapsul)	106
8.3 Flagel.....	106
8.4 Fimbria dan Pilus Seks.....	109
8.5 Genom	109
8.6 Ribosom dalam Sitoplasma.....	110
8.7 Struktur Internal lainnya.....	112
DAFTAR PUSTAKA	115
BAB 9 REPRODUKSI BAKTERI.....	117
9.1 Pendahuluan.....	117
9.2 Reproduksi Aseksual	118
9.2.1 Pembelahan Biner (<i>Binary Fission</i>)	118
9.2.2 Kuncup (<i>Budding</i>)	121
9.2.3 Sporulasi	122
9.3 Reproduksi Seksual	125
9.3.1 Transformasi	125
9.3.2 Konjugasi	128
9.3.3 Transduksi.....	130
DAFTAR PUSTAKA	133
BAB 10 JENIS-JENIS BAKTERI.....	137
10.1 Pendahuluan.....	137
10.1.1 Berdasarkan bentuknya:	138
10.1.2 Berdasarkan kebutuhan oksigen.....	138
10.1.3 Berdasarkan karakteristik pewarnaan Gram.....	139
10.1.4 Kemampuan metabolisme	140
10.2 Bakteri Patogen.....	141
10.2.1 Bakteri Penyebab Infeksi Saluran Pernapasan ...	141
10.2.2 Bakteri Penyebab Infeksi Saluran Pencernaan ...	143
10.2.3 Bakteri Penyebab Infeksi Saluran Kemih	145

10.2.4 Bakteri Penyebab Infeksi Kulit	146
10.3 Bakteri Menguntungkan	148
10.3.1 Bakteri Pembuat Kompos	148
10.3.2 Bakteri Sebagai Agen Fermentasi Makanan dan Minuman	149
10.3.3 Bakteri Pendegradasi Limbah.....	150
10.3.4 Bakteri Sinbiotik dalam Tubuh Manusia	152
DAFTAR PUSTAKA.....	154
BAB 11 BAKTERIA: PERANAN DALAM KEHIDUPAN	156
11.1 Pendahuluan	156
11.2 Bakteri sebagai Bioremediator Polutan	156
11.2.1 Bioremediasi Residu Pestisida	157
11.2.2 Bioremediasi Logam Berat	157
11.2.3 Bioremediasi Cemaran Minyak.....	158
11.3 Bakteri dalam bidang Medis dan Farmasi	158
11.3.1 Bakteri untuk Probiotik Manusia.....	158
11.4 Bakteri dalam Bidang Pengolahan Makanan	159
11.4.1 Bakteri pada Fermentasi Produk Susu	159
11.4.2 Bakteri sebagai Pengawet Makanan	160
11.4.3 Bakteri pada Pembuatan Minuman Fermentasi	160
11.5 Bakteri dalam Bidang Pertanian.....	162
11.5.1 Hortikultura : Bakteri Pemacu Tumbuh Tanaman	162
11.5.2 Hortikultura: Bakteri sebagai Agen Pengendali Hayati	164
11.5.3 Akuakultur : Bakteri sebagai Pengatur Kualitas Air Kolam Budidaya.....	165
11.5.4 Akuakultur : Bakteri sebagai Probiotik Hewan Akuatik	166
DAFTAR PUSTAKA.....	167
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Pohon filogenetik universal yang menunjukkan tiga domain kehidupan, yaitu Bacteria, Archaea, dan Eukarya.....	2
Gambar 1.2. Archaea: a) Archaea haloalkalofilik di Danau Hamara, Wadi Al Natrun, Mesir yang tumbuh di pH 10, b) Archaea <i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	4
Gambar 1.3. Struktur sel bakteri.....	5
Gambar 1.4. Sel mikroba menyerap nutrisi dari lingkungan	6
Gambar 1.5. Petumbuhan mikroorganisme.....	6
Gambar 1.6. Evolusi mikroorganisme	7
Gambar 1.7. Sel mikroorganisme membentuk endospora.....	7
Gambar 1.8. Komunikasi pada mikroorganisme.....	8
Gambar 1.9. Flagel pada bakteri	9
Gambar 1.10. Transfer gen secara horizontal pada sel donor ke sel resipien (penerima)	9
Gambar 1.11. Jenis mikroorganisme.....	10
Gambar 2.1. Gambaran sel mikroba dengan SEM (<i>Scanning Electron Micrograph</i>).....	16
Gambar 2.2. Perbandingan ukuran relatif organisme.....	17
Gambar 2.3. Jamur <i>Penicillium</i> Sp.	18
Gambar 2.4. Bentuk sel bakteri	19
Gambar 2.5. <i>Amoeba proteus</i>	20
Gambar 2.6. Struktur Partikel Virus	20
Gambar 3.1. Struktur sel prokaryotik.....	28
Gambar 3.2. Struktur dinding sel bakteri	30
Gambar 3.3. Hasil pewarnaan Gram bakteri.....	31
Gambar 3.4. Mekanisme transpor melintasi membran	33
Gambar 3.5. Struktur fungi multiseluler	35
Gambar 3.6. Struktur fungi uniseluler	35
Gambar 3.7. Struktur virus.....	36
Gambar 4.1. Kurva Pertumbuhan Mikroba	48

Gambar 5.1. Penghitungan jumlah mikroba secara keseluruhan dengan hemasitometer	63
Gambar 6.1. Klasifikasi Organisme menurut Carl Woese.....	70
Gambar 6.2. Kurva Pertumbuhan Fungi.....	75
Gambar 7.1. Perbandingan ukuran/rentang ukuran makhluk hidup dan sel.	94
Gambar 7.2. Bentuk bakteri bulat, batang dan spiral.....	98
Gambar 7.3. Penampakan bakteri bulat, batang dan spiral.....	99
Gambar 8.1. Struktur eksternal dan internal sel bakteri.....	101
Gambar 8.2. Perbedaan struktur dinding sel bakteri dan respon pewarnaan Gram pada mikroskop	102
Gambar 8.3. Struktur dinding sel bakteri Gram positif.....	104
Gambar 8.4. Struktur membran plasma bakteri.....	105
Gambar 8.5. Struktur dinding sel bakteri Gram negatif.....	105
Gambar 8.6. (a) Penampakan TEM-berwarna kapsul bakteri <i>Streptococcus</i> yang melekat pada sel tonsil dan (b) penampakan mikroskopik kapsul bakteri <i>Acinetobacter</i> dengan pewarnaan negatif tinta india	106
Gambar 8.7. Jenis flagel sel bakteri (a) peritrik, (b) monotrik, (c) lopotrik, dan (d) amfitrik.....	107
Gambar 8.8. Struktur flagel sel bakteri.....	108
Gambar 8.9. Pergerakan flagel peritrik dan monotrik.....	108
Gambar 8.10. (a) Penampakan Fimbria <i>Salmonella typhi</i> pada mikroskop elektron dan (b) TEM pilus seks <i>Escherichia coli</i> , sel donor (kiri) menjulurkan pilus seks yang melekat ke sel resipien (kanan).....	109
Gambar 8.11. (a) Penampakan TEM daerah nukleoid dan (b) Genom yang keluar dari sel <i>Escherichia coli</i> yang pecah, terlihat satu kromosom sirkular dan tiga plasmid.....	110

Gambar 8.12. Membran terspesialisasi membentuk (a) krista mitokondria pada bakteri aerob dan (b) tilakoid pada bakteri fotosintetik - penampakan TEM.....	112
Gambar 8.13. (a) Penampakan TEM struktur endospora bakteri dan (b) tiga jenis endospora berdasarkan letaknya.....	113
Gambar 8.14. (a) Penampakan mikroskopik struktur granula pada <i>C. diphtheriae</i> dengan pewarnaan Albert dan (b) penampakan TEM struktur vesikel udara pada bakteri akuatik.....	114
Gambar 9.1. Pembelahan Biner	119
Gambar 9.2. Kuncup (<i>Budding</i>)	121
Gambar 9.3. Sporulasi	123
Gambar 9.4. Transformasi	126
Gambar 9.5. Konjugasi	128
Gambar 9.6. Transduksi	130
Gambar 10.1. Jenis-jenis bakteri	137

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1. Ukuran Mikroorganisme dalam Satuan.....	69
Tabel 6.1. Beberapa Contoh Bakteri Pembentuk Spora.....	78
Tabel 6.2. Kelompok Bakteri dalam Proses Fermentasi Glukosa.....	86
Tabel 8.1. Perbedaan ribosom sel prokariot dan eukariot.....	111

BAB 1

PENGERTIAN MIKROORGANISME

Oleh Rahayu Wulan

1.1 Pendahuluan

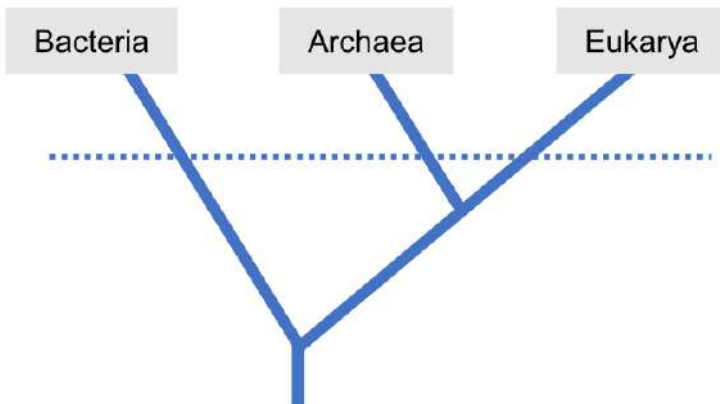
Mikroorganisme telah menjadi penghuni bumi purba sejak jutaan bahkan miliaran tahun yang lalu. Kehidupan di bumi ketika jaman purba memiliki kondisi lingkungan yang jauh lebih ekstrim dibandingkan keadaan bumi saat ini. Oleh karena itu, mikroorganisme telah melakukan evolusi dan beradaptasi dengan berbagai kondisi habitat ekstrim. Beberapa mikroorganisme penghuni bumi purba antara lain bakteri, arkahea, Cyanobacteria, virus, serta mikroorganisme eukariotik primitif. Sebelum membahas lebih jauh mengenai mikroorganisme, mari kita bahas mengenai klasifikasi makhluk hidup dan dimana penempatan klasifikasi mikroorganisme.

Makhluk hidup di bumi ini diklasifikasikan menjadi 3 domain yaitu Bakteri, Archaea, dan Eukarya. Domain merupakan tingkatan klasifikasi takson tertinggi dari makhluk hidup. Urutan takson dari yang tertinggi sampai ke terendah yaitu Domain, Kingdom, Filum, Kelas, Ordo, Famili, Genus, dan Spesies. Klasifikasi makhluk hidup menjadi tiga domain (*three domain of life*) pertama kali dilungkapkan oleh Carl Woese.

Carl Woese (1928-2012) merupakan tokoh peneliti asal University of Illinois, Urbana, Amerika Serikat. Dalam penelitiannya, Woese mengamati bahwa gen penyandi RNA ribosom (rRNA) merupakan kronometer yang ideal untuk mengukur jarak evolusi antar makhluk hidup. RNA ribosom mempunyai peran yang sama pada semua makhluk hidup, yaitu berperan dalam sintesis protein sehingga sekuens gen penyandinya bersifat stabil dan konservatif. Sifat tersebut membuat sekuens gen penyandi RNA ribosom mempunyai tingkat mutasi relatif sangat lambat dibandingkan dengan gen lain. Oleh karena itu, gen penyandi RNA ribosom terutama 16S rRNA sering digunakan sebagai marker filogenetik

untuk menentukan hubungan evolusioner dalam studi filogenetik (kekerabatan) dan identifikasi taksonomi bakteri (Woese, 2002; Koonin, 2014).

Pada tahun 1977, Carl Woese dan rekannya menerbitkan artikel penemuan mikroorganisme yang mempunyai habitat hidup di lingkungan ekstrim (*extremophiles*), yaitu Archaea. Dari hasil analisis penelitiannya tersebut, Carl Woese mengungkapkan kejanggalan pada analisis sekuens 16S rRNA pada mikroorganisme metanogen (Archaea), yang tidak memiliki hubungan dengan bakteri yang telah diketahui. Kejanggalan tersebut menjadi awal penemuan Archaea (Woese and Fox, 1977). Melalui penemuannya mengenai Archaea, Woese berhasil membuktikan bahwa sebetulnya makhluk hidup diklasifikasikan menjadi tiga domain yaitu Bakteri, Archaea, dan Eukarya seperti pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Pohon filogenetik universal yang menunjukkan tiga domain kehidupan, yaitu Bacteria, Archaea, dan Eukarya (Woese, Kandler and Wheelis, 1990; Forterre, 2022).

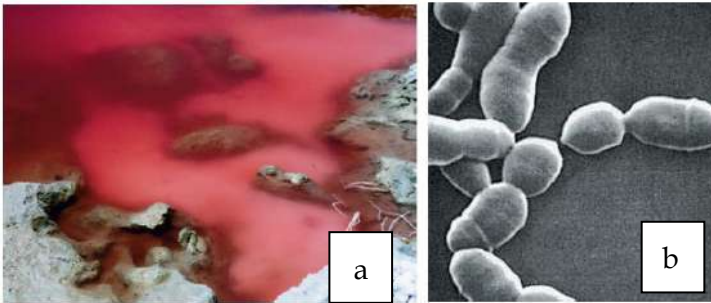
Mikroorganisme atau biasa juga disebut dengan mikroba, memiliki sebaran anggota yang sangat luas, hampir mendominasi makhluk hidup. Anggota mikroorganisme mencakup seluruh domain Bakteri dan Archaea, serta sebagian domain eukarya yang berukuran mikroskopis. Berikut merupakan penjelasan dari ketiga domain makhluk hidup.

1.1.1 Domain Bakteri

Domain bakteri mencakup mikroorganisme prokariotik yaitu bakteri. Anggota domain bakteri mempunyai sel tunggal (uniseluler), memiliki struktur sel yang sederhana dengan organel yang terbatas (ribosom), dan tidak memiliki inti sel karena materi genetiknya tidak terbungkus oleh membran inti. Materi genetik bakteri disebut nukleoid (kromosom) dan tersebar di sitoplasma. Pada beberapa bakteri juga memiliki DNA ekstrakromosomal, yaitu plasmid. Bakteri memiliki habitat hidup di berbagai lingkungan, seperti di tanah, air, dan udara. Bakteri mempunyai metabolisme yang beragam sehingga memudahkan mereka beradaptasi dengan kondisi lingkungan (Winker and Woese, 1991; Madigan *et al.*, 2022).

1.1.2 Domain Archaea

Semua anggota domain Archaea juga merupakan mikroorganisme. Archaea berbeda dengan bakteri dalam hal susunan genetik, biokimia, dan struktur selnya. Perbedaan struktur sel bakteri dan archaea salah satunya terdapat pada perbedaan komposisi penyusun dinding sel. Struktur dari archaea mendukung untuk mereka hidup di lingkungan ekstrim. Archaea memiliki habitat hidup di lingkungan ekstrim (*extremophiles*), seperti di sumber air panas, lingkungan dengan kadar garam atau salinitas tinggi, tekanan tinggi, serta hidrotermal laut dalam. Karena dapat hidup di lingkungan ekstrim, archaea mempunyai protein dan enzim-enzim yang dapat bekerja optimal pada kondisi ekstrim, sehingga berpotensi dimanfaatkan dalam bidang bioteknologi (Winker and Woese, 1991; Esclapez, Bautista and Aparici-carratal, 2023).



Gambar 1.2. Archaea: a) Archaea haloalkalofilik di Danau Hamara, Wadi Al Natrun, Mesir yang tumbuh di pH 10, b) Archaea *Methanobrevibacter arboriphilus* (Madigan *et al.*, 2022).

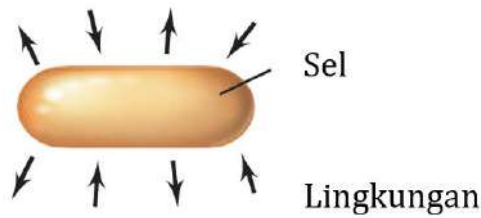
1.1.3 Domain Eukarya

Domain eukarya mencakup semua makhluk hidup yang mempunyai inti sel. Materi genetik pada eukarya terdapat di inti sel atau nukleus. Anggota eukarya mencakup cendawan, tumbuhan, dan hewan. Sel eukariotik bersifat uniseluler atau multiseluler. Mayoritas anggota mikroorganisme dari kelompok eukarya yang bersifat uniseluler, seperti khamir, protozoa, mikroalga, dan lain sebagainya (Madigan *et al.*, 2022).

1.2 Pengertian Mikroorganisme

Mikroorganisme merupakan makhluk hidup atau organisme yang berukuran mikro (kecil/ renik). Mikroorganisme adalah organisme bersel tunggal, termasuk juga virus yang berukuran mikroskopis namun non-seluler (tak hidup). Sel mikroorganisme atau sel mikroba sangat berbeda dengan sel tumbuhan dan hewan, sel mikroorganisme mampu hidup sendiri/ soliter di alam (Madigan *et al.*, 2022). Sel mikroorganisme berukuran mikroskopis yaitu dalam satuan mikrometer ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$) (Black and Black, 2015).

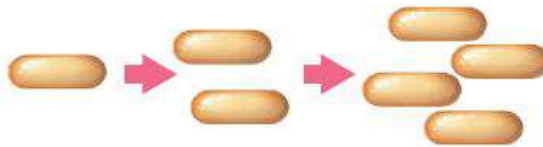
Sel mikroorganisme memiliki sifat atau karakteristik umum mengapa dapat disebut sebagai sel hidup karena memiliki struktur sel, dapat melakukan metabolisme, pertumbuhan, dan bereproduksi. Selain itu, sel mikroorganisme juga memiliki ciri atau sifat khusus



Gambar 1.4. Sel mikroba menyerap nutrisi dari lingkungan (Madigan *et al.*, 2022)

3. Pertumbuhan

Yang dimaksud dengan pertumbuhan dalam sel mikroorganisme, terutama bakteri adalah pertambahan jumlah sel, bukan pertambahan volume atau ukuran sel (Gambar 1.5). Pertumbuhan pada bakteri umumnya terjadi karena reproduksi dengan pembelahan biner (*binary fission*).

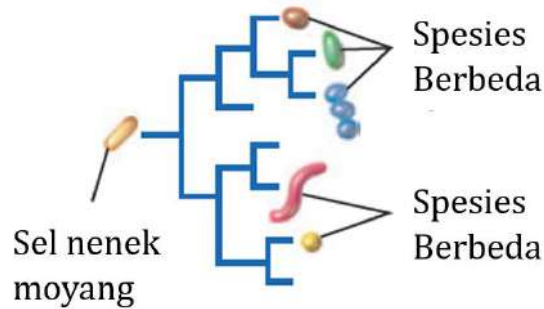


Gambar 1.5. Pertumbuhan mikroorganisme (Madigan *et al.*, 2022)

4. Evolusi

Dalam adaptasi dengan habitat lingkungan tempat hidupnya, sel mikroorganisme dapat melakukan mutasi atau perubahan sekuens genomnya. Perubahan sekuens genom (DNA) akan mengakibatkan perubahan protein yang digunakan dalam metabolisme sesuai kebutuhan mikroorganisme (Koonin, 2014; Budimir *et al.*, 2022). Perubahan-perubahan tersebut merupakan langkah atau tahapan dalam evolusi mikroorganisme. Perubahan tersebut dapat juga meliputi perubahan bentuk sel, sehingga

nantinya menjadi spesies baru yang berbeda dengan sel nenek moyang asalnya (Gambar 1.6).



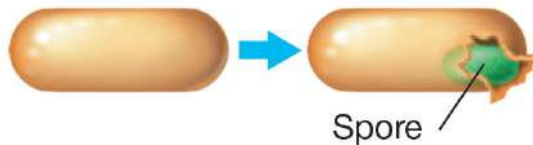
Gambar 1.6. Evolusi mikroorganisme

1.2.2 Sifat Khusus Sel Mikroorganisme

Selain mempunyai sifat umum, mikroorganisme juga memiliki sifat khusus yang berguna dalam adaptasi hidupnya. Sifat khusus sel mikroorganisme tersebut antara lain yaitu bisa berdiferensiasi, berkomunikasi, bergerak, dan melakukan transfer gen horizontal.

1. Diferensiasi

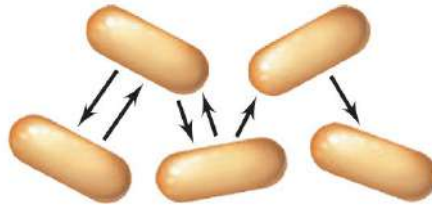
Sel mikroorganisme secara khusus dapat melakukan diferensiasi sel dalam kondisi tertentu. Dalam kondisi ekstrim dan kekurangan nutrisi di lingkungan, sel vegetatif mikroorganisme dapat membentuk endospora (Gambar 1,7). Endospora ini sebagai bentuk pertahanan diri dari sel bakteri. Ketika kondisi lingkungan telah mendapatkan cukup nutrisi, endospora dapat tumbuh kembali menjadi sel vegetatif. Pembentukan endospora sering ditemui pada spesies *Bacillus*.



Gambar 1.7. Sel mikroorganisme membentuk endospora
(Madigan *et al.*, 2022)

2. Komunikasi

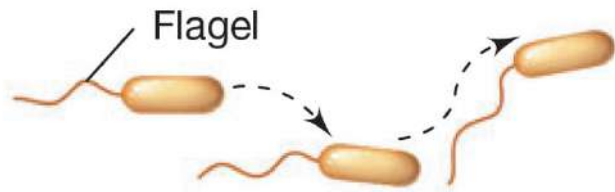
Sel mikroorganisme juga dapat melakukan komunikasi antar sel-sel sejenisnya. Komunikasi biasanya dilakukan dengan suatu senyawa/ sinyal kimia yang disekresikan (*autoinducer*) dan kemudian akan dikenali oleh mikroorganisme sejenisnya (Gambar 1.8). Salah satu bentuk komunikasi pada bakteri yang terkenal yaitu *Quorum Sensing* (QS). *Quorum sensing* biasanya dilakukan oleh *Vibrio* sp. Untuk menghasilkan toksin dalam menyerang udang budidaya. *Quorum sensing* juga terjadi pada pembentukan biofilm oleh *Aeromonas* (Rasmussen-Ivey *et al.*, 2016; Talagrand-Reboul, Jumas-Bilak and Lamy, 2017).



Gambar 1.8. Komunikasi pada mikroorganisme (Madigan *et al.*, 2022)

3. Pergerakan

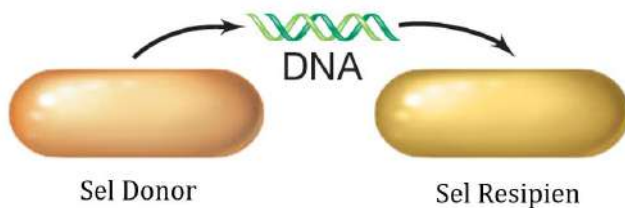
Mikroorganisme dapat bergerak untuk merespon suatu sinyal, misalnya untuk mendekati sumber nutrisi, menghindari zat berbahaya, atau menjangkau substrat dalam menginfeksi inangnya. Salah satu alat gerak bakteri yaitu flagel. Pada *Salmonella*, flagel merupakan salah satu alat patogenisitasnya yang berguna untuk menginfeksi usus inangnya di saluran pencernaan (Fàbrega and Vila, 2013; Hughes, 2017).



Gambar 1.9. Flagel pada bakteri(Madigan *et al.*, 2022)

4. Transfer Gen Horizontal

Sel mikroba dapat melakukan pertukaran atau transfer gen secara horizontal dari sel donor ke sel resipien (Gambar 1.10). Transfer gen horizontal pada bakteri dapat terjadi secara konjugasi dan transduksi. Komponen gen yang mudah ditransfer yaitu gen yang terdapat pada plasmid. Pada beberapa kasus plasmid yang berisi gen resistensi terhadap antibiotik atau plasmid yang berisi gen yang mengkodekan patogenisitas bakteri mudah ditransfer antar bakteri (Burmeister, 2015; Stratev and Odeyemi, 2016).

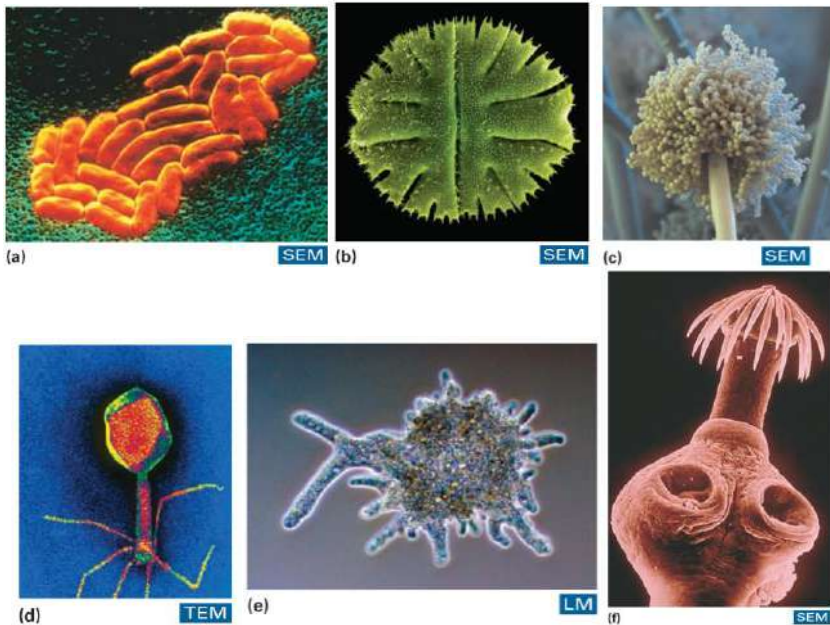


Gambar 1.10. Transfer gen secara horizontal pada sel donor ke sel resipien (penerima) (Madigan *et al.*, 2022)

1.3 Cakupan Mikroorganisme

Ilmu yang mempelajari mikroorganisme disebut mikrobiologi. Makhluk hidup yang termasuk dalam kelompok mikroorganisme yaitu bakteri, virus, cendawan, mikroalga, protozoa, dan cacing. Mikroorganisme mayoritas merupakan sel prokariotik yang termasuk dalam domain bakteri dan archaea. Dalam mikrobiologi yang paling banyak dipelajari adalah bakteri, sebuah kelompok besar dari sel yang berukuran sangat kecil. Ilmu

yang mempelajari mengenai bakteri adalah bakteriologi (Black and Black, 2015; Madigan *et al.*, 2022). Berikut merupakan gambar makhluk hidup yang termasuk dalam kelompok mikroorganisme (Gambar 1.11). Kelompok-kelompok tersebut akan dipelajari lebih rinci dalam bab-bab selanjutnya dalam buku ini.



Gambar 1.11. Jenis mikroorganisme: a) Bakteri *Klebsiella pneumoniae*, b) Mikroalga yang tumbuh di air tawar *Micrasterius*, c) Cendawan *Aspergillus niger*, d) Bakteriofage, virus yang menginfeksi bakteri, e) Protozoa *Amoeba*, f) Kepala cacing pita (eukariotik) (Black and Black, 2015).

1.4 Pentingnya Ilmu Mikrobiologi

Ilmu yang mempelajari mengenai mikroorganisme yaitu mikrobiologi penting diketahui oleh kita semua. Mikroorganisme mempunyai peran positif (misalnya probiotik) dan negatif (misalnya patogen penyebab penyakit) di kehidupan manusia sehingga perlu diketahui pengetahuan dasarnya. Penelitian di bidang mikrobiologi di bidang sains dan medis telah banyak berjasa pada kehidupan manusia. Popularitasnya ilmu mikrobiologi

semakin meningkat dalam beberapa tahun terakhir, terutama saat terjadi pandemi COVID-19. Ancaman peningkatan resistensi antibiotik dan antijamur juga terus berkembang dari yang sudah ada, ditambah lagi munculnya kembali penyakit-penyakit menular lama dan munculnya penyakit-penyakit menular lainnya (Carmona-gutierrez *et al.*, 2022). Ilmu mikrobiologi sangat berguna dalam kesehatan manusia, pengetahuan mengenai mikroorganisme dapat memberikan rasa hati-hari pada diri kita agar terjaga dari serangan penyakit yang disebabkan oleh mikroorganisme. Namun, konsep mengenai mikroorganisme seringkali masih disalahpahami oleh masyarakat.

Sebuah penelitian menemukan kurangnya pengetahuan di kalangan masyarakat dan kesalahpahaman terkait mikroorganisme. Masyarakat menyamakan istilah virus, bakteri dan mikroorganisme. Padahal ketiganya adalah hal yang berbeda, bakteri berbeda dengan virus walaupun keduanya termasuk dalam anggota mikroorganisme. Penelitian tersebut juga mengungkapkan bahwa antara 15,0% dan 20,0% masyarakat mengalami ketakutan terhadap mikroorganisme. Akan tetapi, sebanyak 74,6% partisipan menyadari bahwa pengetahuan tentang mikroorganisme itu penting dan berguna (Špernjaka, Puhmeister and Šorgo, 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Black, J. G. and Black, L. J. (2015) *Microbiology Principle and Explorations*, Wiley.
- Budimir, I. *et al.* (2022) 'Intraspecies characterization of bacteria via evolutionary modeling of protein domains', *Scientific Reports*, pp. 1–12. doi: 10.1038/s41598-022-21036-3.
- Burmeister, A. R. (2015) 'Horizontal Gene Transfer', *Evolution, Medicine, and Public Health*, 2015(1), p. 193. doi: 10.1093/EMPH/EOV018.
- Carmona-gutierrez, D. *et al.* (2022) 'A hundred spotlights on microbiology: how microorganisms shape our lives', *Microbial Cell*, 9(4), pp. 72–79. doi: 10.15698/mic2022.04.773.
- Esclapez, J., Bautista, V. and Aparici-carratal, D. (2023) 'Research in Microbiology Archaea: current and potential biotechnological applications', *Research in Microbiology*, 174(104080), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.resmic.2023.104080.
- Fàbrega, A. and Vila, J. (2013) '*Salmonella enterica* serovar Typhimurium skills to succeed in the host: virulence and regulation', *Clinical Microbiology Reviews*, 26(2), pp. 308–341. doi: 10.1128/CMR.00066-12.
- Forterre, P. (2022) 'Carl Woese: Still ahead of our time', *mLife*, 1(4), pp. 359–367. doi: 10.1002/mlf2.12049.
- Hiremath, P. S. (2015) 'Identification of Flagellated or Fimbriated Bacterial Cells using Digital Image Identification of Flagellated or Fimbriated Bacterial Cells using Digital Image Processing Techniques', *International Journal of Computer Applications*, 59(12), pp. 12–16. doi: 10.5120/9599-4223.
- Hughes, K. T. (2017) 'Flagellum Length Control: How Long Is Long Enough?', *Current Biology*, 27(11), pp. R413–R415. doi: 10.1016/j.CUB.2017.04.008.
- Koonin, E. V. (2014) 'Carl Woese's vision of cellular evolution and the domains of life', *RNA Biology*, 11(3), p. 197. doi: 10.4161/RNA.27673.
- Madigan, M. T. *et al.* (2022) *Brock Biology of Microorganisms Sixteenth Edition*. London(UK): Pearson.

- Rasmussen-Ivey, C. R. *et al.* (2016) 'Virulence factors of *Aeromonas hydrophila*: In the wake of reclassification', *Frontiers in Microbiology*, 7(AUG), p. 1337. doi: 10.3389/FMICB.2016.01337/BIBTEX.
- Špernjaka, A., Puhmeister, A. J. and Šorgo, A. (2023) 'Public opinions and knowledge about microorganisms', *Research in Science & Technological Education*, 41(2), pp. 800–818.
- Stratev, D. and Odeyemi, O. A. (2016) 'Antimicrobial resistance of *Aeromonas hydrophila* isolated from different food sources: A mini-review', *Journal of Infection and Public Health*, 9(5), pp. 535–544. doi: 10.1016/J.JIPH.2015.10.006.
- Talagrand-Reboul, E., Jumas-Bilak, E. and Lamy, B. (2017) 'The Social Life of *Aeromonas* through Biofilm and Quorum Sensing Systems', *Frontiers in Microbiology*, 8(JAN), p. 37. doi: 10.3389/FMICB.2017.00037.
- Winker, S. and Woese, C. R. (1991) 'A Definition of the Domains Archaea, Bacteria and Eucarya in Terms of Small Subunit Ribosomal RNA Characteristics', *Systematic and Applied Microbiology*, 14(4), pp. 305–310.
- Woese, C. R. (2002) 'On the evolution of cells', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(13), pp. 8742–8747. doi: 10.1073/PNAS.132266999/ASSET/6B09BE30-17B0-4EE9-AB91-7A4717AA4FDC/ASSETS/GRAPHIC/PQ1322669001.JPEG.
- Woese, C. R. and Fox, G. E. (1977) 'Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 74(11), pp. 5088–5090. doi: 10.1073/PNAS.74.11.5088/ASSET/959B8CE3-ADD2-45B8-A2B7-1FD288954CE3/ASSETS/GRAPHIC/PNAS.5088T01.JPEG.
- Woese, C. R., Kandler, O. and Wheelis, M. L. (1990) 'Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya.', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(12), pp. 4576–4579. doi: 10.1073/PNAS.87.12.4576.

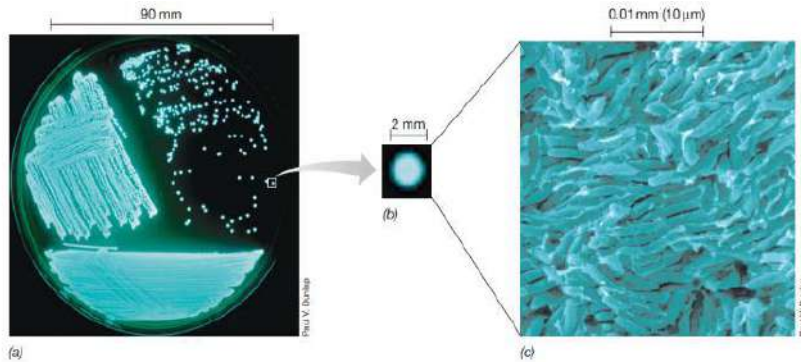
BAB 2

RUANG LINGKUP MIKROORGANISME

Oleh Deswidya S Hutauruk

2.1 Pendahuluan

Mikroorganisme merupakan makhluk hidup yang berukuran mikro sehingga menjadi tak kasat mata. Salah satu cabang biologi yang mempelajari tentang mikroorganisme ini adalah mikrobiologi. Namun pesatnya perkembangan dalam mempelajari tentang mikrobiologi ini memicu lahirnya disiplin ilmu lain yang lebih spesifik sehingga pemahaman tentang mikroorganisme-mikroorganisme ini lebih mendalam untuk dipelajari. Terdapat beberapa disiplin ilmu baru hasil perkembangan ilmu mikrobiologi seperti bakteriologi, virologi, mikologi, algologi dan juga ilmu fisika, ilmu kimia serta ilmu biokimia yang menjadi pendukung pemahaman ilmu mikrobiologi tersebut. Mikroorganisme ini selanjutnya sering disebut dengan mikroba. Mikroba memiliki jumlah yang melimpah, hidup bebas di berbagai lingkungan seperti lingkungan udara, lingkungan tanah, lingkungan berair, berada didalam makanan dan juga didalam tubuh makhluk hidup (Badaring, Fiqriansyah and Bahri, 2020). Semua makhluk hidup memiliki dua peran yaitu peran yang menguntungkan dan yang merugikan, demikian juga dengan mikroba. Diakhir abad ke 20, mikrobiologi mengalami perkembangan yang sangat cepat dimana di temukannya metabolisme mikroba didalam tanah yang memberikan dampak positif dan negatif dalam pertumbuhan tanaman dimana yang bermanfaat yaitu bakteri yang mampu mengikat nitrogen bebas di udara yang berperan dalam meningkatkan nutrisi dalam tanah sehingga menjadi lebih subur dan yang berbahaya ditemukannya mikroba-mikroba patogen yang menyebabkan penyakit pada tumbuhan (Chylen setiyo Rini, 2021).

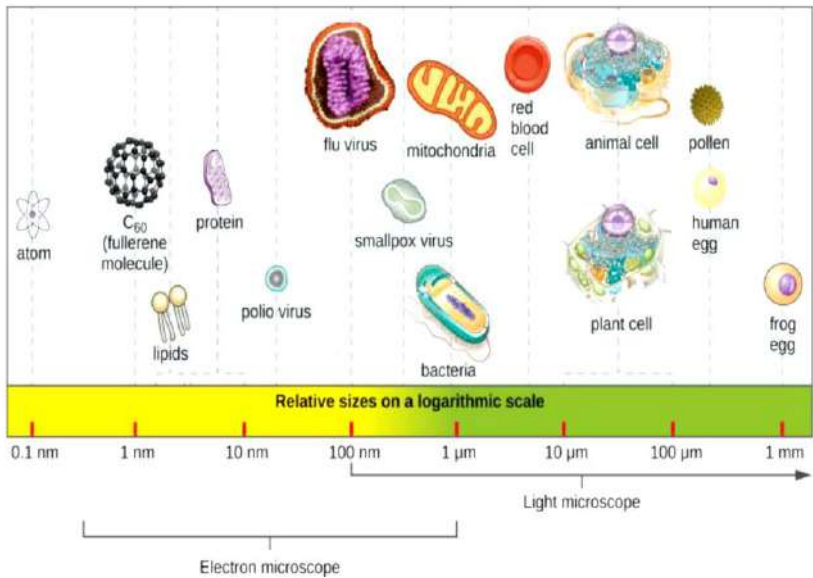


Gambar 2.1. Gambaran sel mikroba dengan SEM (*Scanning Electron Micrograph*) (Nasution, 2023)

2.2 Karakteristik Mikroorganisme

Struktur tubuh mikroorganisme tidak dapat dilihat secara langsung. Pada umumnya mikroorganisme termasuk kedalam makhluk hidup bersel satu atau monoseluler. Mikroba yang berukuran tak kasat mata ini dapat dilihat dengan menggunakan alat bantu bernama mikroskop. Jumlah mikroba yang sangat banyak ini perlu diklasifikasikan atau dikelompokkan agar proses penggolongannya lebih mudah. Taksonomi adalah ilmu yang mempelajari tentang takson atau klasifikasi maupun pembagian organisme kedalam suatu kelompok ataupun golongan menurut kemiripannya setelah dilakukan identifikasi dan penamaannya. Pengklasifikasian makhluk hidup tahun 2015 oleh Ruggiero, dkk membagi makhluk hidup menjadi 7 kelompok yaitu bakteri, arcahea, protozoa, chromista, fungi, plantae, animalia (Chylen setiyo Rini, 2021)

Mikroorganisme secara umum bersifat uniseluler dengan ukuran yang berbeda-beda. Selain ukuran, terdapat perbedaan satu sama lain diantara mikroorganisme seperti struktur tubuh, habitat, metabolisme, perkembangbiakan dan perannya masing-masing.

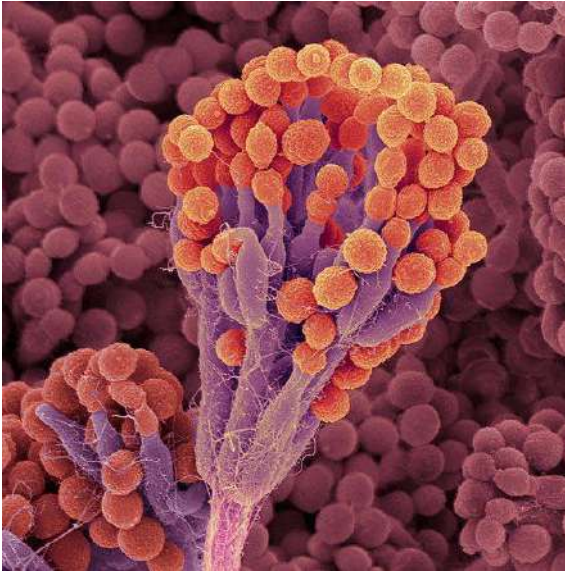


Gambar 2.2. Perbandingan ukuran relatif organisme (Mayasari, 2022)

Mikroorganisme bisa ditemukan dimana-mana seperti di tanah, di lingkungan akuatik mulai dari tawar hingga lautan, di daratan, di tubuh makhluk hidup lain bahkan di atmosfer (Pratiwi *et al.*, 2023).

2.2.1 Fungi

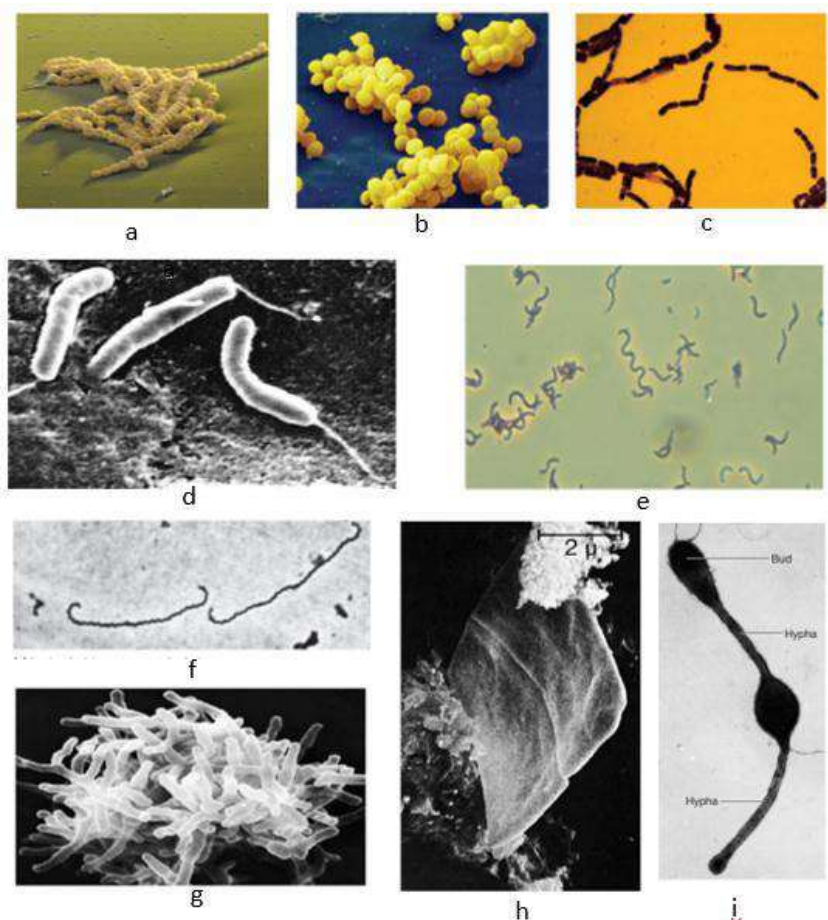
Fungi memiliki karakteristik umum berada pada kondisi pH rendah, aw rendah, tubuh tersusun atas hifa, menghasilkan spora seksual dan aseksual. Fungi termasuk kedalam sel eukariotik dengan ciri khas selnya adalah memiliki membran nukleus atau membran inti sel dan juga memiliki organel-organel sel yang lengkap selain organel plastida. Hal ini menyebabkan fungi tidak dapat melakukan proses fotosintesis sehingga harus melakukan simbiosis atau saprofit dengan makhluk hidup lain. Fungi atau jamur terbagi menjadi dua golongan yaitu makrofungi dan mikrofungi. Mikrofungi lalu dimasukkan kedalam mikroorganisme. Jamur mikroskopis ini memiliki sifat uniseluler dan sering disebut dengan khamir contohnya *Scaccharomyces cerevisea* (Suryani, Yani, 2020).



Gambar 2.3. Jamur *Penicillium* Sp. (Suryani, Yani, 2020)

2.2.2 Bakteri

Bakteri memiliki karakteristik yaitu termasuk kedalam sel prokariotik. Sel prokariotik memiliki struktur morfologi dan anatomi yang lebih sederhana dibandingkan dengan struktur morfologi dan anatomi sel eukariotik dengan ciri utama sel prokariotik adalah tidak ditemukannya membran nukleus atau membran inti. Selanjutnya pada sel bakteri tidak ditemukan organel mitokondria, kompleks golgi dan juga organel retikulum endoplasmik kasar ataupun retikulum endoplasmik halus.



Gambar 2.4. Bentuk sel bakteri: a) kokus berantai, b) kokus bergerombol, c) basil berantai, d) komma membengkok, e) Spiral, f) Spiroset, g) Filametus, h) Archaeon persegi, i) Hifa berkepala (Nasution, 2023)

2.2.3 Protozoa

Beberapa karakteristik yang dimiliki oleh protozoa adalah termasuk uniseluler, ukuran tubuhnya antara 3 – 100 mikron, tidak memiliki lapisan tubuh, bersifat simbiosis baik mutualisme, komensalisme ataupun parasitisme, tidak memiliki rgan ataupun jaringan tubuh, bergerak bebas dengan menggunakan kamu semu, flagel ataupun silia sebagai alat geraknya, serta melakukan perkembangbiakan secara seksual dan aseksual (Yulitasari, 2020).

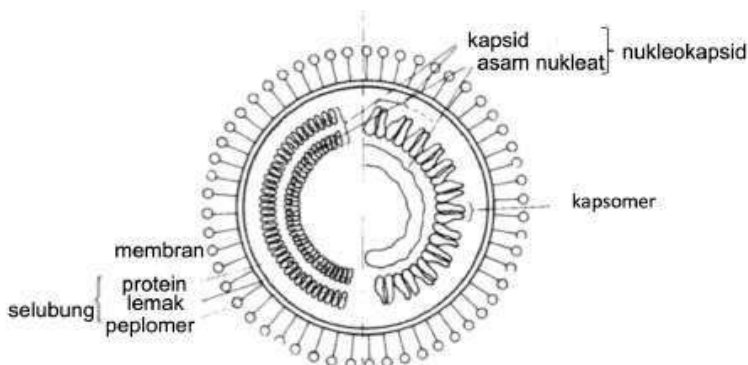
Protozoa mampu memperbanyak diri hanya pada saat dalam bentuk tropozoit dengan cara pembelahan sederhana, pembelahan berlipat ganda ataupun perbanyakan dengan penguncupan (Apsari, 2017).



Gambar 2.5. Amoeba proteus (Yulitasari, 2020)

2.2.4 Virus

Virus adalah makhluk hidup yang tidak dapat dikatakan memiliki sel karena struktur anatomi tubuhnya hanya tersusun atas asam nukleat (Ribonucleic Acid saja atau Deoxyribonucleic Acid saja) yang dilindungi oleh sebuah protein yang disebut dengan kapsid (Saraswati, Si and Biomed, 2021). Virus memiliki karakteristik yang unik karena tidak memiliki organel fungsional, itu sebabnya virus harus bergantung kepada sel inang agar dapat memproduksi energi dalam replikasi diri dan mensintesis makromolekul (Priastomo *et al.*, 2021).



Gambar 2.6. Struktur Partikel Virus (Norrby, 1983 dalam (Priastomo *et al.*, 2021)

Virus memiliki cara kerja dan karakteristik dengan tujuan untuk merusak dan menginfeksi sebuah sistem (Alam, Muhamamd and Ibrahim, 2020). Contohnya *Transmissible Spongiform Encephalopathies* (TSE) adalah sebuah penyakit yang disebabkan oleh virus jenis prion yang menyebabkan kerusakan otak dengan merubah bentuk otak menjadi seperti spons (Saraswati, Si and Biomed, 2021).

2.3 Peran Mikroorganisme

Dalam (Oleh *et al.*, 2017) dikemukakan bahwa terdapat beberapa alasan mengapa mikroorganisme harus dipelajari yaitu:

1. Karena mikroba berperan dalam menjaga keseimbangan kehidupan di dunia seperti mendaur ulang unsur-unsur kimia karbon, nitrogen, sulfur dan fosfor menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan oleh manusia, hewan dan tumbuhan.
2. Mampu melakukan fotosintesis dengan mengambil karbondioksida dan mengeluarkan oksigen ke udara layaknya seperti tumbuhan
3. Melakukan bioremediasi yaitu menguraikan polusi sehingga tidak berbahaya bagi lingkungan dengan cara menggunakan polusi tersebut sebagai sumber energinya
4. Berperan penting dalam proses pembuatan makanan melalui proses fermentasi seperti roti, kecap, keju, yogurt, cuka dan acar.
5. Berperan dalam pembuatan vitamin, vaksin dan obat-obatan lain
6. Berperan sebagai flora normal dalam tubuh inangnya seperti membantu proses pencernaan, dan menjaga keseimbangan mikroba pada bagian tubuh lain.
7. Berperan sebagai agen paling aman dalam mencegah serangan dan hama tanaman
8. Berperan dalam proses rekayasa genetika seperti virus yang digunakan sebagai pembawa gen rekombinan.

Selain peran yang positif, mikroorganisme juga memiliki dampak negatif atau yang merugikan bagi organisme lain.

Mikroorganisme bisa menjadi salah satu penyebab pencemaran udara dalam ruangan dengan ditemukannya jumlah fungi dan bakteri yang melebihi ambang batas maksimal yang normal terdapat di suatu ruangan sehingga dapat menyebabkan gangguan kesehatan dan penyakit. Penelitian yang dilakukan (Handayani, 2020) menemukan kamar pasien dengan gangguan kesehatan darah (hematologi) dapat mengalami kontaminasi jamur *Aspergillus* yang dapat menyebabkan gangguan pada nosokomial.

2.4 Pengendalian Mikroorganisme

Jumlah mikroorganisme yang ada di sekitar makhluk hidup lain harus dikendalikan agar tidak gangguan kesehatan ataupun infeksi.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi jumlah mikroorganisme pada suatu lingkungan, seperti:

1. Jumlah makhluk hidup / penghuni di suatu area lingkungan
2. Banyak/sedikitnya kegiatan yang dilakukan
3. Kelembapan yang terukur
4. Ketersediaan nutrisi yang mampu meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme di lingkungan
5. Variasi permukaan/lingkungan tersebut (horizontal ataupun vertikal) (CDC dalam (Handayani, 2020)).

Terdapat beberapa cara pengendalian yang dapat dilakukan seperti:

1. *Cleaning* dan sanitasi

Cleaning dan sanitasi memiliki prinsip kerja agar di area yang diinginkan tidak tersedia sumber nutrisi yang dibutuhkan mikroorganisme patogen tersebut untuk tumbuh dan berkembang dan juga membunuh sebagian besar populasi mikroorganisme patogen dengan resiko kontaminasi 2,7 kali jika dibandingkan dengan ruangan yang telah di lakukan *cleaning* dan sanitasi (Lee *et al.*, 2007). *Cleaning* (pembersihan) dapat digunakan dengan menambahkan deterjen dan surfaktan.

2. Desinfeksi

Desinfeksi diartikan sebagai perusakan, penghambatan mikroba untuk menyebabkan penyakit atau menyebabkan

pembusukan. Beberapa cara desinfeksi yaitu spraying (penyemprotan), wiping (pengelapan), submersion (perendaman), fogging (pengasapan) dan moping (pengepelan) (Handayani, 2020)

3. Filtrasi

Filtrasi disebut juga dengan penyaringan. Penanganan mikroorganisme dengan menggunakan filtrasi atau penyaringan ada dua jenis yaitu filtrasi bakteriologis dan filtrasi udara. Filtrasi bakteriologis berfungsi untuk menghilangkan atau meminimalkan bahan-bahan yang tidak tahan apabila dilakukan pemanasan seperti larutan gula, larutan antibiotika dan anti toksin. Sedangkan filtrasi udara berguna untuk menyaring udara yang berisi partikel-partikel dengan menggunakan HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) (Handayani, 2020)

4. Radiasi

Pengendalian mikroorganisme dengan radiasi biasanya menggunakan ultraviolet untuk menonaktifkan agen biologis di udara karena ultraviolet mampu mematikan sel mikroba (Handayani, 2020)

(Handayani, 2020) juga menyatakan bahwa mikroba yang masuk kedalam tubuh dan dapat menyebabkan infeksi pada 9 dari 10 orang adalah 4,69 CFU/kg/hari – 23,882 CFU/kg/hari dengan probabilitas infeksi yang dianjurkan hanya sekitar 1×10^6 .

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, R. I., Muhamamd, A. H. and Ibrahim, A. (2020) 'Analisis Karakteristik Virus Menggunakan Konsep Pendekatan Taksonomi', *Jurnal Teknik Informatika (J-Tifa)*, 3(2), pp. 37–40. doi: 10.52046/j-tifa.v3i2.1063.
- Apsari, I. A. P. (2017) 'Identifikasi Infeksi Parasit', *Fakultas Kedokteran Udayana*, 1(607), pp. 1–6.
- Badaring, D. R., Fiqriansyah, M. W. and Bahri, A. (2020) 'Identifikasi morfologi mikroba pada ruangan water closet jurusan biologi Univeritas Negeri Makassar', *Seminar Nasional Biologi FMIPA UNM*, 1(1), pp. 161–168.
- Chylen setiyo Rini, J. R. (2021) *Buku Ajar Mata Kuliah, BUKU AJAR BAKTERIOLOGI DASAR*.
- Handayani, E. (2020) 'Analisis Risiko Mikrobiologi Udara Dalam Ruang pada Puskesmas di Kota Semarang', *Karya Tulis Ilmiah*, pp. 1–4.
- Lee, L. D. *et al.* (2007) ' Risk of Bioaerosol Contamination With Aspergillus Species Before and After Cleaning in Rooms Filtered With High-Efficiency Particulate Air Filters That House Patients With Hematologic Malignancy ', *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 28(9), pp. 1066–1070. doi: 10.1086/519866.
- Mayasari, U. (2022) *Buku Ajar Mikrobiologi*.
- Nasution, R. A. (2023) *Mikrobiologie*. doi: 10.1007/978-3-662-61772-4_14.
- Oleh, D. *et al.* (2017) 'Modul Mikrobiologi (Ibl361)', 0, pp. 1–36.
- Pratiwi, R. H. *et al.* (2023) *Mikrobiologi Dalam Riset, Eureka Media Aksara, Mei 2023 Anggota IKAPI Jawa Tengah NO. 225/JTE/2021 NO. 225/JTE/2021*. Available at: <http://www.nber.org/papers/w16019>.
- Priastomo, Y. *et al.* (2021) *FullBook-Virologi-_compressed*. Available at: https://repository.uia.ac.id/wp-content/uploads/2022/10/FullBook-Virologi-_compressed.pdf.
- Saraswati, H., Si, S. and Biomed, M. (2021) 'Modul Virologi (Ibl 363) Modul Sesi 2 Struktur Virus Disusun Oleh', (Ibl 363), pp. 0–15. Available at: <http://esaunggul.ac.id/0/16>.

- Suryani, Yani, T. O. (2020) 'Mikologi', 44(8), pp. 1689–1699. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- Yulitasari, N. (2020) 'Modul Taksonomi Invertebrata', *Nucl. Phys.*

BAB 3

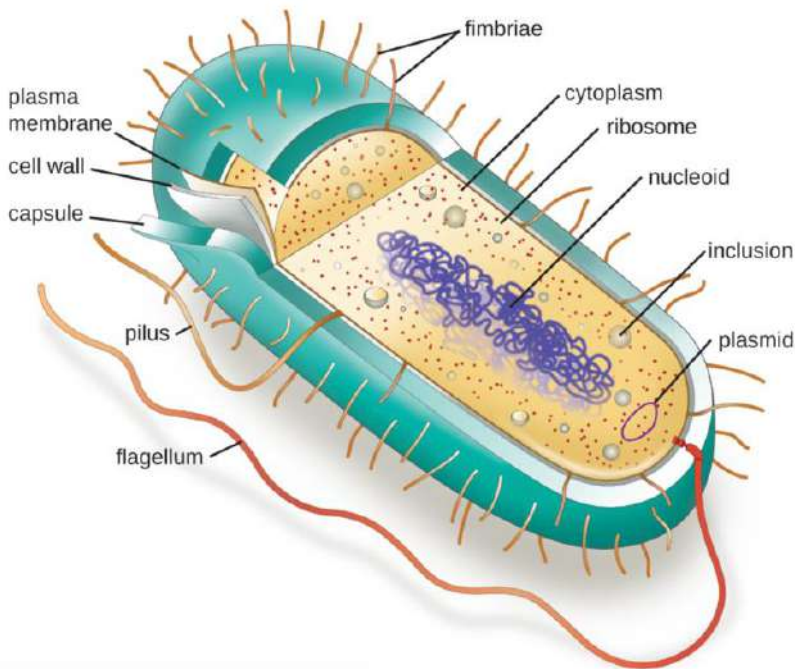
STRUKTUR MIKROORGANISME DAN UKURAN

Oleh Rizqi Yanuar Pauzi

Bergantung pada jenis sel yang dimiliki mikroorganisme, strukturnya berbeda. Sel mikroorganisme biasanya dibagi menjadi dua kategori: prokaryotik dan eukaryotik. Sel prokaryotik tidak memiliki nukleus dan struktur yang tertutupi membran. Sebaliknya, sel eukaryotik, yang berasal dari bahasa Yunani, eu (sejati) dan karyon (inti), memiliki nukleus dan struktur yang tertutupi membran. Sementara domain eukarya seperti fungi dan protista memiliki sel eukaryotik, domain archae dan bakteri memiliki sel prokaryotik. Sebagai mikroorganisme aseluler, virus memiliki struktur yang berbeda dari sel prokaryotik dan eukaryotik.

3.1 Bakteri

Bakteri merupakan sel prokaryotik yang hidup di berbagai lingkungan baik di daratan, perairan, manusia, hewan, tumbuhan dan lain sebagainya. Kondisi lingkungan yang berbeda-beda membuat bakteri memiliki struktur spesifik yang dapat beradaptasi dengan lingkungan yang ditempatinya. Struktur sel bakteri secara umum terdiri dari bagian eksternal seperti dinding sel, pili, flagellum, fimbriae, kapsul serta bagian interior seperti membran sel, sitoplasma, ribosom, nukleoid, inklusi, dan plasmid (Gambar 3.1).



Gambar 3.1. Struktur sel prokaryotik

Sumber: <https://openstax.org/books/microbiology/pages/3-3-unique-characteristics-of-prokaryotic-cells>

3.1.1 Flagellum

Flagellum, sebuah struktur granular di bawah membran sel di sitoplasma, berasal dari bagian dasar sel dan menyerupai rambut. Pergerakan sel bakteri dilakukan oleh flagellum. Flagellum terdiri dari tiga bagian dasar, termasuk struktur seperti kait dan seutas filamen yang panjang di luar dinding sel. Flagellum biasanya beberapa kali lebih panjang dari selnya, tetapi diameternya tetap jauh lebih kecil, kira-kira 10–20 nm. Flagellin adalah protein serat yang membentuk flagellum.

Banyak spesies bacillus dan spirillum memiliki flagellum. Struktur ini, bagaimanapun, jarang ditemukan pada bakteri kokus. Bakteri dengan flagellum diklasifikasikan dalam kelompok taksonomi berdasarkan pola pelekatan dan jumlah yang melekat. Sebagai contoh, genus *Pseudomonas* Monotrikus

memiliki flagellum yang terikat di ujung sel (*Pseudomonas* monotrikus atau lofotrikus), sedangkan genus *Escherichia* memiliki flagellum yang tersebar di sekitar sel (*Pseudomonas* peritrikus).

3.1.2 Pili

Banyak bakteri gram negatif memiliki struktur tambahan yang bukan flagella, seperti filamen. Struktur tambahan ini disebut pilus. Dibandingkan dengan flagella, pili lebih kecil, lebih pendek, dan lebih banyak. Pili juga hanya dapat dilihat dengan mikroskop elektron dan ditemukan pada spesies yang bergerak dan tidak bergerak, meskipun tidak mempengaruhi pergerakan. Tetapi pilus F, atau pilus seks, memungkinkan materi genetik bergerak selama perkawinan bakteri. Beberapa bakteri dapat melekat pada jaringan tumbuhan atau hewan yang memberikan nutrisi mereka dengan bantuan pili yang menempel pada permukaan.

3.1.3 Fimbriae

Fimbriae, struktur mikroskopis pada permukaan sel bakteri, yang memainkan peran utama dalam kemampuan bakteri untuk berikatan dengan permukaan lain, seperti sel-sel jaringan atau partikel makanan. Struktur ini dibentuk oleh protein-protein yang disebut pilin, fimbriae membentuk filamen kecil yang menonjol dari permukaan sel bakteri. Variasi dalam struktur pilin, yang memiliki sekuens asam amino yang beragam, dapat mempengaruhi sifat fungsional dan kemampuan bakteri untuk berinteraksi dengan lingkungan. Dengan ukuran yang sangat kecil, berkisar antara 2 hingga 10 nanometer dalam diameter, fimbriae memiliki bentuk serabut halus yang menonjol dari permukaan sel bakteri.

Secara fungsional, fimbriae berperan dalam adhesi atau penempelan, memungkinkan bakteri untuk melekat pada permukaan sel atau benda di sekitarnya. Selain itu, fimbriae juga berkontribusi pada pembentukan koloni atau biofilm, lapisan tipis yang terbentuk oleh bakteri yang melekat pada permukaan tertentu dan melibatkan produksi polimer ekstraseluler. Penggunaan fimbriae tidak hanya terbatas pada aspek struktural, melainkan juga

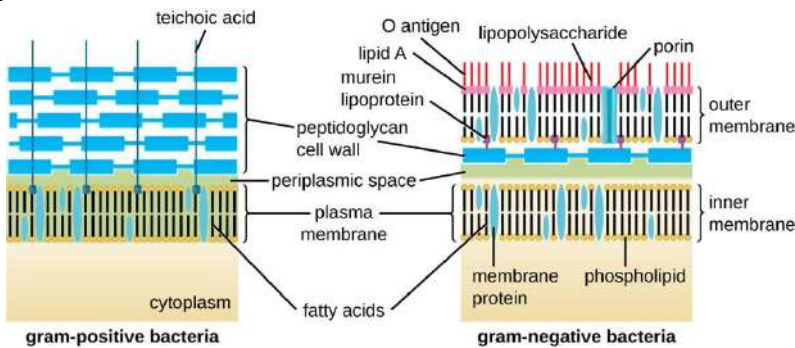
menjadi strategi patogen, di mana beberapa bakteri patogen mengandalkan fimbriae untuk melekat pada sel-sel host dan memulai infeksi. Selanjutnya, fimbriae dapat berperan dalam invasi sel-sel host, memungkinkan bakteri menembus dan menginfeksi jaringan dengan efektif.

3.1.4 Kapsul

Beberapa sel bakteri, seperti pneumokokus yang menyebabkan pneumonia, dikelilingi oleh lapisan lendir atau kapsul. Tempat di mana bakteri tumbuh sangat memengaruhi dimensi kapsul. Kapsul bakteri sangat penting untuk bertahan hidup dan berinteraksi dengan organisme lain. Kapsul berfungsi sebagai perlindungan dan penyimpanan nutrisi bagi bakteri. Sementara itu, pada bakteri yang menyebabkan penyakit, kapsul meningkatkan kemampuan bakteri untuk menyebabkan infeksi.

3.1.5 Dinding Sel

Bentuk sel ditentukan oleh struktur yang sangat kaku yang dikenal sebagai dinding sel, yang terletak di luar substansi ekstraselular seperti kapsul atau lendir dan di sebelah luar membran sitoplasma (Gambar 3.2). Semua bakteri, kecuali mikoplasma, memiliki dinding sel yang kaku; ketebalan dinding sel bakteri berkisar antara 10 hingga 35 nm. Dinding sel memainkan peran penting dalam pertumbuhan dan pembelahan sel.

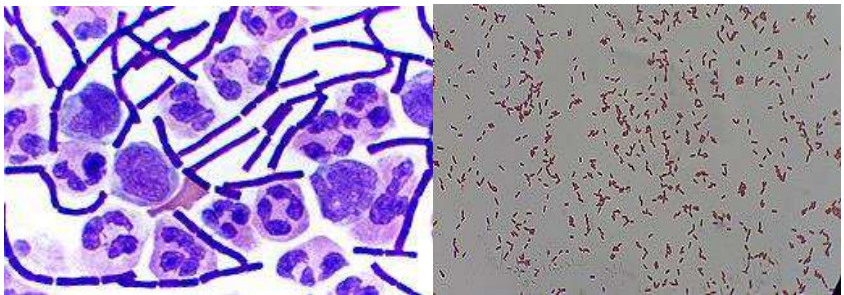


Gambar 3.2. Struktur dinding sel bakteri

Sumber:<https://openstax.org/books/microbiology/pages/3-3-unique-characteristics-of-prokaryotic-cells>

Peptidoglikan, suatu polimer yang besar yang terdiri dari unit berulang, bertanggung jawab atas kekakuan dinding sel. Tiga jenis bahan pembangun terdiri dari polimer ini: N-asetilglukosamin (NAG), asam N-asetilmuramat (NAM), dan (3) peptida yang terdiri dari empat atau lima asam amino: L-alanin, D-alanin, asam D-glutamat, dan lisin atau asam diaminopimelat. Selain itu, dinding sel yang utuh mengandung zat kimia lainnya, seperti asam tekoat, protein, lipoprotein, lipopolisakarida, dan polisakarida yang terikat pada peptidoglikan. Hanya prokariota yang mengandung peptidoglikan dan asam diaminopimelat, dua bahan lain yang membentuk dinding sel.

Bakteri gram positif dan gram negatif dibedakan berdasarkan struktur peptidoglikannya. Bakteri gram positif memiliki struktur peptidoglikan yang tebal, sedangkan bakteri gram negatif memiliki struktur peptidoglikan yang tipis. Selain itu, bakteri gram negatif memiliki membran luar yang terdiri dari lipoprotein, porin, dan lipopolisakarida (LPS). Lipid A di lapisan LPS berfungsi sebagai toksin bagi polisakarida inang dan O polisakarida yang berpecah. Pewarnaan gram dapat digunakan untuk menunjukkan perbedaan pada struktur peptidoglikan ini. Bakteri gram positif akan berwarna ungu, sedangkan bakteri gram negatif akan berwarna merah (Gambar 3.3).



Gambar 3.3. Hasil pewarnaan Gram bakteri

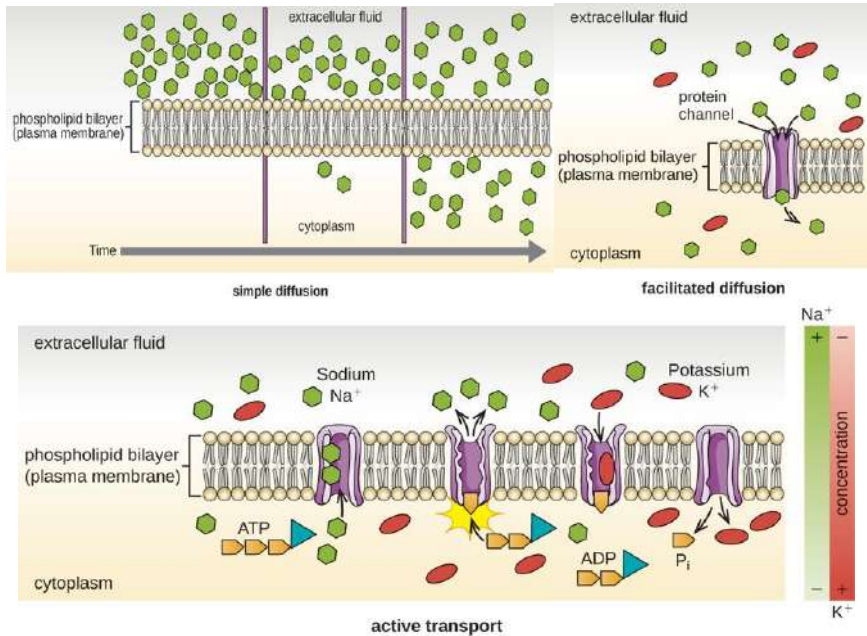
Sumber: https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Ajay_Kumar_Chaurasiya

3.1.6 Membran Sitoplasma

Terletak secara langsung di bawah dinding sel, terdapat sebuah membran tipis yang dikenal sebagai membran sitoplasma, juga disebut sebagai membran protoplasma atau secara sederhana disebut sebagai membran plasma. Membran sitoplasma memiliki peranan yang sangat penting dalam mengatur pergerakan substansi kimia dalam larutan, baik yang bergerak ke dalam sel maupun keluar dari sel. Membran sitoplasma juga berfungsi sebagai penyedia peralatan biokimia untuk mengangkut ion-ion mineral, gula, asam-asam amino, elektron, dan metabolit-metabolit lainnya melintasi membran. Substansi atau solut dalam larutan ini melewati membran melalui tiga mekanisme, yaitu difusi pasif, difusi terfasilitasi, dan transpor aktif (Gambar 3.4)

Membran sitoplasma, juga dikenal sebagai membran protoplasma atau membran plasma, terletak langsung di bawah dinding sel dan memainkan peran penting dalam mengatur pergerakan bahan kimia dalam larutan, baik yang masuk maupun keluar sel. Membran sitoplasma juga membantu proses biokimia mengangkut ion-ion mineral, gula, asam-asam amino, eletron, dan metabolit-metabolit lainnya.. Tiga proses berbeda digunakan substansi atau solut dalam larutan ini untuk melewati membran: difusi pasif, difusi terfasilitasi, dan transpor aktif (Gambar 3.4).

Difusi pasif, juga dikenal sebagai osmosis, adalah proses di mana solut bergerak melalui membran dari area berkonsentrasi tinggi ke area berkonsentrasi rendah. Dalam proses ini, tujuannya adalah untuk memastikan bahwa konsentrasi solut pada kedua bagian membran sama. Difusi terfasilitasi adalah ketika bahan kimia berpindah berdasarkan gradien konsentrasi dengan bantuan saluran protein. Transpor aktif, di sisi lain, bersifat spesifik, memperlakukan solut secara selektif, memungkinkan penumpukan solut di dalam sel dalam konsentrasi yang lebih besar daripada di luar sel.



Gambar 3.4. Mekanisme transpor melintasi membran

Sumber: <https://openstax.org/books/microbiology/pages/3-3-unique-characteristics-of-prokaryotic-cells>

3.1.7 Mesosom

Membran sitoplasma dapat membentuk struktur yang disebut mesosom dengan cara melipat ke dalam atau invaginasi ke dalam sitoplasma. Mesosom selalu terhubung dengan membran sitoplasma dan diyakini berperan dalam sintesis dinding sel serta pembelahan nukleus.

3.1.8 Sitoplasma dan Komponen Internal

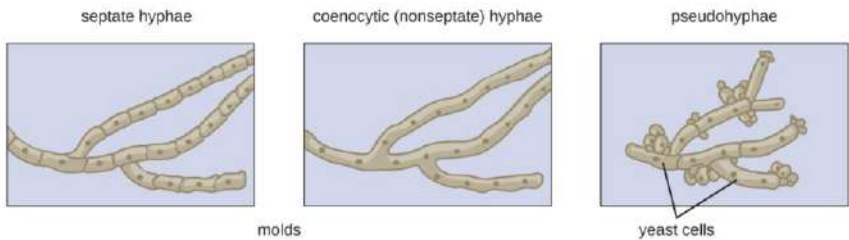
Tiga bagian utama membran sitoplasma terdiri dari bahan sel: (1) daerah sitoplasma, yang memiliki tampilan granular dan mengandung banyak RNA; (2) daerah nukleoid, yang mengandung banyak DNA; dan (3) daerah berisi air, yang mengandung nutrisi larut dan materi partikulat yang disebut tubuh inklusi. DNA dalam sel bakteri terletak dekat pusat sel dan terikat pada sistem membran mesosom. Ribosom adalah partikel RNA-protein yang berfungsi sebagai situs biosintesis

protein. Ribosom ditemukan pada sel prokariotik maupun eukariotik. Ini mencakup seluruh informasi genetik, atau genom bakteri, yang terdiri dari kromosom tunggal dan lingkaran tempat semua gen berada.

Tubuh inklusi adalah keadaan di mana berbagai bahan kimia dapat mengakumulasi dan membentuk granul dan globul di dalam sitoplasma. Sebagai contoh, beberapa spesies bakteri belerang memiliki kemampuan untuk mengumpulkan belerang dalam bentuk globul di dalam sitoplasma mereka. Polifosfat, lipid, glikogen, atau pati adalah tubuh inklusi lain yang ditemukan pada bakteri. Renjatan osmotik terjadi ketika dinding sel bakteri dihilangkan, dan sisa tubuhnya akan terbungkus oleh membran sitoplasma yang rapuh dan biasanya pecah karena perbedaan konsentrasi substansi terlarut di dalam dan di luar sel. Sebuah metode eksperimental telah digunakan untuk menghilangkan dinding sel bakteri tanpa menghancurkannya. Protoplasma adalah struktur hidup yang sebenarnya adalah isi sitoplasma yang dikelilingi oleh membran sitoplasma. Karena tidak memiliki dinding sel luar yang kaku, protoplasma memiliki bentuk bola.

3.2 Fungi

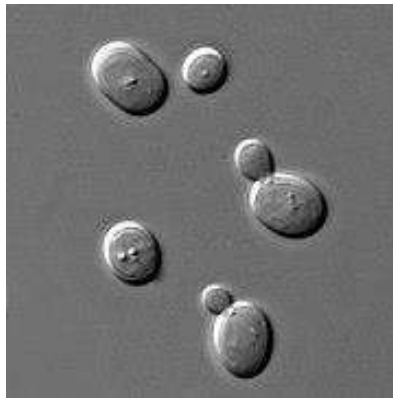
Fungi merupakan organisme heterotrof dan saprofit yang tersebar luas di berbagai lingkungan. Berdasarkan ukurannya, fungi terbagi menjadi 2 jenis yakni makroskopis fungi seperti jamur dan kapang serta mikroskopis fungi seperti *yeast* yang bersifat uniseluler. Kapang memiliki struktur multiseluler yang tersusun oleh filamen-filamen yang disebut *hyphae*. Kumpulan dari *hyphae* ini kemudian akan membentuk *mycelium* dan *thallus*. *Hyphae* yang terdapat dinding yang memisahkan antar sel disebut septate *hyphae* sedangkan struktur *hyphae* tanpa adanya dinding pemisah disebut *coenocytic hyphae*.



Gambar 3.5. Struktur fungi multiseluler

Sumber: https://openstax.org/books/microbiology/pages/5-3-fungi#OSC_Microbio_05_03_hyphae

Berbeda dengan fungi multiseluler, yeast merupakan fungi uniseluler sehingga tidak terdapat struktur *hyphae*. Reproduksi fungi secara aseksual dengan membentuk tunas (budding). Tunas yang terbentuk menyebabkan sel terkadang melekat bersamaan membentuk suatu struktur *pseudohyphae*.



Gambar 3.6. Struktur fungi uniseluler

Sumber: <https://commons.wikimedia.org/Masur>

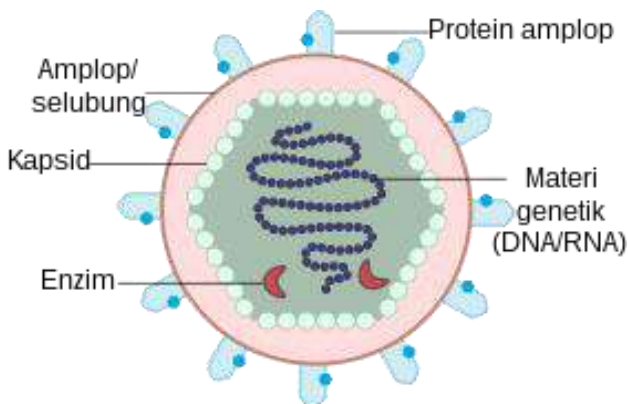
3.3 Virus

Virus adalah mikroorganisme yang sangat kecil, bahkan lebih kecil dari bakteri. Mikroorganisme ini tidak dapat hidup tanpa sel inang, seperti bakteri, jamur, hewan, dan tumbuhan. Oleh karena itu, virus sering disebut sebagai parasit intraseluler obligat, artinya virus hanya dapat hidup dalam sel inang.

Struktur tubuh virus berbeda dari mikroorganisme lainnya karena materi genetiknya dilindungi oleh kapsid.

Karakteristik virus adalah sebagai berikut: 1. Ukuran virus sangat kecil, hanya dapat dilihat dengan mikroskop elektron, dengan ukuran 0,05 μm hingga 0,2 μm . 2. Tubuh virus terdiri dari selubung dan materi genetik, yang dapat berupa DNA atau RNA. 3. Virus bersifat aseluler. 4. Virus dapat dikristalkan seperti benda mati. 5. Reproduksi virus hanya dapat terjadi dalam sel inang.

Asam deoksiribonukleat (DNA) atau asam ribonukleat (RNA) yang terdiri dari tubuh virus ditutupi oleh selubung protein yang disebut kapsid (Gambar 3.7). Bakteriofag adalah virus yang menginfeksi bakteri yang sering disebut sebagai fag. Tubuh virus bakteriofage terdiri dari kapsid, isi, dan ekor, dan beberapa virus memiliki bentuk huruf T, seperti virus bakteriofag.



Gambar 3.7. Struktur virus

Sumber: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:DEXi>

DAFTAR PUSTAKA

- Black, J. G., dan Black, L. J. 2015. *Microbiology: Principles and Applications*, 9thed. United State America: John Wiley.
- Parker, N., Schneegurt, M., Tu, A.T., Lister, P., & Forster, B. M. 2024. *Microbiology*. OpenStax.<https://openstax.org/details/books/microbiology>.
- Pelczar, M. J. E., Chan C. S. & Krieg N. R. 1993. *Microbiology concept and application*. Toronto: McGraw Hill Inc.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., dan Case, C. 2019. *Microbiology An Intoduction* ,13th ed., Boston: Pearson.
- Parker, N., Schneegurt, M., Tu, A.T., Lister, P., & Forster, B. M. 2024. *Microbiology*. OpenStax.<https://openstax.org/details/books/microbiology>.

BAB 4

PERTUMBUHAN MIKROORGANISME

Oleh Andi Indrawati

4.1 Pendahuluan

Keberadaan mikroorganisme di muka bumi ini sangat penting bagi kelangsungan hidup makhluk hidup lainnya. Mikroorganisme dikenal sebagai organisme berukuran kecil (mikro) yang relatif sulit untuk dapat dilihat secara kasatmata, tetapi hanya dapat dilihat dengan bantuan mikroskop. Mikroorganisme biasa juga disebut dengan mikroba, umumnya terdapat di dalam air, tanah, udara, dan juga di dalam tubuh makhluk hidup. Mikroorganisme ini akan banyak terdapat pada daerah-daerah atau tempat-tempat yang banyak mengandung nutrisi, serta suhu dan kelembaban yang cocok untuk pertumbuhan dan perkembangbiakannya. Peranan mikroorganisme dalam siklus kehidupan sangatlah vital, karena mikroorganisme memiliki dan menjalankan berbagai fungsi tertentu dalam lingkungan. Organisme yang digolongkan dalam mikroorganisme adalah bakteri, virus, jamur (fungi), alga mikroskopis, dan protozoa.

Mikroorganisme mengalami pertumbuhan dan perkembangbiakan dalam siklus hidupnya. Pertumbuhan mikroorganisme merupakan suatu proses biologis yang kompleks dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor, yang mengakibatkan semakin meningkatnya jumlah sel mikroba dalam suatu populasi. Peningkatan jumlah sel mikroba diikuti dengan perkembangbiakan, yang dapat terjadi secara aseksual maupun seksual, namun umumnya mikroba mengalami perkembangbiakan secara aseksual, seperti pembelahan biner. Berdasarkan jumlah sel penyusun tubuhnya, mikroorganisme dibedakan atas uniseluler (bersel tunggal) dan multiseluler (bersel banyak).

Pembelahan sel pada mikroorganisme uniseluler merupakan pertambahan jumlah individu, contohnya pada bakteri. Terjadinya proses pembelahan sel pada uniseluler hanya akan mengakibatkan

bertambahnya jumlah sel bakteri itu sendiri, artinya sel membelah dari satu sel menjadi dua sel, lalu dua sel menjadi empat sel, kemudian dari empat sel menjadi delapan sel, dan seterusnya, dengan rumus perhitungan 2^n (n =jumlah pembelahan). Sedangkan pada mikroorganisme multiseluler, pembelahan sel yang terjadi tidak akan mengakibatkan bertambahnya jumlah individu, tetapi berupa pembentukan jaringan atau bertambahnya ukuran sel, contohnya pada fungi. Hal yang harus diperhatikan dalam membahas pertumbuhan mikroba adalah membedakan antara pertumbuhan setiap individu sel dan kelompok sel atau populasi (Prayitno and Hidayati, 2017; Suryani and Taupiquurrahman, 2021).

Pertumbuhan mikroorganisme selain merupakan suatu proses biologis yang kompleks, penting juga dalam ekologi mikroba dan lingkungan, dalam bidang kesehatan serta industri makanan. Pertumbuhan ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, dan diperlukan pemahaman mendalam terhadap fenomena tersebut untuk mengelola mikroorganisme dengan efektif. Kondisi yang dapat mendukung atau menghambat pertumbuhan mikroba perlu dipahami lebih jauh karena penting untuk berbagai aplikasi, mulai dari produksi makanan hingga kontrol penyakit.

4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroorganisme

Berlangsungnya pertumbuhan mikroorganisme dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik faktor internal maupun eksternal. Faktor internal tersebut berhubungan dengan genom dan enzim-enzim yang berada di dalam sel mikroba, sedangkan faktor eksternal merupakan faktor-faktor yang berasal dari luar sel mikroba, meliputi: sumber nutrisi dan faktor lingkungan. Faktor eksternal berperan dalam mengaktifkan enzim-enzim pertumbuhan yang terdapat di dalam sel mikroba serta menjaga supaya sel tetap dalam kondisi baik (Prayitno and Hidayati, 2017). Pada bagian ini akan dibahas tentang faktor-faktor eksternal.

4.2.1 Sumber Nutrisi

Mikroorganisme membutuhkan ketersediaan nutrisi untuk pertumbuhannya. Kebutuhan nutrisi setiap mikroorganisme

berbeda-beda. Nutrisi adalah sebuah proses yang menggunakan substansi kimia yang disebut sebagai nutrien. Nutrien tersebut diperoleh dari lingkungan dan digunakan untuk proses biosintesis serta pembentukan energi, seperti proses metabolisme dan pertumbuhan sel. Jadi nutrisi ini berperan sebagai sumber energi dan bahan pembangun sel, serta sebagai akseptor elektron pada reaksi bioenergetik.

Pengelompokan mikroorganisme berdasarkan kebutuhan energinya terbagi atas:

1. Mikroorganisme Fototrof

Mikroorganisme ini biasa juga disebut mikroorganisme fotosintetik karena menggunakan energi cahaya untuk pertumbuhannya.

2. Mikroorganisme Kemotrof

Mikroorganisme ini menggunakan energi dari reaksi kimia untuk pertumbuhannya. Mikroorganisme kemotrof biasa juga disebut mikroorganisme kemosintetik.

Nutrien yang umumnya dibutuhkan oleh mikroorganisme dikelompokkan atas:

1. Makronutrien

Merupakan nutrien yang dibutuhkan oleh mikroba dalam jumlah banyak, seperti: karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Na), dan klorin (Cl).

2. Mikronutrien

Merupakan nutrien yang dibutuhkan oleh mikroba dalam jumlah terbatas atau sedikit, seperti: besi (Fe), mangan (Mn), kobalt (Co), molibdenum (Mo), seng (Zn), boron (B), nikel (Ni), tembaga (Cu), silika (Si), dan faktor tumbuh.

Unsur nutrisi tersebut memiliki peran dan fungsi masing-masing dalam fisiologi sel. Unsur-unsur ini berperan sebagai kation garam anorganik di dalam medium dengan jumlah yang berbeda-beda tergantung kebutuhan mikroba, misal pada golongan Diatom dan Alga tertentu membutuhkan silika (Si) sebagai penyusun dinding selnya, sedangkan pada golongan bakteri tertentu yang

hidup di laut, alga hijau biru, dan bakteri fotosintetik membutuhkan natrium (Na) dalam kadar yang agak tinggi.

Karbon merupakan kebutuhan yang paling utama dan paling penting dari semua struktur dan fungsi seluler. Nitrogen dibutuhkan sebagai penyusun makromolekul seluler, terutama protein-protein, asam nukleat, dan senyawa lainnya. Sulfur digunakan untuk menyusun beberapa asam amino penyusun protein dan juga sebagai pembentuk bagian struktur koenzim. Fosfat diperlukan sebagai komponen ATP, asam nukleat, dan koenzim-koenzim seperti NAD, NADP, dan flavin. Mineral dibutuhkan untuk pertumbuhan mikroba, walaupun dalam jumlah sedikit atau terbatas. Beberapa mineral dibutuhkan dalam proses aktivitas seluler, misal untuk mengatur aktivitas enzim, osmoregulasi, serta transpor elektron. Selain mineral, faktor tumbuh berupa senyawa organik juga dibutuhkan sebagai prekursor atau penyusun bahan sel.

Tersedianya kecukupan nutrisi tersebut merupakan faktor pendukung utama bagi pertumbuhan mikroorganisme, karena nutrisi dapat merangsang ataupun membatasi pertumbuhan mikroorganisme (Suryani and Taupiqurrahman, 2021; Faizal *et al.*, 2023).

4.2.2 Faktor Lingkungan

1. Suhu (Temperatur)

Suhu merupakan faktor kritis yang mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme. Di dalam habitat alaminya, mikroorganisme tidak mampu mengontrol suhu untuk pertumbuhannya, tetapi hanya bisa menyesuaikan diri terhadap kondisi lingkungan sekitarnya. Setiap jenis mikroba memiliki rentang suhu untuk pertumbuhannya, yang dibedakan atas:

- a. Suhu maksimum, adalah suhu tertinggi di mana mikroba dapat tumbuh dan metabolismenya dapat berlangsung.
- b. Suhu optimum, adalah suhu pertumbuhan mikroba yang berada diantara suhu maksimum dan suhu minimum, di mana pada suhu optimum merupakan fase tercepat terjadinya pertumbuhan dan metabolisme sel mikroba.

Suhu optimum dikatakan juga sebagai suhu terbaik untuk berlangsungnya pertumbuhan mikroorganisme.

- c. Suhu minimum, adalah suhu paling rendah di mana mikroba masih dapat tumbuh dan masih mampu menjalankan metabolismenya. Namun ketika mikroba berada pada suhu di atas suhu maksimum atau di bawah suhu minimumnya, maka pertumbuhan mikroba akan menjadi terhambat atau bahkan dapat mengalami kematian.

Mikroba juga dapat dikelompokkan berdasarkan kisaran suhu pertumbuhannya, yaitu:

- a. Mikroba Psikrofilik merupakan kelompok mikroba yang mampu tumbuh pada suhu rendah, yaitu -3°C dengan suhu optimumnya $10-20^{\circ}\text{C}$.
- b. Mikroba Mesofilik merupakan kelompok mikroba yang mampu tumbuh pada suhu minimum 15°C dengan suhu optimum $25-37^{\circ}\text{C}$ dan suhu maksimum $45-55^{\circ}\text{C}$.
- c. Mikroba Termofilik merupakan kelompok mikroba yang mampu bertahan hidup pada suhu tinggi $25-80^{\circ}\text{C}$ dengan suhu optimum $55-60^{\circ}\text{C}$.

2. Kelembapan

Lingkungan yang lembap mendukung pertumbuhan mikroba, di mana kelembapan yang tinggi akan menciptakan kondisi ideal untuk metabolisme sel atau aktivitas biologis mikroba, sementara jika kekurangan air maka dapat menghambat pertumbuhan mikroba. Kebutuhan akan kelembapan bervariasi antar jenis mikroba. Beberapa mikroba memerlukan lingkungan yang lembab, sementara mikroba yang dapat membentuk spora, konidia ataupun membentuk kista mampu bertahan dalam kondisi yang lebih kering.

3. pH (Tingkat Keasaman)

Kondisi keasaman atau kebasaan (pH) lingkungan juga mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme. Setiap jenis mikroba mempunyai kisaran pH optimal untuk pertumbuhannya, karena pada umumnya sel mikroba akan rusak jika berada pada pH yang terlalu asam atau terlalu basa. Umumnya mikroba menyukai pH netral (pH 7) untuk

pertumbuhannya. Jika konsentrasi ion hidrogen mengalami peningkatan ataupun penurunan, maka akan mengakibatkan ionisasi gugus dalam protein, karboksilat, dan amino, sehingga menyebabkan terjadinya denaturasi protein, akibatnya pertumbuhan sel menjadi terganggu. Berdasarkan kemampuan mikroba dalam mentoleransi kadar asam ataupun basa, maka mikroba dibedakan atas:

- a. Mikroba asidofil, yaitu mikroba yang dapat tumbuh pada kisaran pH optimum 1,0 hingga pH 5,4.
- b. Mikroba neutrofil, yaitu mikroba yang dapat tumbuh pada kisaran pH optimum 5,5 hingga pH 8,0.
- c. Mikroba alkalofil, yaitu mikroba yang dapat tumbuh pada kisaran pH optimum 8,5 hingga pH 11,5.

4. Oksigen

Oksigen merupakan salah faktor penting yang dibutuhkan oleh sebagian besar mikroba untuk tumbuh. Mikroorganisme obligat aerob merupakan organisme yang mutlak membutuhkan oksigen untuk pertumbuhannya, contoh: *Pseudomonas*. Namun ada juga yang bersifat anaerob, yaitu mikroorganisme yang dapat tumbuh tanpa oksigen, contoh: *Clostridium botulinum*. Beberapa mikroorganisme bersifat fakultatif, yang dapat hidup baik secara aerob maupun anaerob, atau dapat tumbuh baik dengan atau tanpa oksigen. Sedangkan mikroba yang dapat tumbuh pada jumlah oksigen sedikit disebut mikroaerofil, contoh: *Campylobacter*.

5. Tekanan Osmotik

Tekanan osmotik merupakan salah satu faktor yang dapat menghambat pertumbuhan sel mikroba. Jika sel berada di lingkungan yang hiperosmotik, sel akan kehilangan air hingga menyebabkan membran sel mikroba akan terlepas dari dinding sel, akibatnya sel mengalami plasmolisis. Kondisi ini menyebabkan proses metabolik menjadi tidak aktif dan lama kelamaan sel akan mengalami kematian. Sebaliknya, jika sel berada pada kondisi lingkungan yang hipoosmotik, maka air akan masuk ke dalam sel dan lama kelamaan akan mengakibatkan sel menjadi pecah atau mengalami lisis (Padoli, 2016; Prayitno and

Hidayati, 2017; Suryani and Taupiqurrahman, 2021; Faizal *et al.*, 2023).

4.3 Waktu Generasi

Setiap sel mikroba membutuhkan waktu untuk membelah diri menjadi dua kali lipat, yaitu dari satu sel menjadi dua sel anak dengan sempurna, yang disebut dengan waktu generasi. Waktu generasi untuk setiap mikroba berbeda tergantung dari jenisnya, misalnya waktu generasi untuk *Escherichia coli* membutuhkan waktu 15-20 menit, sedangkan waktu generasi *Mycobacterium leprae* membutuhkan waktu sekitar 20 hari.

Untuk menghitung waktu generasi mikroba dapat digunakan rumus berdasarkan pola pertumbuhan eksponensial pada pembelahan biner:

$$G = \frac{t \log 2}{\log Bt - \log Bo}$$

Keterangan:

G = waktu generasi

t = selang waktu antara pengukuran jumlah sel mikroba awal dan jumlah sel mikroba setelah selang waktu tertentu

$\log 2 = 0,301$

Bo = jumlah sel mikroba awal

Bt = jumlah sel mikroba setelah selang waktu t (Hafsari, 2020)

Contoh:

Diketahui: Bo = $2,62 \times 10^6$ sel setiap ml

Bt = $4,73 \times 10^7$ sel setiap ml

T = 130 menit

$\log 2 = 0,301$

Waktu generasi dapat dihitung:

$$G = \frac{t \log 2}{\log Bt - \log Bo} = \frac{130 \times 0,301}{7,67 - 6,42} = 31,3 \text{ menit}$$

maka waktu generasi sel mikroba adalah 31,3 menit.

Ketersediaan faktor-faktor pertumbuhan mikroba, seperti: nutrisi, oksigen, pH, air, dan faktor pertumbuhan lainnya juga sangat mempengaruhi lama atau tidaknya waktu generasi. Jika faktor-faktor pertumbuhan tersebut terdapat dalam kondisi optimum untuk pembelahan sel, maka akan diperoleh jumlah populasi mikroba yang cukup banyak dalam waktu tertentu (Boleng Didimus Tanah, 2015).

4.4 Fase Pertumbuhan Mikroorganisme

Secara umum pola pertumbuhan mikroorganisme dapat ditunjukkan dengan kurva pertumbuhan yang memperlihatkan siklus pertumbuhan mikroorganisme secara keseluruhan dari setiap tahapan atau fase yang dialami (Zulaika, 2018).

Adapun tahapan pertumbuhan mikroorganisme terdiri atas 4 fase, yaitu:

1. Fase Laten (Lag)

Fase ini dikenal juga sebagai fase adaptasi atau fase lamban, di mana pada awal pertumbuhan mikroorganisme terjadi penyesuaian diri terhadap lingkungan baru. Namun demikian tidak semua mikroorganisme dapat bertahan di fase ini, karena tidak mampu menyesuaikan diri dengan lingkungan barunya sehingga sebagian sel akan mati. Selama fase ini berlangsung, terjadi penyesuaian seluler tanpa peningkatan signifikan dalam jumlah populasi. Fase ini merupakan tahap persiapan di mana mikroorganisme mempersiapkan diri untuk melakukan pertumbuhan aktif. Aktivitas metabolisme sel akan menentukan lama waktu berlangsungnya fase ini.

2. Fase *Logarithmic* atau *Exponential* (Log)

Fase ini ditandai oleh pertumbuhan aktif dari mikroba secara eksponensial atau terjadinya pembelahan sel secara cepat dan berlangsung dengan stabil, di mana waktu generasinya pendek dan konstan. Jumlah populasi mikroba meningkat dengan cepat selama periode ini, di mana pada populasi terjadi penggandaan jumlah secara teratur, serta pada grafik akan naik dalam garis lurus pada skala logaritmik. Pada fase ini, energi yang dibutuhkan oleh mikroba untuk

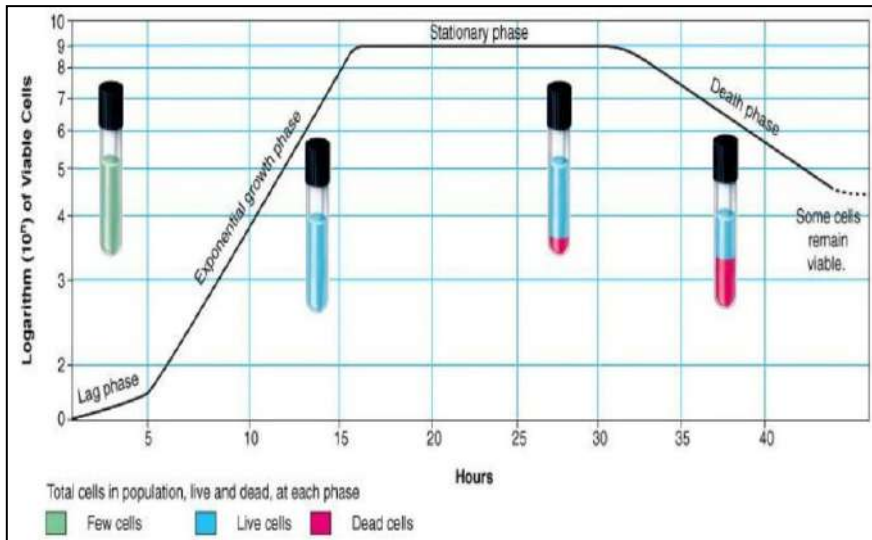
pembelahan selnya juga lebih banyak dibandingkan dengan fase lainnya. Faktor kecukupan nutrisi, pH yang sesuai, serta kelembapan sangat mempengaruhi kecepatan berlangsungnya pertumbuhan sel pada fase ini.

3. Fase *Stasioner* (Tetap)

Pada titik tertentu, sumber daya yang terbatas atau akumulasi produk limbah dapat memperlambat pertumbuhan mikroba. Pada fase ini, jumlah individu baru yang terbentuk sebanding dengan yang jumlah sel yang mati atau tidak aktif, sehingga fase ini dikenal sebagai fase tetap. Pertumbuhan mikroba mencapai batas daya dukung lingkungan, di mana jumlah nutrisi penting jumlahnya semakin berkurang dan hasil akhir metabolisme mikroba yang bersifat toksik telah menumpuk di dalam media, sehingga jumlah sel yang hidup seimbang dengan jumlah sel yang mati.

4. Fase *Death* (Kematian)

Pada fase kematian mikroba mengalami penurunan jumlah populasi. Hal ini disebabkan oleh kondisi lingkungan yang terus memburuk dan semakin berkurangnya jumlah nutrisi, serta hasil metabolisme yang bersifat racun jumlahnya semakin meningkat, sehingga tidak mendukung lagi untuk berlangsungnya pembelahan sel. Akibat kondisi tersebut menyebabkan jumlah sel mikroba yang hidup mengalami penurunan, sebaliknya jumlah sel yang mati menjadi meningkat. Namun demikian penurunan jumlah sel yang hidup tidak sampai pada titik nol, karena pada jumlah minimum tertentu masih terdapat sel mikroba yang mampu bertahan hidup lama di dalam media (Boleng Didimus Tanah, 2015; Padoli, 2016; Suryani and Taupiqurrahman, 2021; Faizal *et al.*, 2023).



Gambar 4.1. Kurva Pertumbuhan Mikroba

(Sumber : <https://image.slidesharecdn.com/03-151202083651-lva1-app6891/95/mikrobiologi-pertumbuhan-mikroba-18-1024.jpg?cb=1449045609>)

4.5 Metode Pengukuran Pertumbuhan Mikroorganisme

Pertumbuhan mikroorganisme diukur dari perubahan jumlah sel atau berat kering massa sel. Metode yang sering digunakan untuk mengukur pertumbuhan mikroorganisme adalah menentukan jumlah sel hidup yang dilakukan dengan cara menghitung jumlah koloni mikroba pada pelat agar dan menentukan jumlah massa sel baik secara langsung maupun tidak langsung. Metode untuk penghitungan jumlah sel menggunakan metode hitungan mikroskopis dengan bantuan alat hemositometer (*microscopic count method*) yang dapat digunakan untuk menghitung spora, khamir, atau sel-sel mikroba dengan ukuran yang relatif lebih besar dari bakteri, metode hitungan cawan (*plate count method*) yang melibatkan pengenceran berseri lalu di tuangkan ke media agar padat, dan metode *most-probable number* (MPN) yang menggunakan medium cair. Untuk penghitungan massa sel secara langsung dapat dilakukan dengan

menggunakan metode gravimetri, metode volumetri, dan metode turbidimetri (menggunakan Spektrofotometer). Sedangkan metode yang digunakan untuk penghitungan massa sel secara tidak langsung dapat dilakukan dengan analisis komponen sel (DNA, protein, ATP, dan lainnya), analisis produk metabolit (baik primer maupun sekunder), dan analisis konsumsi nutrisi (Fifendy, 2017; Suryani and Taupiqurrahman, 2021; Faizal *et al.*, 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Boleng Didimus Tanah (2015) *Bakteriologi Konsep-Konsep Dasar*. 1st edn. Malang: UMM Press. Available at: <http://ummpress.umm.ac.id>.
- Faizal, M. *et al.* (2023) *Mikrobiologi lingkungan*. 1st edn. Padang Sumatera Barat: PT Global Eksekutif Teknologi.
- Fifendy, M. (2017) *Mikrobiologi*. 1st edn. Jakarta: KENCANA.
- Hafsari, A. R. (2020) *Mikrobiologi Dasar*. 1st edn. Bandung: PT Remaja Rosdakarya.
- Padoli (2016) *Mikrobiologi dan Parasitologi Keperawatan*. Jakarta Selatan: Pusdik SDM Kesehatan, Kementerian Kesehatan RI.
- Prayitno, T. A. and Hidayati, N. (2017) *Pengantar Mikrobiologi*. Malang: Media Nusa Creative.
- Suryani, Y. and Taupiqurrahman, O. (2021) *Mikrobiologi dasar*. 1st edn. Bandung: LP2M UIN SGD Bandung.
- Zulaika, N. W. E. (2018) 'Perbandingan Pertumbuhan Bakteri Selulolitik Pada Media Nutrient Broth dan Carboxy Methyl Cellulose', 7(2), pp. 7–9.

BAB 5

PENGAMATAN MIKROORGANISME

Oleh Rina Hidayati Pratiwi

5.1 Pendahuluan

Pengamatan mikroorganisme adalah suatu kegiatan penting dalam dunia ilmu mikrobiologi yang bertujuan untuk memahami struktur, perilaku, dan karakteristik mikroorganisme. Mikroorganisme merupakan organisme yang tidak dapat dilihat dengan mata manusia secara langsung, melainkan memerlukan bantuan alat mikroskop untuk mengamati dengan lebih jelas. Dalam pengamatan mikroorganisme, kita dapat mengeksplorasi dunia kecil ini dan memperoleh wawasan yang mendalam tentang berbagai jenis makhluk hidup mikroskopis.

Pentingnya pengamatan mikroorganisme mencakup beberapa aspek, antara lain:

1. Keanekaragaman Mikroorganisme: Mikroorganisme mencakup bakteri, virus, fungi, dan protista. Pengamatan membantu ilmuwan dan peneliti mengidentifikasi serta memahami keberagaman mikroorganisme ini, yang sangat penting untuk pengembangan berbagai bidang ilmu seperti kedokteran, pertanian, dan industri.
2. Penelitian Kesehatan: Dalam dunia kedokteran, pengamatan mikroorganisme sangat krusial untuk mendiagnosis penyakit infeksi. Melalui mikroskop, dokter dapat mengidentifikasi patogen seperti bakteri dan fungi yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia.
3. Ekologi Mikroba: Pengamatan mikroorganisme membantu dalam memahami peran mereka dalam ekosistem. Mikroorganisme memiliki peran penting dalam siklus biogeokimia, dekomposisi bahan organik, dan pembentukan tanah.
4. Industri dan Bioteknologi: Dalam industri pangan, minuman, farmasi, dan sektor-sektor lainnya, pengamatan

mikroorganisme membantu dalam mengoptimalkan proses produksi dan memastikan kontrol kualitas. Selain itu, mikroorganisme dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi bioteknologi seperti produksi insulin rekombinan atau enzim industri.

5. Penelitian Ilmiah: Pengamatan mikroorganisme adalah langkah awal dalam penelitian ilmiah yang lebih luas. Memahami struktur dan perilaku mikroorganisme dapat membuka pintu untuk penemuan-penemuan baru dan pemahaman lebih dalam tentang kehidupan mikroskopis.

Dalam melakukan pengamatan mikroorganisme, penting untuk menggunakan teknik-teknik yang tepat, termasuk penggunaan mikroskop dengan resolusi tinggi dan pewarnaan yang sesuai. Selain itu, standar kebersihan dan sterilisasi juga sangat kritis untuk mencegah kontaminasi selama pengamatan. Dengan melakukan pengamatan mikroorganisme secara hati-hati, kita dapat mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang dunia mikroskopis yang memengaruhi berbagai aspek kehidupan kita.

5.2 Pengamatan Mikroorganisme

Pengamatan mikroorganisme melibatkan penggunaan mikroskop atau teknik pengamatan lainnya untuk mengamati dan memahami sifat-sifat mikroskopis dari makhluk hidup yang tidak dapat dilihat dengan mata manusia. Berikut adalah langkah-langkah umum yang terlibat dalam pengamatan mikroorganisme:

1. **Persiapan Sampel:**
Kumpulkan sampel mikroorganisme yang ingin diamati. Ini bisa berupa kultur bakteri, spesimen jaringan, atau bahkan air atau tanah.
Persiapkan sampel dengan cara fiksasi atau pewarnaan untuk meningkatkan kontras dan memungkinkan pengamatan yang lebih baik di bawah mikroskop.
2. **Pemilihan Mikroskop yang Sesuai:**
Pilih jenis mikroskop yang sesuai untuk keperluan pengamatan. Mikroskop cahaya umumnya digunakan untuk melihat bakteri,

- fungi, dan protista, sementara mikroskop elektron digunakan untuk memeriksa struktur internal dengan resolusi lebih tinggi.
3. **Penyetelan Mikroskop:**
Atur tingkat pembesaran yang diinginkan.
Fokus mikroskop sehingga sampel terlihat tajam dan jelas.
 4. **Pengamatan Visual:**
Perhatikan struktur dan karakteristik mikroorganisme di bawah mikroskop.
Amati pergerakan, morfologi (bentuk), ukuran, dan distribusi sel atau struktur lainnya.
 5. **Dokumentasi:**
Ambil catatan atau dokumentasikan hasil pengamatan.
Pengamatan ini dapat diperkuat dengan foto atau sketsa mikroorganisme yang diamati.
 6. **Analisis dan Interpretasi:**
Analisis hasil pengamatan untuk mendapatkan pemahaman lebih mendalam tentang sifat-sifat mikroorganisme.
Identifikasi spesies dan peran biologis mikroorganisme tersebut, jika mungkin.
 7. **Kebersihan dan Sterilisasi:**
Pastikan perlengkapan dan area kerja steril untuk mencegah kontaminasi.
Gunakan teknik aseptik saat menangani kultur mikroorganisme untuk memastikan keakuratan pengamatan.
 8. **Penggunaan Pewarnaan (jika diperlukan):**
Pewarnaan dapat meningkatkan kontras dan membantu mengidentifikasi struktur seluler dengan lebih baik. Pewarnaan Gram, metode Ziehl-Neelsen untuk asam-alcohol resistancy (AAR), dan pewarnaan dengan tinta India adalah contoh pewarnaan yang umum digunakan.
 9. **Keamanan:**
Selalu patuhi prosedur keamanan laboratorium saat bekerja dengan mikroorganisme patogen atau berbahaya.
Kenali risiko potensial dan terapkan langkah-langkah keamanan yang sesuai.

Penting untuk selalu menjaga kebersihan dan akurasi selama proses pengamatan mikroorganisme agar hasilnya dapat diandalkan dan bermanfaat dalam konteks penelitian atau aplikasi praktis.

5.2.1 Persiapan Sampel

Persiapan sampel dalam pengamatan mikroorganisme adalah langkah kunci untuk memastikan hasil pengamatan yang akurat dan bermakna. Berikut adalah langkah-langkah umum yang terlibat dalam persiapan sampel untuk pengamatan mikroorganisme:

1. **Pemilihan Sampel:**
Pilih sampel yang representatif dari lingkungan atau organisme yang ingin diamati.
Pastikan bahwa sampel yang digunakan sesuai dengan tujuan pengamatan, apakah itu untuk mengidentifikasi bakteri, jamur, atau jenis mikroorganisme lainnya.
2. **Pengambilan Sampel:**
Ambil sampel dengan menggunakan alat steril seperti spatula, swab, atau pipet steril.
Pastikan pengambilan sampel dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kontaminasi dari lingkungan sekitarnya.
3. **Penyiapan dan Fiksasi Sampel:**
Untuk pengamatan mikroskopis, fiksasi sampel mungkin diperlukan. Ini melibatkan penggunaan zat fiksatif seperti metanol atau formalin untuk mempertahankan struktur sel mikroorganisme.
Proses fiksasi membantu mencegah kerusakan sel dan mempertahankan struktur selama pengamatan mikroskopis.
4. **Pewarnaan (Jika Diperlukan):**
Pewarnaan dapat meningkatkan kontras dan memungkinkan identifikasi yang lebih baik. Penggunaan pewarna seperti Gram stain atau methylene blue dapat membantu membedakan jenis-jenis mikroorganisme.
Pewarnaan harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari distorsi struktural dan warna yang tidak akurat.
5. **Pembuatan Preparat Sederhana:**

Untuk pengamatan di bawah mikroskop cahaya, sampel seringkali ditempatkan di antara dua kaca objek dan disiapkan sebagai preparat sederhana.

Cairan penutup seperti air atau larutan garam sering digunakan untuk menghilangkan gelembung udara dan memberikan kontak yang baik antara mikroskop dan sampel.

6. Pembuatan Sediaan Tanah Lapang (Smear):

Beberapa sampel, terutama untuk pengamatan bakteri, mungkin memerlukan pembuatan sediaan tanah lapang. Ini melibatkan penyebaran tipis sampel di atas objek glass atau slide.

7. Kontrol Kontaminasi:

Selalu pastikan bahwa alat dan bahan yang digunakan steril.

Hindari kontaminasi silang antara sampel dan hindari kontak dengan mikroorganisme lain yang tidak terkait.

8. Penyesuaian Mikroskop:

Sesuaikan mikroskop dengan benar untuk mendapatkan hasil yang optimal. Atur resolusi, fokus, dan pencahayaan sesuai dengan jenis mikroorganisme yang diamati.

9. Pengamatan Mikroskopis:

Letakkan preparat di bawah mikroskop dan amati dengan pembesaran yang sesuai.

Catat hasil pengamatan dan lakukan analisis sesuai dengan tujuan pengamatan.

Proses ini dapat bervariasi tergantung pada jenis mikroorganisme dan tujuan pengamatan. Namun, langkah-langkah ini memberikan panduan umum untuk mempersiapkan sampel dalam pengamatan mikroorganisme.

5.2.2 Pemilihan Mikroskop yang Sesuai

Pemilihan mikroskop yang sesuai untuk keperluan pengamatan tergantung pada tujuan pengamatan, jenis mikroorganisme atau bahan yang akan diamati, serta tingkat detail yang diinginkan. Berikut adalah beberapa jenis mikroskop dan pertimbangan yang dapat membantu Anda memilih mikroskop yang sesuai:

1. Mikroskop Cahaya (*Light Microscope*):
Tujuan Pengamatan: Cocok untuk pengamatan sel dan struktur mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan protista.
Kelebihan: Mudah digunakan, harga terjangkau, dapat memberikan gambaran umum tentang morfologi sel.
Keterbatasan: Resolusi terbatas, tidak cocok untuk pengamatan detail tinggi.
2. Mikroskop Fluoresensi:
Tujuan Pengamatan: Ideal untuk pengamatan mikroorganisme yang diwarnai dengan pewarna fluoresen.
Kelebihan: Sensitif, memberikan kontras tinggi, memungkinkan identifikasi molekuler.
Keterbatasan: Lebih mahal dan memerlukan persiapan sampel khusus.
3. Mikroskop Elektron (*Electron Microscope*):
Tujuan Pengamatan: Digunakan untuk pengamatan struktur internal dan detail tinggi, cocok untuk mikroorganisme, virus, dan sel yang sangat kecil.
Kelebihan: Resolusi tinggi, mampu melihat detail hingga tingkat molekuler.
Keterbatasan: Mahal, kompleks dalam penggunaan dan pemeliharaan, memerlukan persiapan sampel khusus, tidak dapat mengamati sel hidup.
4. Mikroskop Confocal:
Tujuan Pengamatan: Bagus untuk pengamatan tiga dimensi dan lapisan tebal sampel biologis.
Kelebihan: Memberikan gambar tiga dimensi yang sangat terperinci.
Keterbatasan: Harganya tinggi, kompleksitas pengoperasian, memerlukan pewarna fluoresen.
5. Mikroskop Fase Kontras (*Phase-Contrast Microscope*):
Tujuan Pengamatan: Cocok untuk pengamatan sel hidup dan struktur lembut tanpa pewarnaan.
Kelebihan: Memperkuat kontras dalam sel hidup tanpa merusak struktur.
Keterbatasan: Tidak memberikan detail tinggi seperti mikroskop elektron.

6. Mikroskop Stereoskop (*Stereomicroscope*):

Tujuan Pengamatan: Ideal untuk pengamatan objek besar atau sampel tiga dimensi seperti serangga, tumbuhan, atau jaringan biologis.

Kelebihan: Memberikan pandangan tiga dimensi, dapat digunakan tanpa persiapan sampel khusus.

Keterbatasan: Resolusi rendah dibandingkan dengan mikroskop cahaya.

Pemilihan mikroskop juga harus mempertimbangkan budget, kemampuan pengguna, dan persyaratan teknis spesifik yang mungkin diperlukan untuk pengamatan tertentu. Jika mungkin, berkonsultasilah dengan ahli mikroskopi atau ilmuwan mikrobiologi untuk memastikan bahwa mikroskop yang dipilih sesuai dengan kebutuhan Anda.

5.3 Pembuatan Preparat Mikroorganisme

Pembuatan preparat mikroskopis adalah langkah penting dalam pengamatan mikroorganisme di bawah mikroskop. Berikut adalah panduan langkah demi langkah untuk membuat preparat mikroskopis:

Alat dan Bahan yang Diperlukan:

1. Sampel mikroorganisme: Bakteri, jamur, atau protista yang ingin diamati.
2. Objek glass atau slide: Tempat untuk menempatkan sampel.
3. Kaca penutup: Digunakan untuk menutup sampel dan mencegah pengeringan.
4. Alat steril: Spatula, loop, atau pipet steril untuk mengambil dan menempatkan sampel.
5. Zat fiksatif: Seperti metanol atau formalin, jika diperlukan.
6. Pewarna: Jika diperlukan untuk meningkatkan kontras.

Langkah-langkah Pembuatan Preparat Mikroskopis:

1. Persiapan Sampel:

Jika sampel hidup, pastikan untuk mengambil sampel dengan alat steril untuk menghindari kontaminasi.

Jika perlu, gunakan zat fiksatif untuk mempertahankan struktur sel, terutama untuk mikroorganisme yang rapuh.

2. Fiksasi (Opsional):

Teteskan sejumlah kecil zat fiksatif pada sampel dan biarkan meresap.

Fiksasi membantu mempertahankan struktur sel dan mencegah perubahan selama proses preparasi.

3. Pembuatan Sediaan Tanah Lapang (*Smear*):

Letakkan sejumlah kecil sampel pada objek glass.

Gunakan spatula, loop, atau pipet untuk meratakan sampel, membentuk lapisan tipis (*smear*).

4. Pewarnaan (Opsional):

Jika perlu, aplikasikan pewarna pada sampel untuk meningkatkan kontras. Pastikan untuk mengikuti petunjuk pewarnaan yang digunakan.

Biarkan pewarna meresap selama beberapa menit dan kemudian bilas berlebihan dengan air steril jika diperlukan.

5. Penutup dengan Kaca Penutup:

Ambil kaca penutup dengan pinset atau alat penjepit steril.

Letakkan kaca penutup pada sudut yang mendekati permukaan sampel, biarkan turun perlahan untuk menghindari gelembung udara.

6. Pemeriksaan dan Pengamatan:

Pastikan tidak ada gelembung udara yang terperangkap di bawah kaca penutup.

Periksa sampel di bawah mikroskop menggunakan pembesaran yang sesuai.

7. Penyimpanan (Opsional):

Jika perlu, pastikan untuk menyimpan preparat mikroskopis dengan baik untuk pemeliharaan jangka panjang.

8. Kebersihan dan Sterilisasi:

Setelah digunakan, bersihkan alat dan peralatan dengan hati-hati.

Pastikan untuk menjaga kebersihan dan sterilisasi untuk menghindari kontaminasi.

Dengan mengikuti langkah-langkah ini dengan hati-hati, Anda dapat membuat preparat mikroskopis yang baik dan siap untuk pengamatan mikroorganisme di bawah mikroskop. Selalu perhatikan kebersihan dan hindari kontaminasi selama proses ini untuk memastikan hasil yang dapat diandalkan.

5.4 Penyiapan dan Fiksasi Sampel

Penyiapan dan fiksasi sampel adalah langkah penting dalam pembuatan preparat mikroskopis untuk pengamatan mikroorganisme. Berikut adalah langkah-langkah umum yang dapat Anda ikuti:

Penyiapan Sampel:

1. **Pilih Sampel yang Representatif:**
Pilih mikroorganisme atau struktur sel yang akan diamati. Pastikan sampel yang diambil mencerminkan kondisi asli atau situasi yang ingin Anda teliti.
2. **Pengambilan Sampel:**
Gunakan alat pengambilan sampel steril seperti swab, pipet, atau spatula.
Pastikan alat yang digunakan steril untuk menghindari kontaminasi.
3. **Penyebaran Sampel (Jika Diperlukan):**
Untuk pengamatan bakteri, lakukan penyebaran (smear) pada objek glass atau slide. Ambil sedikit sampel dan ratakan dengan hati-hati untuk mendapatkan lapisan tipis.
4. **Fiksasi Cepat (Jika Diperlukan):**
Jika Anda ingin mempertahankan struktur sel yang sebenarnya, gunakan fiksasi cepat. Celupkan objek glass berisi sampel ke dalam larutan fiksatif seperti metanol selama beberapa detik.
5. **Pembuatan Sediaan Tanah Lapang (Jika Diperlukan):**
Beberapa sampel, terutama bakteri, mungkin memerlukan teknik sediaan tanah lapang. Oleskan sedikit sampel di tengah objek glass dan biarkan mengering.

Fiksasi Sampel:

1. Pilih Metode Fiksasi yang Sesuai:

Metode fiksasi bervariasi tergantung pada jenis mikroorganisme dan tujuan pengamatan. Metode umum melibatkan penggunaan zat fiksatif seperti:

Metanol: Fiksasi cepat, cocok untuk mikroorganisme yang rentan terhadap perubahan.

Formalin: Fiksasi yang lebih lambat, tetapi dapat mempertahankan struktur sel dengan baik.

Larutan Lugol: Cocok untuk fiksasi dan pewarnaan pada mikroorganisme tertentu seperti amoeba atau algae.

2. Proses Fiksasi:

Celupkan sampel dalam larutan fiksatif, pastikan seluruh sampel terendam.

Waktu fiksasi dapat bervariasi, bergantung pada metode yang digunakan.

3. Pewarnaan (Opsional):

Jika diperlukan, lakukan pewarnaan setelah fiksasi untuk meningkatkan kontras dan membedakan struktur sel.

Pewarnaan dapat melibatkan penggunaan pewarna seperti Giemsa, Crystal Violet, atau Metilen Biru.

4. Bilas (Opsional):

Setelah fiksasi dan pewarnaan, bilas sampel dengan air untuk menghilangkan sisa pewarna atau zat fiksatif yang berlebihan.

5. Diamankan dengan Kaca Penutup:

Letakkan kaca penutup di atas sampel dengan hati-hati untuk mencegah pembentukan gelembung udara.

Pastikan kaca penutup terletak merata untuk mendapatkan hasil yang baik.

Setelah sampel siap, preparat dapat dilihat di bawah mikroskop cahaya atau mikroskop lainnya sesuai dengan kebutuhan pengamatan Anda. Pastikan untuk menjaga kebersihan dan sterilisasi selama proses persiapan untuk menghindari kontaminasi dan memastikan hasil pengamatan yang akurat.

5.5 Pewarnaan Sampel

Pewarnaan sampel mikroorganisme adalah langkah penting dalam persiapan sampel untuk pengamatan mikroskopis. Pewarnaan meningkatkan kontras dan memungkinkan identifikasi mikroorganisme dengan lebih baik. Berikut adalah beberapa metode pewarnaan yang umum digunakan:

1. Pewarnaan Gram:

Tujuan: Membedakan bakteri menjadi dua kelompok utama, yaitu Gram-positif dan Gram-negatif, berdasarkan sifat dinding sel mereka.

Langkah:

Pewarnaan awal dengan Crystal Violet.

Perlakuan dengan iodine untuk membentuk kompleks pewarna.

Dekolorisasi dengan alkohol atau aseton untuk menghilangkan pewarna dari Gram-negatif.

Pewarnaan akhir dengan safranin untuk menyoroti Gram-negatif.

2. Pewarnaan Acid-Fast:

Tujuan: Mengidentifikasi bakteri yang memiliki dinding sel yang tahan terhadap pewarna asam, seperti *Mycobacterium tuberculosis*.

Langkah:

Pewarnaan dengan fuchsin asam.

Dekolorisasi dengan asam atau alkohol.

Pewarnaan kontras dengan metilen biru atau safranin.

3. Pewarnaan Spora:

Tujuan: Mengidentifikasi dan membedakan spora bakteri, yang dapat tahan kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan.

Langkah:

Pewarnaan dengan malachite green (pewarna spora).

Pemanasan untuk membantu penetrasi pewarna ke dalam spora.

Pewarnaan kontras dengan safranin.

4. Pewarnaan Endospora Schaeffer-Fulton:

Tujuan: Pewarnaan khusus untuk menyoroti endospora bakteri.

Langkah:

Pewarnaan dengan malachite green.

Dekolorisasi dengan air.

Pewarnaan kontras dengan safranin.

5. Pewarnaan Giemsa:

Tujuan: Digunakan untuk pewarnaan sel darah, bakteri, dan protozoa.

Langkah:

Pewarnaan dengan larutan Giemsa.

Bilas dan keringkan preparat.

6. Pewarnaan Methylene Blue:

Tujuan: Pewarnaan umum untuk meningkatkan kontras dan membedakan sel.

Langkah:

Pewarnaan dengan larutan methylene blue.

Bilas dan keringkan preparat.

7. Pewarnaan Lactophenol Cotton Blue:

Tujuan: Digunakan untuk membedakan dan mengamati struktur jamur seperti hifa dan spora.

Langkah:

Pewarnaan dengan larutan lactophenol cotton blue.

Bilas dan keringkan preparat.

8. Pewarnaan Gram untuk Bakteri Asam Laktat:

Tujuan: Pewarnaan khusus untuk bakteri asam laktat dalam produk fermentasi.

Langkah:

Pewarnaan dengan kristal violet.

Perlakuan dengan larutan fuchsin asam.

Pewarnaan akhir dengan hijau malaquat.

Pilihan metode pewarnaan tergantung pada jenis mikroorganisme yang diamati dan tujuan pengamatan. Sebagai catatan, setelah pewarnaan, sampel harus dijaga dengan hati-hati untuk mencegah hilangnya pewarna atau deformasi struktur sel.

Rumus menghitung sel relatif (CFU/mL):

$$\text{CFU/mL} = \text{Jumlah koloni} \times \text{faktor pengenceran}$$

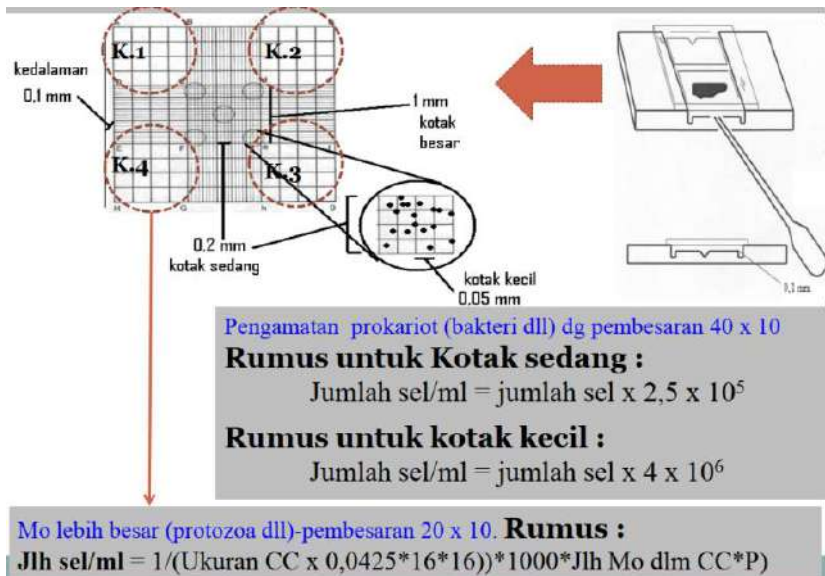
Contoh soal:

Penanaman 1 mL larutan mikroorganisme dilakukan dari tabung pengenceran 10^{-6} dengan metode pour plate ke medium agar cawan. Setelah diinkubasi selama 24 jam, pada medium agar cawan dapat dihitung mikroorganisme sebanyak 50 koloni. Berapakah jumlah mikroorganisme dari suspensi tersebut?

Jawab:

Pour plate:

Jumlah koloni	= 50	= 50×10^6 CFU's/ 1 mL
Fp	= $1/10^{-6}$	= 50 000 000 CFU's/ 0,1 mL
SP	= 1 mL	= $5,0 \times 10^7$ CFU's/ mL



Gambar 5.1. Penghitungan jumlah mikroba secara keseluruhan dengan hemacytometer

5.6 Pembuatan Sediaan *Smear*

Pembuatan sediaan tanah lapang atau smear adalah teknik yang umum digunakan dalam persiapan sampel mikroorganisme untuk pengamatan mikroskopis, khususnya untuk bakteri. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam pembuatan smear:

Langkah-langkah Pembuatan Sediaan Tanah Lapang (Smear):

1. **Persiapan Alat dan Bahan:**
Pastikan semua alat dan bahan yang akan digunakan dalam pembuatan smear steril.
Persiapkan objek glass atau slide bersih dan kering.
2. **Pengambilan Sampel:**
Ambil sampel mikroorganisme dengan menggunakan swab, loop bakteri, atau instrumen steril lainnya.
Pastikan pengambilan sampel representatif dari sumber mikroorganisme yang diinginkan.
3. **Penyebaran Sampel:**
Oleskan dengan lembut atau sebar sedikit sampel di tengah objek glass atau slide. Gunakan loop bakteri atau spatula steril untuk meratakan sampel.
Hindari penumpukan sampel atau membuat lapisan terlalu tebal.
4. **Pengeringan Sampel:**
Biarkan sampel mengering secara alami atau secara hati-hati dengan menggunakan udara kompresi.
Hindari pemanasan berlebihan, karena dapat merusak struktur mikroorganisme.
5. **Fiksasi (Opsional):**
Fiksasi biasanya opsional tergantung pada tujuan pengamatan.
Jika fiksasi diperlukan, celupkan slide yang berisi smear ke dalam larutan fiksatif seperti metanol atau etanol. Fiksasi cepat dapat membantu mempertahankan struktur sel.
6. **Pewarnaan (Opsional):**
Pewarnaan dapat dilakukan setelah fiksasi untuk meningkatkan kontras dan membedakan mikroorganisme.
Contoh pewarna yang umum digunakan termasuk Crystal Violet, Giemsa, atau Metilen Biru.
7. **Diamankan dengan Kaca Penutup:**
Setelah fiksasi dan pewarnaan, letakkan kaca penutup di atas sampel dengan hati-hati. Pastikan agar tidak ada gelembung udara yang terperangkap di dalamnya.

8. Labeling:

Beri label pada slide dengan informasi yang diperlukan, termasuk jenis mikroorganisme, sumber sampel, dan tanggal persiapan.

Setelah sediaan tanah lapang selesai dibuat, Anda dapat melakukan pengamatan mikroskopis menggunakan mikroskop cahaya. Pastikan untuk memilih pembesaran yang sesuai dengan kebutuhan pengamatan Anda dan gunakan kontrol fokus dan pencahayaan untuk mendapatkan gambar yang jelas. Teknik ini umumnya digunakan dalam pengamatan bakteri, tetapi dapat disesuaikan dengan berbagai jenis mikroorganisme dan keperluan pengamatan mikroskopis.

DAFTAR PUSTAKA

- Black, Jacquelyn, G. 2002. Microbiology. John Wiley & Sons, Inc.
- Brock, T.D., Madiqan, M.T. 1991. Biology of Microorganisms. Sixth ed. Prentice Hall International, Inc.
- Cappuccino, J.G., Sherman, N. 1987. Microbiology: A Laboratory Manual. The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc. California.
- Case, C.L., Johnson, T.R. 1984. Laboratory Experiments in Microbiology. The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc. California.
- Fardiaz, S. 1987. Fisiologi Fermentasi, PAU IPB.
- Kusnadi, et al. 2003. Mikrobiologi (Common Textbook). Biologi, FPMIPA UPI, IMSTEP.
- Moat, A.G., Foster, J.W. 1979. Microbial Physiology. John Wiley & Sons.
- Nicklin, J.K. Graeme-Cook. T. Paget, Killington, R. 1999. Instans Notes in Microbiology. Springer Verlag. Singapore Pte, Ltd.
- Radji, M. Buku Ajar Mikrobiologi Panduan Mahasiswa Farmasi dan Kedokteran. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC ; 2009.
- Tortora Gerard J. et al. 1992. Microbiology an Introduction. Fourth Ed. The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc. California.

BAB 6

MIKROORGANISME BAGI KEHIDUPAN MANUSIA

Oleh I Wayan Suanda

6.1 Pendahuluan

Mikroorganisme sering disebut mikroba sangat mudah ditemukan, penyebaran sangat luas karena mampu beradaptasi pada lingkungan dengan kisaran hidup yang relatif lebar, misalnya: jamur, virus dan bakteri. Bakteri dapat ditemukan di beberapa lokasi (misal: pegangan tangan naik tangga) karena dapat menyesuaikan diri dengan berbagai lingkungan dan bisa menggunakan berbagai sumber karbon untuk menghasilkan energi. Demikian juga mikroorganisme berjenis jamur ditemukan pada tanah rizosfer pada tumbuhan (Suanda, 2023b). Suatu mikroorganisme memiliki daya hidup dengan batas toleransi yang lebar untuk suatu faktor yang relatif mantap dan dalam jumlah yang cukup, maka faktor ini bukan merupakan faktor pembatas. Namun sebaliknya apabila suatu organisme hanya memiliki batas toleransi tertentu untuk suatu faktor yang beragam, maka faktor ini dapat dinyatakan menjadi faktor pembatas (Mustaqim, 2018). Mikroba, seperti bakteri mampu hidup dan berkembangbiak pada lingkungan anorganik. Energi diperoleh dari oksidasi senyawa anorganik tereduksi dan menggunakan CO₂ sebagai sumber karbon (C). Mikroorganisme sangat menarik dipelajari dan diteliti karena memiliki sifat sangat sederhana, perkembangbiakan sangat cepat, dan memiliki berbagai variasi metabolisme serta kemanfaatan bagi kehidupan manusia sangat luas. Penelitian tentang mikroorganisme terus berkembang dan dilakukan secara intensif untuk mengetahui dasar fenomena biologi.

Kemajuan dalam riset mikrobiologi sebagai ilmu pengetahuan yang mempelajari mikroorganisme (mikroba) diawali adanya penemuan mikroskop oleh Anthony van Leeuwenhoek

(1633-1723). Terlebih adanya penemuan Robert Heinrich Herman Koch (11 Desember 1843-27 Mei 1910), dalam risetnya ditemukan makhluk kecil yang menibulkan penyakit atau *Germ theory of disease* yang selanjutnya dikenal sebagai "*Postulat Koch*" (*Koch's Postulates*). Hubungan antar penyakit menular dengan mikroorganisme melalui "*Postulat Koch*" menjadi dasar penentu penyakit menular. *Postulat Koch* sebagai rujukan pengujian bagi tenaga medis (kesehatan) dalam menentukan penyebab penyakit dan menemukan obat untuk menanggulangnya. Adanya penemuan baru terkait mikroorganisme dalam dunia kedokteran (kesehatan), farmasi, pertanian, industri, makanan dan minuman serta bidang lainnya menjadi landasan untuk meningkatkan pemanfaatan mikroorganisme bagi kehidupan dan kesejahteraan manusia. Pengembangan riset (penelitian) pemanfaatan mikroorganisme menjadi *trend* akhir-akhir ini tanpa merusak keberadaan plasma nutfah di lingkungan. Pemanfaatan mikroorganisme sebagai plasma nutfah mestinya terarah dan terkontrol secara bijaksana untuk kemakmuran dan kesejahteraan kehidupan dan kesehatan lingkungan, merupakan aplikasi terpadu antara bidang ilmu biokimia, mikrobiologi, bioteknologi, teknologi kimia serta biologi sel dan molekuler.

Berdasarkan sel penyusun, maka mikroorganisme (mikroba) dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu: mikroorganisme bersel satu (*uniseluler*) dan mikroorganisme bersel banyak (*multiseluler*). Mikroba uniseluler memiliki fungsi secara menyeluruh dalam kehidupannya, sedangkan multiseluler telah memiliki pembagian fungsi diantara sel tersebut, walaupun organisasi selnya belum sempurna. Pertumbuhan pada mikroorganisme *uniseluler* (bersel satu) berbeda dengan pertumbuhan mikroorganisme *multiseluler* (banyak sel) karena pertumbuhan diikuti peningkatan massa sel penyusun mikroorganisme. Pertumbuhan pada mikroorganisme bukan penambahan individu, tetapi telah terjadi peningkatan massa sel. Waluyo (2016) menyebutkan bahwa pertumbuhan organisme multiseluler berupa meningkatnya jumlah sel penyusun sehingga ukurannya menjadi lebih besar.

6.2 Mikroorganisme

Mikroorganisme atau mikroba merupakan organisme berukuran sangat kecil, berupa jasad renik atau organisme bersel tunggal. Mikroorganisme (mikroba) dipelajari dalam mikrobiologi, yaitu: cabang biologi mempelajari makhluk berukuran kecil (jasad renik). Mikroba memiliki ukuran yang dinyatakan dalam mikron (μ), dimana $1 \mu = 0,001 \text{ mm}$. Untuk memudahkan dalam konversi satuan mikroba (Tabel 6.1).

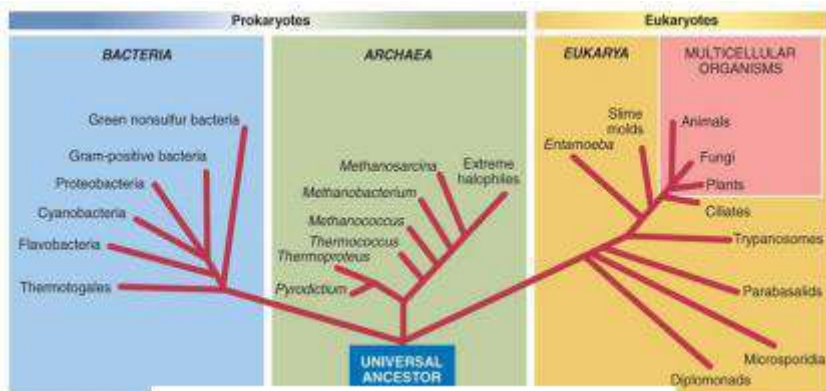
Tabel 6.1. Ukuran Mikroorganisme dalam Satuan

1 meter (m)	1.000 milimeter (mm)
1 mm	1.000 mikron (μ)
1 μ	1.000 milimikron (m μ)

Kecilnya ukuran mikroba, maka sulit dilihat dengan mata telanjang, sehingga diperlukan kaca pembesar berupa mikroskop untuk melihatnya. Mikroorganisme tidak hanya dipandang karena memiliki ukuran kecil (mikro), namun yang menarik untuk dipelajari karena memiliki organisasi hidup sebagai satuan struktur biologi lebih sederhana dari organisme tingkat tinggi. Walaupun mikroorganisme berukuran kecil, tetapi ada sel penyusun yang memiliki peranan dalam pertumbuhan dan memperbanyak diri, dalam satuan koloni. Pertumbuhan dan memperbanyak diri mikroorganisme (mikroba) ditentukan dalam satuan koloni, karena mikroba sebagai kumpulan dari sel dan bukan penambahan jumlah individu (Suanda, 2023a). Pertumbuhan mikroba yang sangat cepat dengan kelompok yang sangat besar, maka untuk mengenalnya lebih spesifik diperlukan pengelompokkan (klasifikasi) lebih kecil. Dunia mikroorganisme (mikroba) sangat luas sehingga diperlukan pengklasifikasian atau pengelompokkan agar mudah menggolongkannya untuk dipelajari. Kelompok mikroorganisme (mikroba) meliputi: protozoa, alga (*algae*), jamur, bakteri dan virus. Klasifikasi tersebut dilakukan dalam kerangka sistem taksonomi yang diterima secara internasional.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam klasifikasi mikroba, seperti: bakteri, antara lain: *Ribonucleic Acid* (RNA) sekuen, morfologi, biokimia dan karakteristik membran eksternal.

Whittaker (1969), sistem klasifikasi 5 (lima) kingdom, membedakan atas: prokaryotik (monera), eukariotik uniseluler (protista), eukariotik multiseluler atau jamur (fungi), plantae (tumbuhan) dan animalia (hewan). Namun sistem klasifikasi terbaru dikemukakan Carl Woese, seorang ahli mikrobiologi mengelompokkan organisme berdasarkan makromolekul, menjadi 3 kingdom, yaitu: Archaea atau Archaeobacteria, eubacteria atau bakteri dan eucarya (Gambar 6.1). Metode perbandingan Carl Woese berdasarkan makromolekul organisme terutama ribosom RNA (rRNA). Pemecahan RNA menjadi fragmen-fragmen yang bisa diurutkan dan dibandingkan dengan fragmen organisme lain. Semakin banyak kemiripan pola fragmen yang dimiliki, maka kedekatan hubungan antar spesies dan hubungan kekerabatannya (Howland, 2000). Molekular archaea (archaeobacteria), bakteri (eubacteria) dan eukarya, pada tingkatan genetis memiliki perbedaan.



Gambar 6.1. Klasifikasi Organisme menurut Carl Woese

Mikroorganisme banyak dibahas dalam mikrobiologi lingkungan, mikrobiologi kedokteran (kesehatan), mikrobiologi industri, mikrobiologi pertanian termasuk fitopatologi (perlindungan tanaman). Potensi mikroba telah banyak dipelajari dan diteliti untuk dikembangkan dalam bioteknologi bermanfaat untuk obat maupun sumber daya hayati (pupuk hayati berbasis mikroorganisme) untuk menghasilkan pangan sehat dan berkelanjutan (Suanda, 2020). Mikroorganisme yang dimanfaatkan

dalam bioteknologi pengolahan makanan berasal dari kelompok fungi (jamur) maupun bakteri. Jamur yang menghasilkan badan buah besar bernama *musrhroom*, jamur ini dapat dikonsumsi. Jamur yang berbentuk seperti benang-benang dinamakan mold dan khamir merupakan jamur bersel satu. Khamir atau yeast, merupakan jamur bersel satu yang mikroskopik, tidak berflagela. Yeast ini terdiri dari beberapa genera membentuk filamen (*pseudomiselium*).

Bakteri dapat hidup bebas di alam, seperti: saprofitik, fotosintetik, parasitik atau patogenik pada organisme lain. Sifat yang dimiliki bakteri tersebut maka beberapa bakteri dapat berperan dalam daur unsur dan berinteraksi dengan organisme lain, serta mempunyai peran lain yang sangat penting. Bakteri yang sering digunakan diantaranya kelompok Actinobacteriaceae, seperti: *Bifidobacterium thermophilum* (Xiao *et al.* 2010); kelompok Firmicutes, seperti: *Bacillus* sp. (Schwan dan Wheals, 2004; Kubo *et al.* 2011). Kelompok bakteri Proteobacteriaceae, seperti: *Acetobacter* dan *Gluconacetobacter* (Sengun dan Karabiyikli, 2011), sedangkan dari fungi, seperti: yeast maupun filamentous fungi (Bourdichon *et al.*, 2012). Bentuk bakteri selain dipengaruhi sifat genetis juga oleh umur, substrat, medium tumbuh dan faktor lingkungan, sehingga pada beberapa jenis bakteri tertentu dapat bersifat pleomorfi (tampil dengan bentuk morfologi yang berbeda).

Perkembangan bidang mikrobiologi, misal bidang pertanian, dapat ditemukannya proses dasar mikroba dalam tanah yang bermanfaat untuk pertumbuhan tanaman, seperti di rizosfer. Ditemukannya bakteri pengikat nitrogen dalam tanah yang berguna dalam peningkatan kesuburan tanah. Ditemukannya juga beberapa mikroba patogen penyebab penyakit tanaman, seperti: *Fusarium* sp. dapat memicu untuk mencari mikroba antagonis dalam pencegahannya. Penelitian mikroorganisme dalam bidang mikrobiologi terapan terus mengalami kemajuan dan berkembang pada bidang kedokteran, industri kimia dan antibiotik serta penemuan lainnya dari mikroorganisme. Mikroorganisme selain memiliki sifat seluler, ada beberapa mikroba yang memiliki sifat non seluler yaitu virus.

Virus merupakan kelompok mikroorganisme memiliki ukuran lebih kecil dari bakteri, berukuran $0,01\mu-0,1\mu$ (mikron). Virus adalah parasit obligat yang berukuran sub-mikroskopik. Virus memperbanyak diri dalam sel inang (parasit obligat) yang dapat menyebabkan sel-sel inang mati. Sel inang telah terinfeksi akan terus menjalar atau meluas mempengaruhi sel yang sehat disekitarnya, sehingga berdampak negatif dengan mengganggu sel keseluruhan pada inang. Sel inang ini bisa pada manusia, hewan, tumbuhan atau mikroorganisme lainnya. Pada manusia bisa dilihat saat kejadian *covid-19*, virus HIV AIDS dan penyakit yang ditulari virus lainnya. Anthraks, rabies merupakan virus yang sering menyerang hewan (ternak) sehingga menimbulkan kematian. Kematian tanaman yang disebabkan oleh virus dapat menimbulkan bercak pada daun, terjadi nekrotik pada daun yang menyebabkan produksinya rendah hingga terjadi kematian. Virus memiliki beberapa sifat penting, diantaranya: (1) Virus hanya mempunyai 1 macam asam nukleat (RNA atau DNA); (2) Virus melakukan reproduksi hanya memerlukan asam nukleat (asam inti); (3) Virus tidak dapat tumbuh atau membelah diri seperti mikroba lainnya; (4) Virus memiliki sifat-sifat khas dan tidak merupakan jasad yang dapat berdiri sendiri.

Virus yang berkembang biak dalam sel mikroba dibedakan berdasarkan mikroba inangnya, yaitu: bakteriofag (virus yang menginfeksi bakteri); sianofag (*cyanophage*), yaitu: virus yang menginfeksi sianobakteri; mikovirus (*mycovirus*), adalah: virus yang menginfeksi cendawan; fikovirus (*phycovirus*), merupakan virus yang menginfeksi algae dan virus protozoa. Kelompok virus tersebut sebagian besar didefinisikan dan dibedakan berdasarkan pada sifat molekulernya. Virus mikroba memiliki spesifikasi yang besar terhadap inangnya, hal ini kemungkinan berkaitan dengan reseptor khusus yang dimiliki inang. Bakteriofag umumnya dinamakan berdasarkan bakteri yang diinfeksi, misalnya colifag, yaitu bakteriofag yang menginfeksi *Escherichia coli*.

6.2.1 Prokariotik dan Eukariotik

Berdasarkan letak DNA di dalam sel mikroorganisme atau organisme pada umumnya dibedakan menjadi dua, yaitu: sel prokariotik dan sel eukariotik.

1. Prokariotik

Prokariot (prokariotik) merupakan sel yang tanpa membran inti (nukleus), sehingga tidak ada pemisah antara DNA dan bagian sel lainnya. Prokariotik hanya memiliki membran sel (membran tunggal), sehingga semua aktivitas sel berlangsung di dalam sitoplasma. Materi genetik pada DNA tidak terbungkus oleh membran dan ada pada sitoplasma, disebut nukleoid. Oleh karenanya semua aktivitas sel dilaksanakan di dalam sel dan di dalam nukleoid. Sel prokariotik tidak mengandung organel yang dikelilingi oleh membran. Ribosom yang dimiliki sel prokariot berukuran 70S. Sel prokariot memiliki ukuran genom berbeda dengan sel eukariotik, penyusun sel prokariot berkisar antara 0,8-8.106 pasang basa (pb) DNA. Bakteri merupakan mikroba prokariotik uniseluler dengan genom berbentuk sirkuler dan mempunyai plasmid. Bakteri, sianobakteri dan virus termasuk contoh prokariotik. Sel prokariotik memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- a. Sel prokariotik memiliki sitoplasma bersifat difus serta bergranula, pada sitoplasma ribosom melayang-layang.
- b. Membran plasma tersusun dari 2 lapisan fosfolipid yang memisahkan bagian dalam sel dengan lingkungannya, berfungsi juga memfiltrasi dan komunikasi dalam sel.
- c. Tidak memiliki organel.
- d. Memiliki dinding sel, kecuali mycoplasma dan thermoplasma.
- e. Tidak memiliki nukleus, karena DNA (*Deoxyribonucleic Acid*) tidak diselubungi membran dan kromosom berbentuk sirkuler.
- f. Memiliki elemen DNA ekstra kromosom bernama plasmid berbentuk bulat (sirkuler).
- g. Memiliki flagella sebagai alat gerak

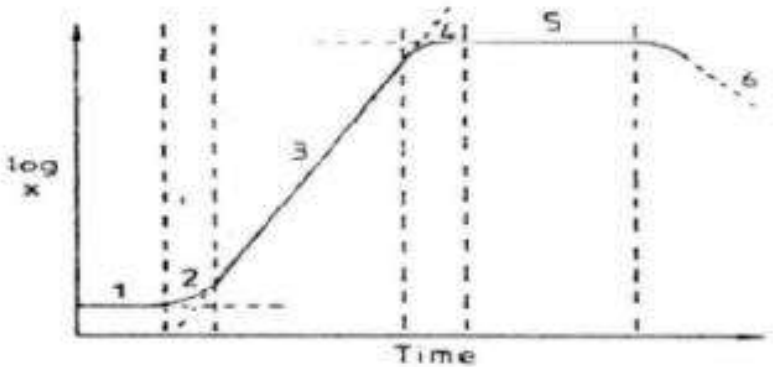
2. Sel Eukaritik

Perbedaan antara prokariotik dan eukariotik dapat dilihat dari susunan tata ruang selular. Eukariotik merupakan organisme yang memiliki struktur sel kompleks yang ada pada jamur (fungi), tumbuhan dan hewan. Jadi eukariotik memiliki organ selular yang jelas, dengan nukleus, mitokondria, lisosom, peroksisom yang dibatasi oleh membran. Sitoplasma terbagi dalam beberapa ceruk organel, mulai jaringan tubular di dalam sel, ribosom, retikulum endoplasmik, kompleks golgi. Eukariotik merupakan sel yang memiliki membran inti, organel yang fungsinya tidak sama dan memiliki stuktur tugas tersendiri. Ribosom pada sel eukariotik lebih besar dibandingkan prokariotik, berukuran 80S. Mikroorganisme yang tergolong kelompok eukariotik, seperti: algae sel tunggal, khamir dan protozoa (Divisio Protista), merupakan kelompok eukariotik uniseluler. Eukariotik multiseluler dan multinukleat diantaranya: Divisio Fungi, Divisio Plantae dan Divisio Animalia. Pada dunia mikroba, algae termasuk eukariotik, umumnya bersifat fotosintetik dengan pigmen fotosintetik hijau (*klorofil*), coklat (*fikosantin*), biru kehijauan (*fikobilin*), dan merah (*fikoeritrin*) (Suryani dan Taupiqurrahman, 2021). Jamur (fungi) merupakan salah satu makhluk hidup eukariotik heterotrof yang mencerna makanannya di luar tubuh lalu menyerap molekul nutrisi ke dalam sel-selnya.

6.2.2 Pertumbuhan Mikroorganisme

Pertumbuhan mikroorganisme merupakan penambahan sel, bukan perubahan individu organisme (Pelczar, 2013). Pertumbuhan dapat didefinisikan sebagai penambahan kuantitas konstituen seluler dan struktur organisme yang dapat dinyatakan dengan ukuran, penambahan jumlah, penambahan ukuran sel dan penambahan berat atau massa. Laju pertumbuhan mikroorganisme (mikroba) merupakan penambahan jumlah sel dalam waktu generasi. Waktu generasi mikroorganisme tidak sama pada setiap spesies, misalnya: *Escherichia coli*, waktu generasi 15-20 menit. Dimana waktu generasi merupakan waktu yang dibutuhkan sel untuk membagi diri atau untuk mencapai populasi menjadi dua kali

lipat dari asalnya. Lebih lanjut Dawes dan Sutherland menyebutkan pertumbuhan adalah pertambahan ukuran sel dalam waktu tertentu atau pertambahan jumlah sel atau pertambahan total massa sel, pada sel tunggal. Tahapan pertumbuhan mikroorganisme dari awal pertumbuhan hingga kematian di gambarkan dengan kurva pertumbuhan (Gambar 6.2). Jadi pertambahan massa sel berbanding atau sejalan dengan pertambahan komponen seluler. Mikroorganisme dapat memperbanyak diri melalui pembelahan biner dari satu sel menjadi dua sel, oleh karenanya pertumbuhan dapat diukur akibat bertambahnya jumlah sel (Suryani dan Taupiqurrahman, 2021).



Gambar 6.2. Kurva Pertumbuhan Fungi. (1) Fase Lag; (2) Fase Akselerasi; (3) Fase Eksponensial; (4) Fase Deselerasi; (5) Fase Stasioner; (6) Fase Kematian
(Sumbet: Ganjar dan Wellyzar, 2006)

Kurva pertumbuhan mikroorganisme baik pada jamur atau bakteri (Gambar 6.2) menunjukkan adanya fase-fase pertumbuhan, diantaranya:

1. Fase Lag atau Fase Adaptasi

Fase pertama pada kurva pertumbuhan, belum adanya pertumbuhan dan hanya terjadi adaptasi (penyesuaian) dengan substrat dan kondisi lingkungan. Sel mikroba hanya mengalami perubahan dalam komposisi kimia dan ukurannya bertambah, dan substansi intraseluler bertambah, namun tidak terjadi pertambahan populasi (Cappucino & Natalie, 2013). Pembelahan sel belum terjadi karena belum terjadi

sintesis enzim, sehingga nutrisi mikroba belum ada. Proporsi inokulum yang besar mengandung sel-sel mati (fase lag yang lebih panjang menunjukkan adanya kematian sel). Panjang fase ini bergantung pada aktivitas metabolisme sel (Pommerville, 2011). Pada fase ini jumlah sel tidak meningkat tetapi volume sel mulai bertambah, sehingga kondisi ini dikenal dengan fase adaptasi.

2. Fase Akselerasi

Bila terjadi sintesis enzim, yang sesuai dengan medium pertumbuhan, dibarengi persiapan pembelahan sel. Mulai terjadi peningkatan jumlah sel dan dilanjutkan perubahan bentuk sel. Inokulum yang dipindahkan bila jumlahnya banyak dan substrat sebagai medium tumbuh yang sesuai dengan medium sebelumnya serta faktor lingkungan yang mendukung akan memberi kesempatan pertumbuhan sel mikroba lebih cepat. Waktu yang diperlukan untuk beradaptasi sangat dipengaruhi oleh jumlah inokulum yang diisolasi dan medium serta lingkungan sekitarnya.

3. Fase Log/Logaritmik atau Fase Eksponensial

Pembelahan sel terjadi lebih cepat dan peningkatan jumlah sel secara maksimum. Perbanyakan sel terjadi karena sel mengalami pembelahan biner dengan waktu generasi tergantung spesies mikroba dan kondisi lingkungan. Pada fase ini dikenal waktu generasi, yaitu waktu yang dibutuhkan bagi populasi untuk menggandakan jumlah sel dari mikroba itu (Cappucino & Natalie, 2013). Multiplikasi berjalan lancar, pembelahan sel jumlahnya sama dengan persamaan eksponensial, dimana nutrisi yang dibutuhkan tersedia (Pommerville, 2011). Pada fase ini terjadi kegiatan fisiologi sel yang menyebabkan terbentuknya senyawa-senyawa yang dapat dimanfaatkan oleh manusia, seperti: etanol, asam lemak, asam organik, asam laktat, dan lain-lain.

4. Fase Deselerasi

Pada fase deselerasi ini sumber nutrisi mulai berkurang, sehingga mulai terganggunya pertumbuhan mikroba. Pembelahan sel berjalan melambat yang berdampak pada pertumbuhan sel juga melambat, mulai terbentuknya produk-

produk beracun yang dapat mengganggu pertumbuhan mikroba.

5. Fase Stationer atau Fase Statis

Fase ini merupakan kelanjutan dari fase deselerasi, yang dikenal sebagai fase tetap, karena mikroba tidak mengalami peningkatan jumlah sel (jumlah sel yang menggandakan diri setara dengan jumlah sel yang mengalami kematian). Aktivitas mikroba mulai menurun, akan terbentuk produk-produk beracun lebih meningkat. Kematian sel disebabkan penumpukan produk beracun dan kehabisan nutrisi, beberapa sel mati sedangkan yang lain tumbuh dan membelah diri sehingga jumlah sel hidup menjadi tetap (Cappucino & Natalie, 2013). Berkurangnya suplai oksigen dapat memicu terjadinya kematian mikroba (Pommerville, 2011).

6. Fase Kematian

Fase ini menyebabkan penurunan akibat mikroba mengalami kematian yang disebabkan oleh kekurangan nutrisi atau akibat dari produk inhibitor serta minimnya suplai oksigen. Pada fase ini organisme tetap hidup dan menggunakan cadangan makanan, namun jumlah nutrisi semakin berkurang, hasil metabolisme toksik semakin meningkat. Sel-sel ini tumbuh menggunakan nutrisi yang dilepaskan dari sel-sel yang mati dan melisis (Carroll, Butel, Morse, & Timothy, 2016). Mikroorganisme mati dengan laju yang cepat dan seragam. Beberapa organisme yang sangat resisten ditemukan tetap hidup untuk jangka waktu yang tidak ditentukan (Cappucino & Natalie, 2013). Kurva pertumbuhan mikroba secara umum dijelaskan hanya 4 fase, yaitu: 1. Fase lag; 2. Fase log; 3. Fase statis dan 4. fase kematian.

6.3 Mikroorganisme Bagi Kehidupan Manusia

Kehidupan manusia tidak dapat dipisahkan dengan makhluk hidup lain termasuk mikroorganisme (mikroba). Mikroba secara alamiah hidup menghuni tubuh manusia disebut flora normal atau mikrobiota. Flora normal merupakan kumpulan mikroorganisme yang secara alami hidup dalam tubuh manusia normal dan sehat. Mikroorganisme banyak hidup di tubuh manusia, selain hidup di

lingkungan, karena manusia dapat berhubungan langsung dengan sumber mikroorganisme (mikroba). Mikroorganisme patogen yang kontak pada bagian tubuh dapat masuk kedalam tubuh manusia, seperti: membran mukosa, kulit, atau melalui jalan parental, sehingga keberadaan mikroorganisme pada manusia sulit dihindari. Namun menjaga kebersihan dan tetap menjalankan protokol kesehatan terutama menjauhkan diri dari mikroorganisme yang menimbulkan dampak negatif (mengganggu kesehatan) sebagai alternatif kontaminasi terhadap mikroorganisme (mikroba) negatif.

Mikroorganisme dalam hidupnya mengalami interaksi dengan mikroba lain maupun organisme lain, sehingga dapat menimbulkan efek beraneka ragam, baik menguntungkan maupun merugikan (bersifat patogen). Bakteri pada spesies tertentu memiliki kemampuan untuk menghasilkan spora, seperti: eksospora (di luar sel vegetatif) dan endospora (di dalam sel vegetatif). Spora memiliki kemampuan resistensi terhadap kondisi lingkungan, misalnya: suhu tinggi, kekeringan, senyawa kimia berupa desinfektan dan lain-lainnya. Resistensi bakteri ini disebabkan adanya selubung spora yang bersifat impermiabel dan adanya kompleks asam dipikolilat–kalsium–peptidoglikan. Kondisi yang dimiliki ini mampu menghambat usaha dalam menekan aktivitas bakteri, sehingga menurunkan dalam pengobatan atau penanggulangan akibat patogen ini. Spora merupakan suatu tubuh yang secara metabolik dorman, dihasilkan pada fase lanjut dari pertumbuhan sel, pada kondisi lingkungan yang sesuai akan berkecambah menjadi sel-sel vegetatif baru. Misalnya jamur jenis *Streptomyces* dari golongan *Actinomycetes* merupakan mikroorganisme penghasil eksospora. Beberapa contoh bakteri pembentuk spora, seperti disajikan pada Tabel 6.2.

Tabel 2.1. Beberapa Contoh Bakteri Pembentuk Spora

Bakteri	Spora yang dihasilkan
Bacillus	Endospora
Clostridium	Endospora
Myxococcus	Mikrokista
Azotobacter	Kista
Sianobakteri	Akinet

(Sumber: Black, 2008)

Jamur (fungi) adalah salah satu mikroorganisme eukariotik heterotrof yang proses pencernaan makanan terjadi di luar tubuh, kemudian menyerap molekul nutrisi ke dalam selnya. Koloni jamur berupa tubulus berbentuk silinder yang bercabang-cabang diameter sekitar 2-10 μm , bernama hifa (Pujiati *et al.*, 2018). Jamur atau kapang yang mampu menghasilkan komponen selulase diantaranya *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Fusarium* sp., *Rhizopus* sp., *Trichoderma* sp. (seperti: *Trichoderma viride*) dan *Mucor*.

Mikroorganisme (jamur dan bakteri) hidup tersebar luas di lingkungan, sehingga mudah didapat di suatu lokasi, misalnya: di daerah rizosfer sekitar perakaran bambu, pohon duwet, pohon pisang dan tumbuhan lain, bahkan mampu bertahan dalam kondisi ekstrem yang tidak menguntungkan dirinya. Pelibatan mikroorganisme, seperti: bakteri selama pertumbuhan dan perkembangannya, banyak dipelajari dalam studi hereditas dalam genetika dan variasi bakteri.

6.3.1 Mikroorganisme Menguntungkan

Mikroorganisme memberikan manfaat dalam kehidupan manusia, baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Mikroorganisme agar memiliki manfaat yang lebih tinggi dan multi manfaat, diperlukan adanya pengelolaan melalui bioteknologi atau teknologi modern, selain riset (penelitian) yang terus dilakukan. Beberapa manfaat dari mikroorganisme dalam kehidupan manusia dan lingkungan, diantaranya:

1. Pemanfaatan dalam pembuatan makanan dan minuman, seperti: khamir untuk membuat anggur dan roti; bakteri asam laktat untuk *yogurt* dan kefir; bakteri asam asetat untuk vinegar; jamur *Aspergillus* sp. untuk kecap, dan jamur *Rhizopus* sp. untuk tempe.
2. Pemanfaatan dalam memproduksi antibiotik, diantaranya: penisilin oleh jamur *Penicillium* sp.; streptomisin oleh *Aktinomyces*, *Streptomyces* sp.
3. Pemanfaatan mikroba untuk proses yang modern, contoh: karotenoid dan steroid oleh jamur; asam glutamat oleh mutan *Corynebacterium glutamicum*; pembuatan enzim amilase, proteinase, pektinase, dan lain-lain.

4. Pemanfaatan dalam teknik genetika modern, seperti: pemindahan gen dari manusia, binatang, atau tumbuhan ke dalam sel mikroba; penghasil hormon, antigen, antibodi, dan senyawa lain, contoh: insulin, interferon, senyawa tertentu dan lain-lain.
5. Pemanfaatan di bidang pertanian, contoh: pupuk hayati (*biofertilizer*), biopestisida dan pengomposan..
6. Pemanfaatan di bidang pertambangan, seperti: untuk proses *leaching* di tambang emas, desulfurisasi batubara, maupun untuk proses penambangan minyak bumi.
7. Pemanfaatan di bidang lingkungan, contohnya: untuk mengatasi pencemaran limbah organik maupun anorganik termasuk logam berat dan senyawa xenobiotik.

6.3.2 Mikroorganisme Merugikan

Mikroorganisme yang menimbulkan kerugian disebut mikroorganisme (mikroba) patogen. Mikroba patogen yaitu mikroba yang menyebabkan penyakit pada organisme lain. Kemampuan mikroba menimbulkan penyakit yang bersifat patogen disebut patogenitas. Mikroba patogen dapat menimbulkan penyakit apabila patogen mampu masuk ke tubuh inang, akan tetapi tidak semua mampu menyebabkan penyakit, karena tubuh juga memiliki kemampuan ketahanan (imunitas). Penyakit akan muncul bila infeksi menyebabkan perubahan pada fisiologi normal tubuh inang. Mikroba yang tumbuh dipermukaan tubuh inang tidak menimbulkan gangguan atau menyerang jaringan tubuh dan merusak fungsi normal tubuh. Mikroba selain menguntungkan ada juga yang merugikan karena menimbulkan penyakit.

Beberapa mikroba yang bersifat patogen dan merugikan manusia, hewan dan tumbuhan, diantaranya:

1. Mikroba berbentuk kokus Gram positif: *Streptococcus pyogenes* penyebab nyeri tenggorokan dan demam reumatik; *Streptococcus agalactiae* penyebab meningitis pada neonatus dan pneumonia.
2. Mikroba berbentuk kokus Gram negatif: *Neisseriae meningitidis* penyebab meningitis dan septikemia, *N. Gonorrhoeae* merupakan agen penyebab uretritis.

3. Mikroba berbentuk Bacillus Gram positif: *Bacillus anthracis* penyebab penyakit anthraks dan clostridia penyebab gangren, tetanus, kolitis pseudomembranosa dan botulism.
4. Bakteri perusak makanan.
Bakteri perusak makanan mampu menguraikan dan mengubah struktur serta kualitas makanan menjadi rusak akibat toksin (racun) yang diproduksi. Makanan yang telah terkontaminasi toksin, bila dikonsumsi dapat mengganggu kesehatan. Misalnya: bakteri *Clostridium botulinum*, terdapat pada makanan kalengan tersimpan lama, terkontaminasi racun botulinin; *Pseudomonas cocovenenans* terdapat pada tempe bongkrek, menghasilkan asam bongkrek; *Leuconostoc mesenteroides*, menyebabkan pelendiran pada makanan, sehingga berbahaya bagi kesehatan bila dikonsumsi. Jamur *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus* memproduksi toksin berupa aflatoxin, sering mengkontaminasi jenis kacang-kacangan, sehingga menurunkan kualitas dan berpotensi menimbulkan keracunan bila dikonsumsi.

Mikroba selain menguntungkan ada juga yang merugikan karena menimbulkan penyakit. Pembuktian mikroba sebagai penyebab penyakit dibuktikan oleh Robert Koch (1876) yang populer disebut "*Postulat Koch*". Bakteri terdapat pada hewan sakit yang diambil darahnya untuk ditularkan ke hewan sehat, ternyata menunjukkan gejala penyakit sama seperti hewan sakit sumber patogen dalam darahnya. Postulat Koch ini merupakan tahapan untuk membuktikan sumber patogen penyakit dari mikroba. Keberadaan mikroba telah disadari menimbulkan kerugian pada manusia, hewan, tanaman dan organisme lainnya. Walaupun di bidang lain mikroorganisme menimbulkan kerugian, tetapi perannya yang menguntungkan jauh lebih menonjol, Misalnya dalam bidang mikrobiologi kedokteran dan fitopatologi banyak ditemukan mikroorganisme yang pathogen yang menyebabkan penyakit dengan sifat-sifat kehidupannya yang khas.

6.4 Pemanfaatan Mikroorganisme

Mikroorganisme (mikroba) memiliki peranan penting sebagai pertahanan melawan infeksi, sistem imun, sumber nutrisi dan menstimuli pergantian epitel pada manusia. Peranan mikroorganisme sangat tinggi dalam siklus elemen dan fungsi ekosistem di alam, sehingga mampu mempengaruhi ekologi dan kehidupan melalui keseimbangan kehidupan di alam. Mikroorganisme jenis Jamur atau khamir memegang peranan dalam proses fermentasi dan pengurai bahan organik serta dalam siklus biogeokimia tanah, siklus hara dan dekomposer (Armawi, 2009). Pada ekosistem hutan terjadi penguraian daun tumbuhan dan tumbuhan yang sudah mati oleh mikroba yang memiliki potensi sebagai pengurai, melalui pelibatan enzim yang diproduksi miselium jamur (Musyafa, 2005). Berdasarkan fisika-kimia lingkungan, beberapa jamur genus *Agrocybe*, *Trametes*, *Naucoria*, *Lepiota*, *Micromphale*, *Amanita*, *Schyzophora*, *Tricholomopas*, *Leceinum*, *Coltricia*, dan *Mycena* memiliki kemampuan hidup di lingkungan agak asam, hal ini memberikan peluang habitat hidup cukup luas. Aktivitas mikroorganisme menjadi semakin penting pada hutan yang memiliki tanah utisol untuk mempercepat proses degradasi bahan organik. Mikroba dapat mengurangi pencemaran lingkungan dari bahan organik karena memiliki kemampuan sebagai dekomposer (Suanda, 2023a). Bioteknologi pemanfaatan mikroorganisme telah menghasilkan hormon yang memiliki nilai penting bagi kehidupan manusia, seperti: hormon insulin; enzim, seperti: streptokinase dan protein bagi manusia, seperti: interferon dan *tumor necrosis*. Produk ini digunakan untuk pengobatan dari berbagai kondisi medis dan penyakit termasuk diabetes, serangan jantung, TBC dan AIDS. Botulinum toksin dan insektisida dari jenis *Bacillus thuringiensis* (Bt) adalah produk bakteri yang digunakan dalam pengobatan dan pengendalian hama.

Bahan organik yang dihasilkan dalam proses fermentasi melibatkan mikroorganisme dapat dimanfaatkan menjadi pupuk kompos, seperti: penggunaan *Effective Microorganism* (EM), umumnya EM4. Khamir memiliki aktivitas enzim lipase ditunjukkan adanya zona bening disekitar khamir, disebabkan adanya aktivitas hidrolisis enzim lipase pada lipid menjadi asam lemak dan gliserol

dalam media tumbuh (Ayadi *et al.*, 2018; Raj *et al.*, 2016; Suanda, 2023a). Khamir jenis *Saccharomyces cerevisiae* mampu menghasilkan bioetanol dari proses fermentasi substrat memiliki kandungan glukosa tinggi, seperti: buah wani, anggur, ketela ungu, ketela madu, singkong, stroberi, pisang, salak dan lain sebagainya (Suanda, 2023b).

Dalam bioteknologi pemanfaatan sel-sel bakteri untuk produksi yang dibutuhkan bagi kehidupan manusia telah dihasilkan. Beberapa produk bahan biologi penting bagi kehidupan, diantaranya: makanan, obat-obatan, enzim, asam nukleat, protein, hormon, sampai bahan bakar non fosil. Ini merupakan kemampuan genetik dari mikroorganisme, seperti: bakteri, oleh karenanya Pasteur menyebutkan “jangan pernah meremehkan kekuatan mikroorganisme”. Bakteri banyak dimanfaatkan dalam industri dengan cara mengeksploitasi kemampuan metabolisme alami mereka. Mikroorganisme seperti Bakteri dapat digunakan dalam pengolahan makanan dan produksi antibiotik, probiotik, obat-obatan, vaksin, kultur starter, insektisida, enzim, bahan bakar dan pelarut. Selain itu, dengan teknologi rekayasa genetika, bakteri dapat diprogram untuk membuat berbagai bahan yang digunakan dalam ilmu pangan, pertanian dan obat-obatan. Dalam proses pencernaan dalam usus hewan rumensia terdapat bakteri yang menghasilkan enzim selulase untuk membantu pencernaan selulosa dari jenis rumput-rumputan sebagai pakan. Tanaman jenis polong-polongan yang hidup di lahan ekstrim dapat memanfaatkan bakteri untuk mengubah nitrogen agar berguna secara biologis. Begitu juga peranan bakteri *endosymbiotic* dalam mengatur jenis kelamin serangga dalam proses perkawinan.

Metabolit sekunder yang dihasilkan mikroba merupakan produk alam berkualitas tinggi dalam pengendalian jamur patogen penghasil aflatoksi (Xianfeng Ren *et al.*, 2020). Genus *Lactobacillus*, spesies *Laktobacillus plantarum* memiliki daya hambat terhadap strain aflatoksigenik di lingkungan (Sangmanee & Hongpattarakere, 2014). *Trichoderma asperillum* memiliki kemampuan menghambat pertumbuhan dan mengendalikan penyakit akar putih pada tanaman cengkeh (*Syzygium aromaticum*) (Suanda, 2017). Pemanfaatan bakteri *Bacillus sp.* dan *Pseudomonas fluorescen* sebagai

PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) yang diteliti penulis telah banyak memberikan manfaat dalam ketahanan sistemik pada tanaman.

6.4.1 Kesehatan

Mikroorganisme (Mikroba) banyak dikembangkan untuk memproduksi antibiotik yang memiliki peranan dalam kesehatan (pengobatan), misal: penisilin yang diproduksi jamur *Penicillium* sp., streptomisin dihasilkan *Streptomyces* sp. Pemanfaatan mikroba dalam proses-proses yang modern telah banyak dikembangkan, seperti: karotenoid dan steroid oleh jamur; asam glutamat oleh *Corynebacterium glutamicum*; pembuatan enzim amilase, protease; pektinase dan lain-lain. Pemanfaatan mikroba pada teknik genetika modern, seperti pemindahan gen dari manusia, binatang, atau tumbuhan ke dalam sel mikroba, penghasil hormon, antigen, antibodi, dan senyawa, lain contoh: insulin, interferon, dan lain-lain.

6.4.2 Makanan dan Minuman

Pemanfaatan mikroba dalam proses pembuatan makanan dan minuman, contoh: khamir untuk membuat anggur dan roti; bakteri asam laktat untuk *yogurt* dan kefir; bakteri asam asetat untuk vinegar; jamur *Aspergillus* sp. untuk kecap, dan jamur *Rhizopus* sp. untuk tempe. Insidensi *foodborne disease* di dunia meningkat terus dan terjadi *outbreak*. Dalam industri makanan, bakteri asam laktat, seperti: *Lactobacillus*, *Lactococcus* dan *Streptococcus* yang digunakan dalam pembuatan produk susu seperti keju, termasuk keju dan krim keju, mentega, krim asam, buttermilk, *yogurt* dan kefir. Bakteri asam laktat dan bakteri asam asetat yang digunakan dalam proses pengawetan, seperti: zaitun, acar mentimun dan sauerkraut. Fermentasi bakteri yang digunakan dalam pengolahan teh, kopi, kakao, kecap, sosis dan berbagai hal yang menimbulkan cita rasa makanan.

6.4.3 Pertanian

Mikroorganisme (mikroba) memiliki manfaat dalam pertanian untuk meningkatkan produksi secara kuantitas maupun kualitas. Pupuk hayati berbasis mikroorganisme (*Bacillus* sp. *Pseudomonas fluorescen*, *Trichoderma* sp.) dalam bentuk *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) telah banyak meningkatkan produksi pertanian karena mampu meningkatkan kesuburan tanah dan menjaga keseimbangan ekosistem dalam tanah (Widnyana *et al.*, 2023). Penggunaan pupuk organik berbasis mikroorganisme dilakukan dengan memacu aktivitas mikroorganisme berupa penambahan PGPR (Mohamed *et al.*, 2019; Zandi dan Bazu, 2016; Widnyana *et al.*, 2023). Kelebihan pupuk organik dan PGPR dapat berkembang dalam lahan pertanian yang mendukung kehidupan mikroorganisme didalamnya. Pupuk hayati (biofertilizer) berbasis PGPR dapat menghasilkan enzim yang larut dan sebagai agensia pelarut mineral, agensia biokontrol serta fungisida biologis (Widnyana *et al.*, 2023; Hafes *et al.*, 2021; Moncada *et al.*, 2020). Penerapan pupuk organik sebagai pupuk hayati dalam pertanian selain meningkatkan produksi pertanian yang sehat dapat mendukung pertanian berkelanjutan (Suanda, 2020). Mikroorganisme berupa bakteri yang tersedia dalam PGPR dapat berkembang pada kondisi tanah tertentu dan faktor yang dapat memacu perkembangan populasi bakteri penambat N. Ketersediaan bahan organik, kondisi pH (*potential of hydrogen*) atau *power of hydrogen* dari tanah dan tanaman inang yang sesuai sangat dibutuhkan bakteri penambat N (nitrogen) (Tsukanova *et al.*, 2017). Pupuk bersumber dari kohe sapi, seperti: pupuk biodynamik dapat menyediakan nutrisi bagi *Azotobacter* sp.

6.4.4 Industri

Peranan mikroorganisme dalam industri farmasi untuk memproduksi antibiotik, vaksin, dan enzim, dimana antibiotik yang dihasilkan oleh bakteri yang didapat dari tanah. Actinomycetes, seperti: *Streptomyces* menghasilkan tetrasiklin, eritromisin, streptomisin, rifampisin dan ivermectin. *Bacillus* dan *Paenibacillus* menghasilkan bacitracin dan polimiksin. Bakteri digunakan dalam pembuatan makanan dan produksi antibiotik, probiotik, obat-

obatan, vaksin, kultur starter, insektisida, enzim, bahan bakar dan pelarut. Selain itu, dengan teknologi rekayasa genetika, bakteri dapat diprogram untuk membuat berbagai bahan yang digunakan dalam ilmu pangan, pertanian dan obat-obatan.

Pemanfaatan mikroba pada bidang pertambangan, seperti untuk proses leaching di tambang emas, desulfurisasi batubara, maupun untuk proses penambangan minyak bumi. Penelitian tentang mikroorganisme (bakteri) terkait nutrisi yang dibutuhkan dan produk yang dihasilkannya. Dalam industri makanan dan minuman proses fermentasi yang melibatkan mikroorganisme menjadi kegiatan sangat penting. Fermentasi sebagai proses disimilasi glukosa yang dapat mengkonversi glukosa menjadi asam piruvat yang selanjutnya menjadi beberapa jenis asam, alkohol, CO₂ dan H₂ dalam kondisi anaerob oleh mikroorganisme anaerobik. Dalam proses fermentasi terjadi perubahan kimia pada suatu subsrat organik melalui aktivitas enzim yang dihasilkan mikroorganisme. Asam piruvat merupakan pusat fermentasi glukosa, disajikan pada Tabel 6.3 berikut.

Tabel 6.3. Kelompok Bakteri dalam Proses Fermentasi Glukosa

Bakteri	Produk
Bakteri asam laktat <i>Streptococcus</i> <i>Lactobacillus</i> <i>Leuconostoc</i>	asam laktat (lomofermentatif) asam laktat, asam asetat, asam format, etil alkohol (heterofermentatif)
Bakteri asam propionat Propiono bacterium Veillonella Bakteri coli-aerogenes tofoid <i>Escherichia coli</i>	asam propionat, asam asetat, CO ₂ asam format, asam asetat. Asam laktat, asam suksinat, etil alkohol, CO ₂ hidrogen, 2,3-butilen glikol
Euterobacter Salmonella Bakteri aseton, butil alkohol Bakteri asam asetat Aceto bacter	asam butirat, butil alkohol, aseton, asam asetat, asam format, etil alkohol, hidrogen, CO ₂ . asam asetat. Asam glukonat, asam kojat.

(Sumber: Pelczar dan Chan, 2013)

6.4.5 Lingkungan

Mikroorganisme (mikroba) ditemukan pada semua habitat di alam dapat berpengaruh pada lingkungan. *Soil borne disease* sebagai akibat pencemaran tanah (dalam tanah maupun luar tanah) menjadi vektor dan sumber dari agensia penyakit pada manusia, hewan maupun tanaman. Kondisi ini disebabkan karena tanah sebagai penampung limbah padat maupun cair yang terkontaminasi mikroba patogen. Bakteri *Escherichia coli* banyak ditemukan dalam air dan tanah berasal dari saluran pencernaan manusia dan hewan, sehingga lingkungan yang mengandung *E. coli* ini dianggap tercemar.

Mikroba yang mampu merombak plastik telah ditemukan di alam, diantaranya: bakteri aktinomyces, jamur dan khamir menggunakan plasticizers sebagai sumber Carbon (C). Mikroba yang mampu merombak dan menggunakan sumber C dari plasticizers, yaitu: jamur *Aspergillus niger*; *A. vesicolor*; *Cladosporium sp.*; *Fusarium sp.*; *Penicillium sp.*; *Trichoderma sp.*; *Verticillium sp.* dan khamir *Zygosaccharomyces drosophilae*; *Saccharomyces cereviceae* serta bakteri *Pseudomonas aeruginosa*; *Brevibacterium sp.* dan *Streptomyces rubrireticuli*. Masih sedikit ditemukan mikroba yang mampu merombak polimer plastik, seperti: *Aspergillus fischeri* dan *Paecilomyces sp.* (Sumarsih, 2003). Pemanfaatan mikroba untuk mengatasi pencemaran limbah organik maupun anorganik termasuk logam berat dan senyawa xenobiotik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayadi, I; Belghith, H; Gargouri, A & Guerfali, M. 2018. Screening of New Oleaginous Yeasts for A Single Cell Oil Production, Hydrolytic Potential Exploitation and Agro-industrial by-Products Valorization. *Process Safety and Enviromental Protection*, 119, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.07.012>
- Aldosary, S.K.A. 2016. Handborne Transmission of Infectious Agents by Escalator Handrails, Shopping Carts, and Automated Teller Machines (ATMs). *Science and Technology*. 14(1): 128-130.
- Black, J.G. 2008. *Microbiology Principles and Explorations*. United State of America: John Wiley and Sons.
- Carroll, K.C; Butel, J.S; Morse, S.A & Timothy, M. 2016. *Jawetz, Melnick & Adelberg Medical Microbiology 27th Edition*. New York: Mc Graw Hill Education
- Cappucino, J.G., & Natalie, S. 2013. *Manual Laboratorium Mikrobiologi Edisi 8*. (N. Miftahurrahma, Trans.), Jakarta: EGC.
- Gandjar, I. 2006. *Mikologi Dasar dan Terapan*. Yayasan Obor Indonesia. Jakarta.
- Hafez, E.M; Osman, H.S; El-razek, U.A.A & Elbagory, M. 2021. Foliar-applied potassium silicate coupled with plant physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean. *Plants*; 10(5): 894. <https://doi.org/10.3390/plants10050894>.
- Howland, John L. 2000. *The Surprising Archaea: Discovering Another Domain of Life*. Oxford: Oxford University Press. Hal. 25-30.
- Kubo, Y; Rooney, A.P; Tsukakoshi, R; Nakagawa, Y; Hasegawa, H and Kimura, K. 2011. Phylogenetic Analysis of *Bacillus subtilis* Strains Applicable to Natto (Fermented Soybean) Production. *Applied and Environmental Microbiology*; 77: 6346-6349.
- Mohamed, I; Eid, K.E; Abbas, M.H.H; Salem, A.A; Ahmed, N; Ali, M; Mustafa, G & Fang, C. 2019. Use of plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizae to improve the

- growth and nutrient utilization of common bean in a soil infected with white rot fungi. *Ecotoxicol Environ Saf.* 171: 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.100>.
- Pelczar, M & Chan, E.C.S. 2013. *Dasar-Dasar Mikrobiologi Jilid Ke-1*. Jakarta: Penerbit UI Press.
- Pommerville, J.C. 2011. *Alcamo's Fundamentals of Microbiology* 9th Ed. Canada: Jones and Bartlett Publishers.
- Pujiati; Ardhi, M.W dan Prasetyo, H.N. 2018. *Bioteknologi Berbasis Proyek: Produksi Purifikasi Enzim Selulase dari Kapang Trichoderma viride dan Potensi Dalam Bioscouring*. Pendidikan Biologi FKIP UNIPMA, Madiun. CV. AE MEDIA GRAFIKA. Jawa Timur.
- Raj, A; Baby, G; Dutta, S; Sarkar, A dan Rao, K.V.B. 2016. Isolation, Characterization and Antioxidant Activity of Lipase Enzyme Producing Yeast Isolated from Spoiled Sweet Sample. *Scholars Research Library*; 8(10): 129-135.
- Suanda, I.W. 2023a. Metode Pengambilan Sampel dan Kultur Mikroba dari lingkungan Dalam Buku *Mikrobiologi Lingkungan*. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Denpasar. Penerbit: PT Global Eksekutif Teknologi. Padang. Sumatra Barat. hal. 99-114.
https://drive.google.com/file/d/1PmIghNLFV_jN-YVvyef7DPdViCBD9Kfr/view?usp=sharing
- Suanda, I W. 2023b. Stroberi Sehat “Petik Langsung” *Trend Agrowisata*. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Denpasar. Penerbit: PT Global Eksekutif Teknologi. Padang. Sumatra Barat. 68 hal.
<https://globaleksekutifteknologi.co.id/stroberi-sehat-petik-langsung-trend-agrowisata/>
- Suanda, I.W. 2020. Bioteknologi Pertanian Mendukung Pertanian Berkelanjutan, dalam Buku: *Pertanian Berkelanjutan Sebuah Pendekatan Konsep dan Praktis*. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Denpasar. Penerbit: Swasta Nulus. Denpasar-Bali. Hal. 102-178.
<https://drive.google.com/file/d/13M0ryIoskcY-b-W8ZhMX3X1zSunsJPDX/view?usp=sharing>

- Suanda, I.W. 2017. Identifikasi Patogen Penyakit Akar Putih pada Tanaman Cengkeh (*Syzygium aromaticum* L.) dan Pengendalian secara Hayati. Disertasi. Program Studi Doktor Ilmu Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Udayana. Denpasar. 142 hal. <http://repo.mahadewa.ac.id/id/eprint/467>
- Sumarsih, S. 2003. Diktat Mikrobiologi Dasar. Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UPN Veteran. Yogyakarta. 116 hal.
- Suryani, Y dan Taupiqurrahman, O. 2021. Mikrobiologi Dasar. LP2M UIN Sunan Gunung Djati. Bandung.
- Sangmanee, P. & Hongpattarakere, T. 2014. Inhibitory of multiple antifungal components produced by *Lactobacillus plantarum* K35 on growth, aflatoxin production and ultrastructure alterations of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*. *Food Control*; 40: 224–233, doi:10.1016/j.foodcont.2013.12.005.
- Sengun, I.Y & Karabiyikli, S. 2011. Importance of Acetic Acid Bacteria in Food Industry. *Food Control*; 22: 647–656.
- Schwan, R.F & Wheals, A.E. 2004. The Microbiology of Cocoa Fermentation and its Role in Chocolate Quality. *Food Science and Nutrition*; 44 (4): 205-221.
- Tortora, G; Funke, B & Case, C. 2019. Microbiology an Introduction Thirteenth Edition. United State of America: Pearson.
- Widnyana, I.K; Suanda, I.W dan Ariati, P.E.P. 2023. Eksplorasi, Isolasi & Pemanfaatan PGPR (*Plant Growth Promoting Rizobacteria*) pada Tanaman Padi. Penerbit: Unmas Press. Denpasar. 74 hal. <https://lppm.unmas.ac.id/publikasi/unmaspress-204/unmaspress-204-free.pdf>
- Waluyo, L. 2016. Mikrobiologi Umum. Malang: UMM Press.
- Xiao, J.Z; Takahashi, S; Nishimoto, M; Odamaki, T; Yaeshima, T; Iwatsuki, K and Kitaoka, M. 2010. Distribution of in Vitro Fermentation Ability of Lacto-N-Biose I, A Major Building Block of Human Milk Oligosaccharides, in Bifidobacterial Strains. *Applied and Environmental Microbiology*; 76: 54-59.
- Xianfeng Ren; Qi Zhang; Wen Zhang; Jin Mao & Peiwu Li. 2020. Control of Aflatoxigenic Molds by Antagonistic Microorganisms: Inhibitory Behaviors, Bioactive

Compounds, Related Mechanisms, and Influencing Factors. Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; renxianfenga@163.com (X.R.); zhangwen@oilcrops.cn (W.Z.); maojin106@whu.edu.cn (J.M.)

Zandi, P & Basu, S.K. 2016. Role of *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) as biofertilizers in stabilizing agricultural ecosystems. In: Nandwani D. Organic farming for sustainable agriculture. (CH): *Springer International Publishing Switzerland*. pp. 1-17.

BAB 7

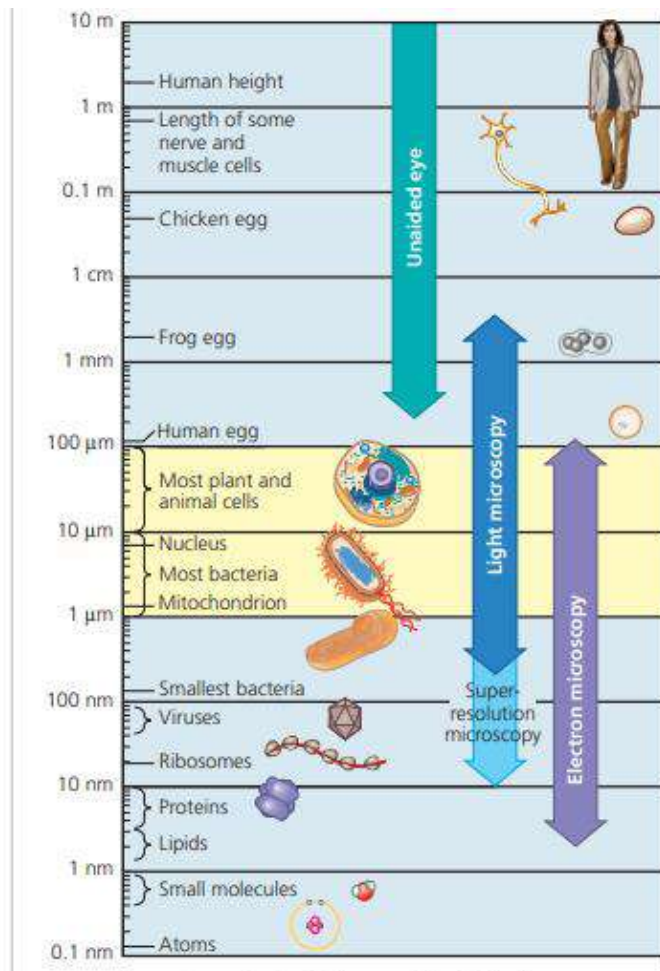
BAKTERI

Oleh Firdaus Fahdi

7.1 Pengertian Bakteri

Bakteri berasal dari kata “bakterion” (bahasa Yunani) yang berarti batang atau tongkat. Bakteri merupakan suatu entitas yang paling tua dan sederhana di muka bumi. Bakteri merupakan salah satu mikroorganisme yang bersifat mikroskopis. Artinya bakteri tidak dapat dilihat dengan mata telanjang, pengamatan bakteri harus dilakukan dibawah mikroskop. Ukuran tubuh bakteri sangat kecil, ukuran bakteri dinyatakan dengan mikrometer (μm). Bakteri terkecil adalah *Mycoplasma pneumonia*, bakteri ini sangat kecil hanya berukuran sekitar 0,3 μm , bakteri ini adalah patogen dan menyebabkan penyakit pneumonia. Sementara itu bakteri terbesar yang diketahui adalah *Epulopiscium fishelsoni*, ukurannya dapat mencapai >600 μm (Bresler et al, 1998). Seperti yang terlihat pada gambar 8.1, kita dapat melihat perbandingan ukuran makhluk hidup mulai dari manusia yang bisa dilihat dengan mata telanjang, sampai bakteri dan beberapa organel sel yang dapat dilihat menggunakan mikroskop cahaya, sampai kepada unsur terkecil pada makhluk hidup yaitu atom yang hanya dapat dilihat menggunakan mikroskop elektron.

Jumlah organisme bakteri lebih banyak dibandingkan dengan organisme lain, penyebaran bakteri menyebar diseluruh dunia. Bakteri dapat hidup di air laut, air sungai, dan darat. Selain itu bakteri juga dapat hidup di tempat-tempat ekstrem seperti tempat dengan kondisi panas maupun kondisi dingin sampai membeku. Bakteri merupakan organisme yang bersel prokaryotik.



Gambar 7.1. Perbandingan ukuran/rentang ukuran makhluk hidup dan sel.

(sumber : Campbell, N. A. dan Reece, J., 2003)

Bakteri diperkirakan sudah ada sejak 2 milyar tahun sebelum kemunculan eukaryotik. *Cyanobacteria* merupakan bakteri fotosintetik pertama dimuka bumi. Bakteri ini mampu menghasilkan oksigen sebelum tumbuhan memiliki zat hijau daun (klorofil). Bakteri memiliki peranan penting dalam produktivitas dan siklus senyawa-senyawa yang krusial bagi kelangsungan hidup organisme, bakteri merupakan satu-satunya organisme yang

mampu memperbaiki nitrogen atmosfer. Saat ini sudah ada sekitar 5000 jenis bakteri yang sudah diidentifikasi, dan masih tersisa ribuan lagi bakteri yang belum teridentifikasi. Pengklasifikasian bakteri hanya dapat dilakukan saat bakteri tersebut tumbuh pada media pertumbuhannya karena karakteristik organisme ini seringkali berubah-ubah. Pola pertumbuhan bakteri pada media padat berbeda-beda tergantung pada jenis/spesiesnya, spesies yang berbeda dapat menghasilkan koloni yang beragam (Christoper dan Bruno, 2003). Selain itu, bentuk sel bakteri sangat bervariasi, karena itu bentuk sel bakteri dikelompokkan menjadi beberapa kelompok berdasarkan bentuk dasar sel bakterinya. Bentuk sel bakteri tidak dapat berubah ke bentuk lain selama struktur dinding selnya tidak rusak. Kerusakan dinding sel bakteri dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu karena pengaruh senyawa kimia antimikroba atau antibiotik.

7.2 Morfologi Bakteri

Bakteri memiliki keanekaragaman jenis dan bentuk, bakteri tidak hanya dikelompokkan berdasarkan bentuknya saja namun juga berdasarkan cara hidup dan cara memperoleh makanannya. Bakteri memiliki ciri-ciri yang berbeda dengan organisme lain, diantaranya adalah :

1. Organisme uniseluler (bersel satu), bakteri hanya memiliki satu sel saja pada satu individu.
2. Sel bakteri adalah sel dengan tipe prokaryotik (tidak memiliki membran inti sel).
3. Tidak mempunyai klorofil.
4. Ukuran tubuhnya sangat kecil berkisar antara 0,12 mikron ratusan mikron.
5. Bentuk tubuh beraneka ragam/bermacam-macam seperti batang, bulat, dll.
6. Terdapat dinding sel.
7. Hidup bebas atau parasit.
8. Dapat ditemukan/hidup dimana saja (tanah, bahan organik, kerak bumi, limbah, air, dalam tubuh tumbuhan, hewan, manusia, dll)

9. Hidup secara kosmopolit (hidup bebas dimana saja), karena dinding selnya mengandung peptidoglikan.
10. Memiliki endospora (kapsul), endospora akan muncul saat bakteri hidup pada medi/kondisi yang tidak menguntungkan sebagai perisai terhadap panas dan gangguan alam.
11. Ada yang memiliki alat gerak (flagella) ada juga yang tidak memiliki flagella (bergerak dengan cara berguling).

7.3 Bentuk Bakteri

Pengukuran sel bakteri dapat dilakukan dengan menggunakan mikrometer okuler (Hastuti, 2012). Umumnya ukuran satuan sel bakteri dinyatakan dalam mikrometer (μm). Ukuran diameter sel bakteri berkisar antara $0,2 \mu\text{m}$ dan panjang sel nya sekitar $2-8 \mu\text{m}$ (Tortora, et al., 2010). Bakteri memiliki bentuk dasar seperti batang, bulat maupun spiral (Gambar 8.2), Bentuk dasar ini terbagi menjadi beberapa kelompok, yaitu :

1. Bakteri bentuk batang (basil)

Bakteri bentuk batang disebut juga dengan basil, berasal dari kata *bacillus* = batang. Ujung sel bakteri basil bervariasi, bisa berbentuk bulat, runcing maupun persegi. Bakteri bentuk batang terbagi lagi menjadi beberapa kategori, diantaranya adalah :

- a. Monobasil

Bakteri ini adalah bakteri yang berbentuk hanya satu batang tunggal saja, contohnya adalah bakteri *Salmonella thypii* penyebab penyakit tipus dan *Escherichia coli*.

- b. Diplobasil

Adalah bakteri yang berbentuk batang dan berjumlah dua (bergandengan dua/berpasangan). Contoh bakteri ini adalah *Renibacterium salmoninarum*.

- c. Streptobasil

Sterptobasil merupakan bakteri yang berbentuk batang dan jumlahnya banyak sehingga memanjang seperti rantai. Contoh bakteri yang berbentuk seperti ini adalah *Bacillus anthracis* dan *Acetobacter xylinum*.

2. Bakteri bentuk bulat (kokus)

Bakteri berbentuk bulat dikenal atau disebut juga dengan bakteri coccus. Bakteri ini dikelompokkan menjadi beberapa kelompok tergantung banyaknya jumlah bulatannya, diantaranya :

a. Monokokus

Adalah bakteri yang berbentuk bulat seperti bola dan hanya sendiri (tunggal). Contoh bakteri yang berbentuk bulat tunggal adalah *Neisseria gonorrhoeae*.

b. Diplokokus

Merupakan bakteri berbentuk bulat dan berpasangan/bergandengan dua-dua. Contohnya adalah *Diplococcus pneumoniae*.

c. Streptokokus

Streptokokus adalah bakteri bentuk bulat yang hidup berkoloni dan saling berikatan memanjang seperti rantai. Contohnya *Streptococcus lactis*, *Streptococcus pneumoniae*.

d. Tetrakokus

Kelompok bakteri tetrakokus adalah bakteri yang berbentuk koloni/berkelompok membentuk bujur sangkar dan terdiri dari empat sel. Contoh bakteri yang tergolong tetrakokus adalah *Pediococcus cerevisiae*.

e. Sarkina

Sarkina merupakan bakteri yang membentuk koloni seperti kubus, terdiri dari 8 sel yang membentuk sebuah kubus/kotak. Contoh bakteri ini adalah *Sarcina ventriculi*.

f. Stafilokokus

Merupakan kelompok bakteri yang membentuk koloni bergerombol menyerupai bentuk anggur, contoh bakteri ini adalah *Staphylococcus aureus*.

3. Bakteri bentuk spiral

Bakteri ini berbentuk melengkung dan panjang menyerupai spiral, karena itu disebut bakteri spiral. Bakteri ini biasanya

hidup secara soliter dan tidak berkoloni. Bakteri spiral dapat dibedakan menjadi 3 kelompok, yaitu :

a. Spiral

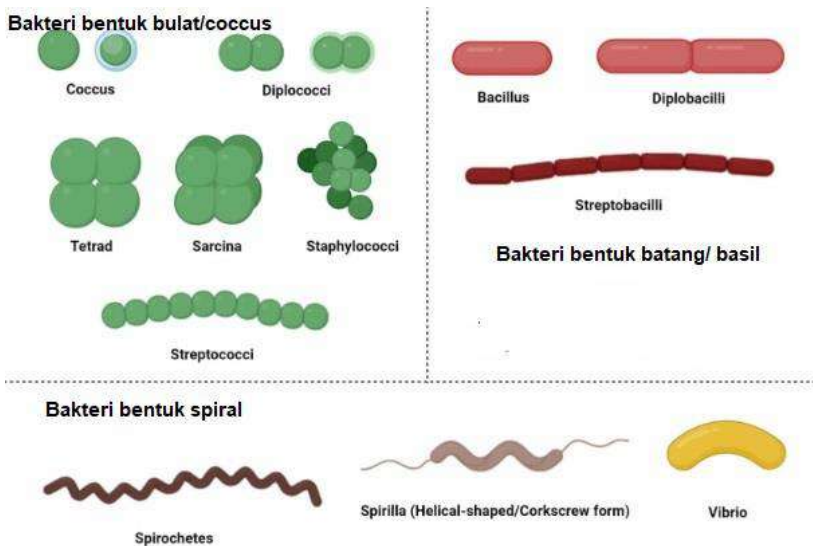
Bakteri ini berbentuk melengkung melebihi setengah lingkaran, bentuk spiral juga kerap dianggap bentuk heliks. Jenis bakteri yang termasuk bakteri ini adalah *Helicobacter pylori*.

b. Vibrio

Vibrio merupakan kelompok bakteri yang berbentuk melengkung kurang dari setengah lingkaran, sehingga terlihat seperti bentuk koma. Contoh bakteri ini adalah *Vibrio cholera*.

c. Spiroseta

Adalah golongan bakteri yang berbentuk spiral. Bakteri ini mempunyai tekstur halus dan lentur. Saat bergerak tubuh bakteri tersebut dapat memanjang dan memendek secara fleksibel. Contoh bakteri jenis ini adalah *Treponema pallidum*.



Gambar 7.2. Bentuk bakteri bulat, batang dan spiral
(Sumber : <https://microbenotes.com/bacterial-sizes-shapes-arrangement/>)



(a) Coccus/bulat



(b) Bacillus/batang



(c) Spiral

Gambar 7.3. Penampakan bakteri bulat, batang dan spiral
(sumber : Campbell, N. A. dan Reece, J., 2003)

DAFTAR PUSTAKA

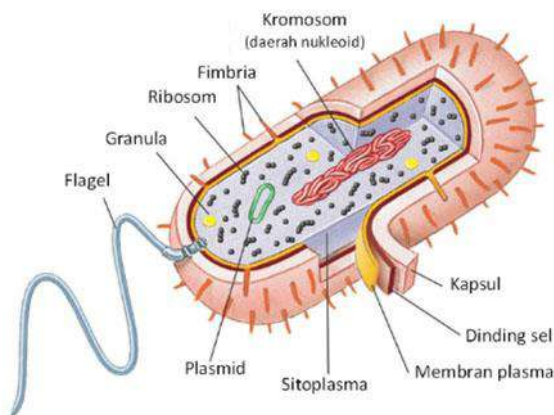
- Campbell, N. A., & sReece, J. 2003. *Campbell Biology 11th Edition*. New York: Pearson Higher Education.
- Christopher, K., & Bruno, E. 2003. Identification of bacterial species. In Tested studies for laboratory teaching. Ed., O'Donnell MA. Proceedings of the 24th Workshop/ Conference of 103-130.
- Boleng, D. T. 2015. *Bakteriologi : Konsep-Konsep Dasar* . Malang : UMM Press.
- Hastuti, U.S. 2012. Penuntun Praktikum Mikrobiologi. Malang: UMM Press.
- Parija, S. C. 2012. *Textbook of Microbiology and Immunology 2nd Edition* . New Delhi : Elsevier.
- V, Bresler., W, L. Montgomery., L, F., & P, E. Pollak. 1998. Gigantism in a Bacterium, *Epulopiscium fishelsoni*, Correlates with Complex Patterns in Arrangement, Quantity, and Segregation of DNA. *Journal of Bacteriology*, 180(21), 5601-5611.
- Young , K. D. 2007. Bacterial Morphology : Why Have Different Shapes? *Current Opinion in Microbiology*, 596-600.
- Tortora, G.J.; Funke, B.R.; Case, C.L. 2010. Microbiology. San Francisco: Benjamin Cummings.

BAB 8

STRUKTUR BAKTERI

Oleh Dina Aribah

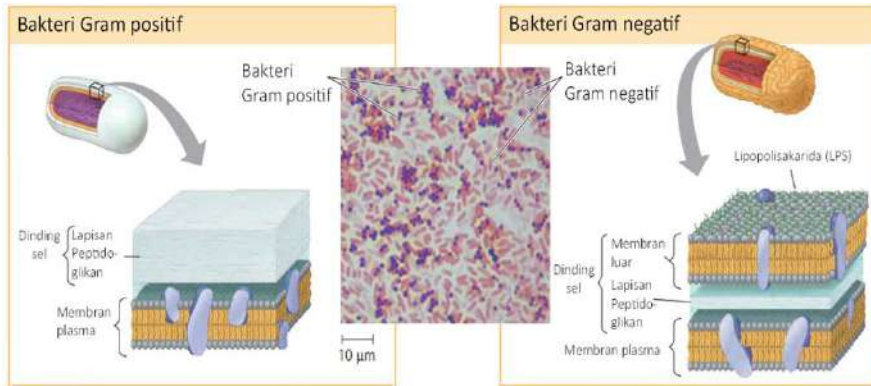
Bakteri merupakan makhluk hidup prokariot yang tersusun atas satu sel atau dapat disebut dengan organisme uniseluler. Umumnya suatu spesies bakteri berkumpul secara permanen atau temporer membentuk suatu koloni. Sel prokariot seperti bakteri memiliki ukuran yang jauh lebih kecil dibanding sel eukariot yaitu hanya berkisar 0,2-700 μm . Bentuk sel prokariot yang paling umum diantaranya bulat (kokus), batang (basilus), dan spiral (Madigan *et al*, 2015). Walaupun sel bakteri sangat sederhana dan kecil, semua metabolisme terorganisasi dengan baik karena setiap struktur organ berjalan sesuai dengan fungsinya. Struktur bakteri terdiri atas struktur eksternal dan internal. Struktur eksternal merupakan bagian yang berada pada lapisan luar bakteri diantaranya: dinding sel, glikokaliks (kapsul), fimbria (pilus pelekatan), pilus seks, dan flagel. Sedangkan struktur internal merupakan bagian yang berada di dalam sel bakteri seperti membran plasma, sitoplasma, ribosom, nukleoid, genom (kromosom dan plasmid), inklusi, dan struktur internal terspesialisasi lainnya (Gambar 8.1).



Gambar 8.1. Struktur eksternal dan internal sel bakteri

8.1 Dinding Sel dan Membran Plasma

Dinding sel merupakan struktur utama dari hampir semua prokariot yang berfungsi untuk mempertahankan bentuk sel, melindungi secara fisik, dan mencegah sel pecah akibat kondisi lingkungan yang tidak baik (Campbell *et al*, 2020). Dinding sel bakteri tersusun atas peptidoglikan dan membran.

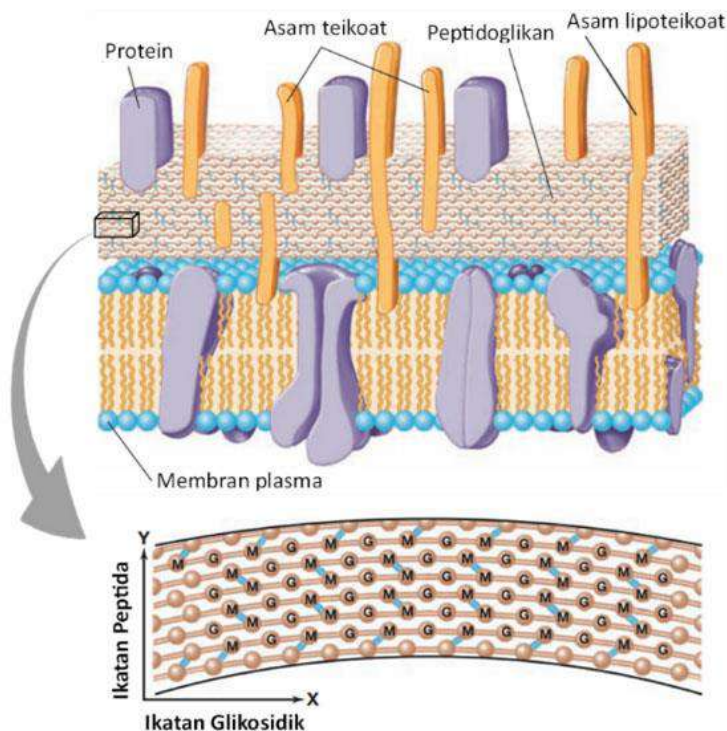


Gambar 8.2. Perbedaan struktur dinding sel bakteri dan respon pewarnaan Gram pada mikroskop
(Sumber : Campbell *et al*, 2020)

Berdasarkan komposisi dinding selnya, bakteri diklasifikasikan menjadi dua kelompok yaitu Gram positif dan Gram negatif. Teknik umum yang digunakan untuk menentukan kelompok bakteri adalah pewarnaan Gram. Teknik ini dikembangkan oleh dokter Hans Christian Gram asal Denmark pada abad ke-19. Pada pewarnaan Gram, pertama sampel diberi pewarna utama kristal violet dan iodin, kemudian dibilas dengan alkohol, dan terakhir diberi pewarna merah safranin. Bakteri Gram positif memiliki susunan dinding sel yang lebih sederhana dengan peptidoglikan yang lebih tebal pada lapisan luar. Peptidoglikan relatif menyerap pewarna kristal violet dan pembilasan dengan alkohol tidak menghilangkan warna tersebut, sehingga respon sel bakteri akan terlihat berwarna ungu pada mikroskop. Sedangkan bakteri Gram negatif memiliki susunan dinding sel yang lebih kompleks dengan peptidoglikan yang lebih tipis dan terletak

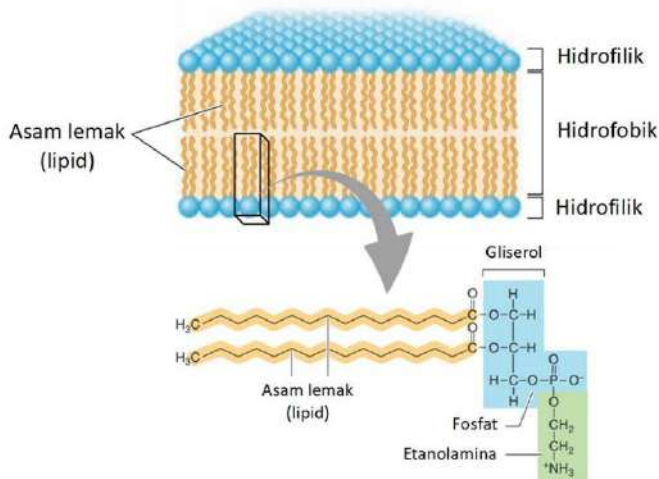
diantara lapisan membran plasma dan membran lapisan luar. Membran lapisan luar mengandung lipopolisakarida yaitu karbohidrat yang berikatan dengan lipid. Pembilasan dengan alkohol akan merusak lipid dan menghilangkan warna kristal violet, selanjutnya bakteri akan mudah menyerap pewarna safranin, sehingga respon sel akan terlihat berwarna merah pada mikroskop (Campbell *et al*, 2020). Perbedaan struktur dinding sel bakteri dan respon pewarnaan Gram pada mikroskop dapat dilihat pada Gambar 8.2.

Peptidoglikan adalah suatu jaringan polisakarida yang tersusun dari molekul turunan gula N-asetilglukosamin (G) dan N-asam asetilmuramat (M) yang saling berikatan silang. Struktur peptidoglikan distabilkan oleh adanya ikatan kovalen dengan asam teikoat dan asam lipoteikoat. Molekul G dan M diikat melalui ikatan glikosidik pada arah sumbu X, sedangkan molekul antar M diikat melalui ikatan peptida pada arah sumbu Y sehingga terhubung dengan lapisan peptidoglikan lainnya (Gambar 8.3) (Madigan *et al*, 2015).



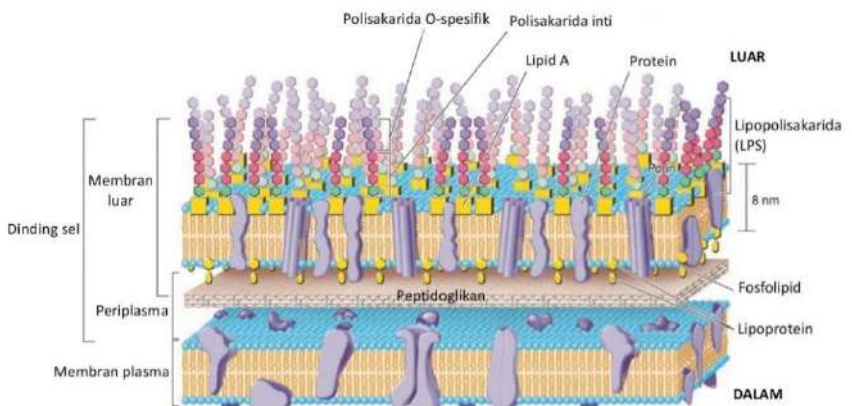
Gambar 8.3. Struktur dinding sel bakteri Gram positif
(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

Membran plasma terletak dibawah lapisan peptidoglikan pada bakteri Gram positif maupun Gram negatif. Struktur membran plasma pada bakteri sama dengan membran plasma pada eukariot yaitu fosfolipid bilayer. Bagian kepala polar berupa fosfat dan gliserol yang memiliki sifat hidrofilik (suka air) berikatan dengan dua bagian ekor berupa lipid yang memiliki sifat hidrofobik (tidak suka air). Struktur membran plasma dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 8.4 (Madigan *et al*, 2015). Lapisan membran ini memiliki fungsi yang sangat penting bagi sel bakteri diantaranya: (1) barrier permeabilitas, yaitu mencegah kebocoran dan sebagai gerbang keluar masuknya suatu zat; (2) tempat jangkar protein, situs melekatnya banyak protein yang terlibat dalam transportasi nutrisi, bioenergi, dan kemotaksis; dan (3) konservasi energi (Campbell *et al*, 2020).



Gambar 8.4. Struktur membran plasma bakteri
(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

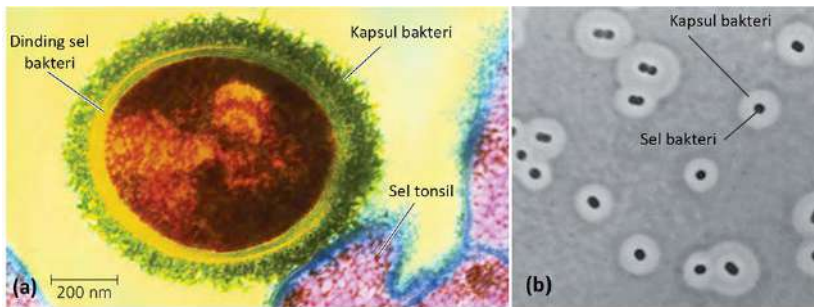
Perbedaan utama bakteri Gram negatif yang tidak ditemukan pada dinding sel bakteri Gram positif adalah adanya membran bagian luar dengan komponen lipopolisakarida (LPS). LPS tersusun atas rantai polisakarida O-spesifik, polisakarida inti, dan lipid A. Pada lapisan ini juga terdapat protein porin yang berfungsi sebagai pintu masuk molekul dari luar sel. Membran luar ini dihubungkan dengan peptidoglikan oleh lipoprotein pada daerah periplasma (Gambar 8.5) (Madigan *et al*, 2015).



Gambar 8.5. Struktur dinding sel bakteri Gram negatif
(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

8.2 Glikokaliks (Kapsul)

Glikokaliks adalah lapisan eksternal bakteri yang lengket dan tersusun atas polisakarida dan protein, yang terlibat dalam pembentukan biofilm (Gambar 8.6). Glikokaliks pada bakteri secara umum dikenal dengan kapsul atau *slime layer*. Kapsul memiliki fungsi utama yaitu membantu sel melekat pada substrat, inang, atau sel lain dalam satu koloni. Kapsul juga dapat melindungi bakteri dari dehidrasi dan serangan sistem kekebalan inangnya. Umumnya kapsul dijadikan sebagai faktor virulensi pada bakteri infeksius (Campbell *et al*, 2020).



Gambar 8.6. (a) Penampakan TEM-berwarna kapsul bakteri *Streptococcus* yang melekat pada sel tonsil dan (b) penampakan mikroskopik kapsul bakteri *Acinetobacter* dengan pewarnaan negatif tinta india

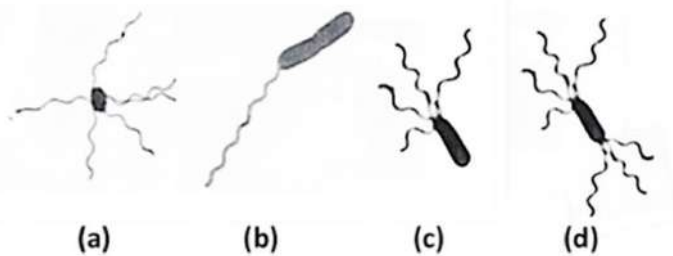
(Sumber : (a) Campbell *et al*, 2020 dan (b) Madigan *et al*, 2015)

8.3 Flagel

Sepuluh dari semua sel bakteri mampu melakukan motilitas atau pergerakan. Kecepatan gerak bakteri dapat mencapai lebih dari 50 $\mu\text{m}/\text{detik}$ (50 kali panjang selnya perdetik). Motilitas bakteri dapat terjadi karena adanya struktur yang disebut dengan flagel. Bakteri melakukan pergerakan untuk propulsi dan menuju atau menjauhi suatu rangsangan. Dalam lingkungan yang relatif homogen/tanpa ada rangsangan, flagel dapat bergerak secara acak. Sedangkan dalam lingkungan yang heterotrof/ada rangsangan, flagel cenderung bergerak dalam satu arah yaitu menuju atau menjauhi rangsangan (taksis) (Campbell *et al*, 2020). Pergerakan taksis yang sering terjadi pada bakteri adalah kemotaksis (respon

terhadap rangsangan zat kimia), fototaksis (respon terhadap rangsangan cahaya), dan magnetotaksis (pergerakan sepanjang garis medan magnet). Contoh pergerakan pada *Escherichia coli* yang bergerak menuju suatu rangsangan (kemotaksis positif) atau menjauhi zat toksik (kemotaksis negatif) (Madigan *et al*, 2015).

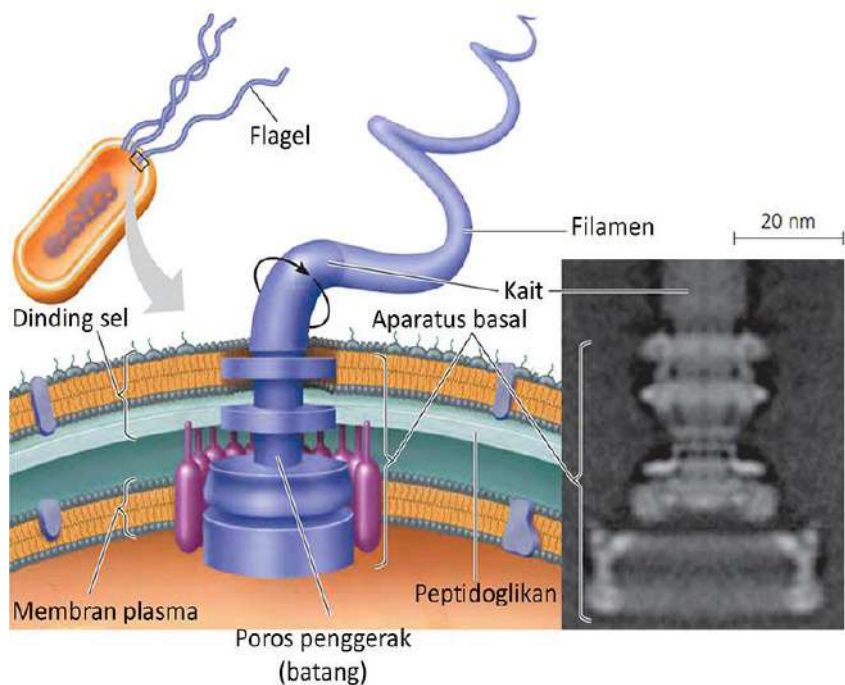
Suatu individu bakteri dapat memiliki lebih dari satu flagel dan tersebar diseluruh permukaan sel atau terpusat pada salah satu atau kedua ujungnya. Berdasarkan letak dan jumlahnya, flagel terdiri atas monotrik (flagel terletak pada salah satu ujung sel), lopotrik (flagel mengelompok pada salah satu ujung sel), amfitrik (flagel mengelompok pada kedua ujung sel), dan peritrik (flagel terletak di seluruh permukaan sel) (Gambar 8.7) (Madigan *et al*, 2015).



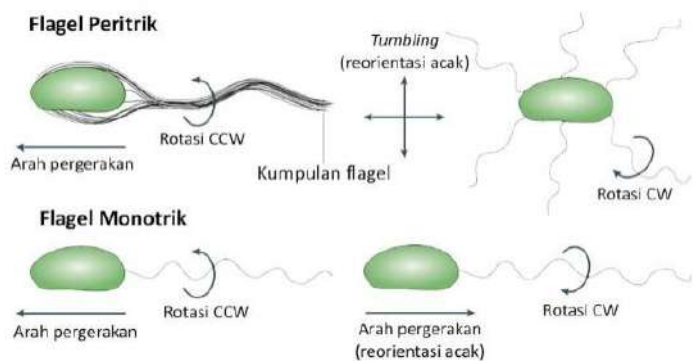
Gambar 8.7. Jenis flagel sel bakteri (a) peritrik, (b) monotrik, (c) lopotrik, dan (d) amfitrik
(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

Sistem pusat penggerak flagel bakteri adalah apparatus basal, struktur seperti cincin yang tertanam dalam dinding sel dan membran plasma. Pada cincin apparatus basal terhubung suatu kait melengkung yang melekat pada rantai flagellin (protein globular) yang disebut filamen. Energi berupa ATP akan membantu dalam pengaturan transpor keluar masuknya proton dan menggerakkan apparatus basal secara langsung, akibatnya bagian kait melengkung dan filamen memutar sehingga terjadi pergerakan sel bakteri (Gambar 8.8) (Campbell *et al*, 2020). Perputaran flagel berlawanan arah jarum jam (CCW) akan mendorong pergerakan maju, sedangkan perputaran searah jarum jam (CW) akan membentuk

pergerakan reorientasi secara acak. Panah menunjukkan arah pergerakan sel (Gambar 8.9) (Madigan *et al*, 2015).



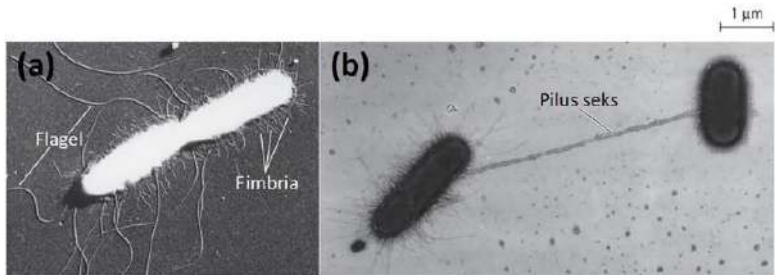
Gambar 8.8. Struktur flagel sel bakteri (penampakan TEM Aparatus basal) (Sumber : Campbell *et al*, 2020)



Gambar 8.9. Pergerakan flagel peritrik dan monotrik (Sumber : Butler dan Andrew, 2005)

8.4 Fimbria dan Pilus Seks

Fimbria (Jamak fimbriae) dan pilus (Jamak pili) merupakan tonjolan seperti rambut atau bulu halus yang tumbuh banyak mengelilingi bakteri. Struktur fimbria dan pilus berupa filamen protein pilin oligomer yang tersusun secara heliks membentuk silinder. Fimbria dan pilus berukuran lebih kecil, lebih pendek, dan lebih banyak dari flagel. Fungsi utama fimbria adalah membantu pelekatan sel ke sel yang lain atau substrat (inang), dengan demikian fimbria juga dapat disebut dengan pilus pelekatan. Fimbria ini banyak ditemukan pada sel bakteri Gram negatif yang memiliki sifat antigenik dan hemaglutinasi. Sedangkan pilus seks atau pili seks berfungsi untuk konjugasi yaitu menghubungkan dua sel melalui pembentukan jembatan untuk transfer DNA dari sel donor ke sel resipien. Pilus biasanya lebih Panjang dan lebih sedikit dibanding fimbria. Struktur fimbria dan pilus seks secara mikroskopik dapat dilihat pada Gambar 8.10 (Campbell *et al*, 2020).



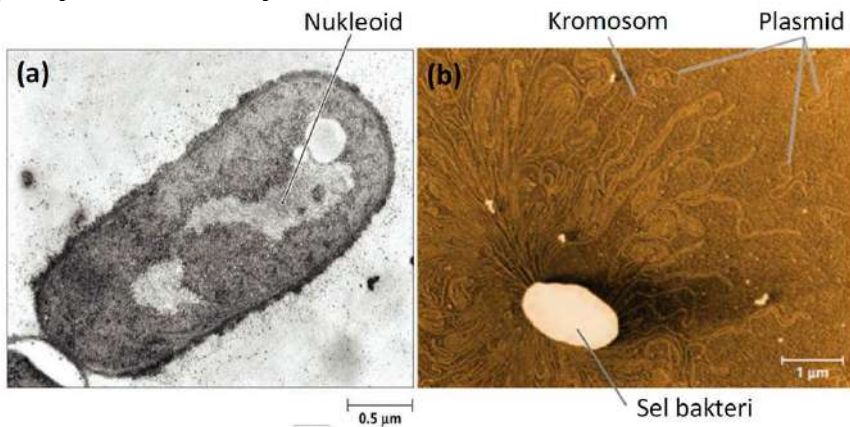
Gambar 8.10. (a) Penampakan Fimbria *Salmonella typhi* pada mikroskop elektron dan (b) TEM pilus seks *Escherichia coli*, sel donor (kiri) menjulurkan pilus seks yang melekat ke sel resipien (kanan)

(Sumber : Madigan *et al*, 2015)

8.5 Genom

Sel bakteri tidak memiliki nukleus, sehingga genomnya terkonsentrasi pada suatu daerah yang disebut **nukleoid**, daerah yang tampak lebih terang tersebut tidak memiliki membran pemisah dengan daerah sitoplasma (Gambar 8.11a). Genom ini berfungsi untuk mengatur seluruh aktivitas metabolisme pada

bakteri. Genom bakteri terdiri atas kromosomal dan ekstrakromosomal. Kromosom bakteri dapat berbentuk RNA atau sebagian besar DNA superkoil atau melingkar yang jumlahnya jauh lebih sedikit dibanding kromosom eukariot (Gambar 9.11b). Contoh pada bakteri *Escherichia coli* hanya memiliki 1 dsDNA superkoil dengan panjang mencapai ± 4700 kb. Sedangkan ekstrakromosomal seringkali berbentuk seperti cincin DNA yang ukurannya lebih kecil disebut **plasmid**. Plasmid berada bebas diluar kromosom yang bereplikasi secara terpisah dan umumnya dimanfaatkan pada penelitian bioteknologi untuk rekayasa gen atau lainnya (Gambar 8.11b). Replikasi, transkripsi, dan translasi DNA pada prokariot memiliki proses yang sama dengan eukariot, perbedaan hanya terletak pada tidak adanya struktur ekson pada sel bakteri sehingga RNA hasil transkripsi dapat ditranslasikan langsung menjadi protein (Campbell *et al*, 2020).



Gambar 8.11/ (a) Penampakan TEM daerah nukleoid dan (b) Genom yang keluar dari sel *Escherichia coli* yang pecah, terlihat satu kromosom sirkular dan tiga plasmid
(Sumber : Campbell *et al*, 2020)

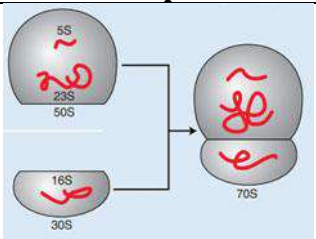
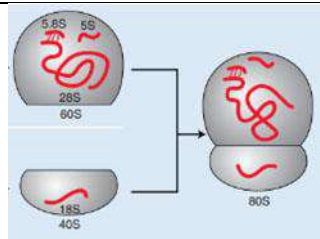
8.6 Ribosom dalam Sitoplasma

Sitoplasma adalah suatu substansi seperti gel yang mengisi seluruh ruang sel bakteri dan dilindungi oleh membran plasma. Sitoplasma tersusun atas air, protein, lipid, asam nukleat, garam anorganik, dan lain-lain. Sebagian besar aktivitas metabolisme

terjadi di dalam sitoplasma. Pada sel bakteri struktur internal berupa ribosom, plasmid, badan inklusi seperti granula dan vesikel udara terletak di dalam sitoplasma (Madigan *et al*, 2015).

Ribosom berada bebas dalam sitoplasma sel bakteri dan berperan penting pada proses translasi saat sintesis protein. Komponen utama penyusun ribosom adalah rRNA dan protein. Ribosom sel prokariot memiliki ukuran yang lebih kecil dibanding ribosom sel eukariot, perbedaan ribosom sel prokariot dan eukariot dapat dilihat pada tabel 8.1 (Griffiths et al, 2004)

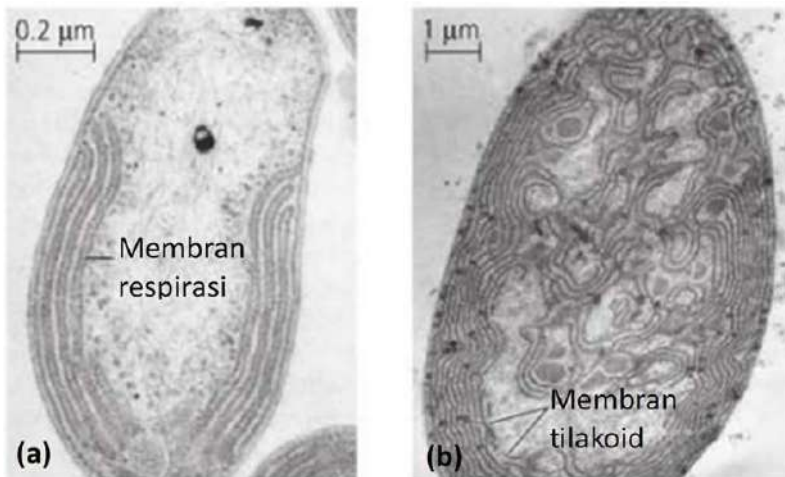
Tabel 8.1. Perbedaan ribosom sel prokariot dan eukariot

Karakteristik	Ribosom sel prokariot	Ribosom sel eukariot
Ilustrasi		
Koefisien sedimentasi	70S	80S
Jumlah subunit	2 (1 subunit besar dan 1 subunit kecil)	2 (1 subunit besar dan 1 subunit kecil)
Subunit besar	Koefisien sedimentasi: 50S Komponen : - 5S RNA (120 nukleotida) - 23S RNA (2900 nukleotida) 34 protein yang berbeda	Koefisien sedimentasi: 60S Komponen : - 5S RNA (120 nukleotida) - 5.8S RNA (160 nukleotida) - 28S RNA (4700 nukleotida) 48 protein yang berbeda
Subunit kecil	Ukuran : 30S Komponen : - 16S RNA (1540 nukleotida) 21 protein yang berbeda	Ukuran : 40S Komponen : - 18S RNA (1900 nukleotida) 33 protein yang berbeda

Sumber : Griffiths et al, 2004

8.7 Struktur Internal lainnya

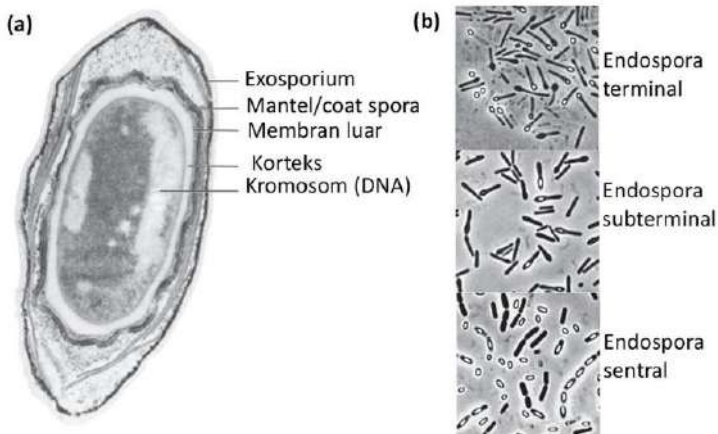
Sel bakteri memiliki struktur yang sangat sederhana dibanding sel eukariot. Beberapa sel bakteri memiliki membran terspesialisasi yaitu organ yang terbentuk akibat pelipatan ke dalam dari membran plasma. Pelipatan dapat membentuk suatu organel yang mirip krista mitokondria berfungsi untuk respirasi seluler pada bakteri aerob (Gambar 8.12a). Pelipatan membran ke dalam juga dapat membentuk tilakoid yaitu organel mirip kloroplas berfungsi untuk fotosintesis pada bakteri fotosintetik (Gambar 8.12b) (Campbell *et al*, 2020).



Gambar 8.12. Membran terspesialisasi membentuk (a) krista mitokondria pada bakteri aerob dan (b) tilakoid pada bakteri fotosintetik - penampakan TEM
(Sumber : Campbell *et al*, 2020)

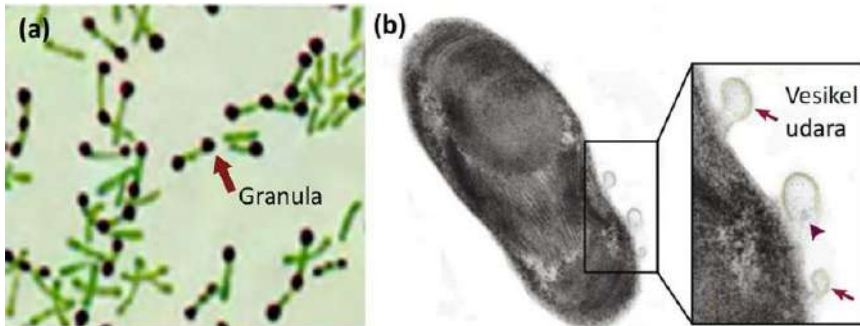
Beberapa spesies bakteri juga dapat membentuk suatu struktur internal lain yang disebut endospora. Endospora merupakan struktur untuk bertahan hidup saat berada pada kondisi lingkungan yang ekstrim seperti kurangnya sumber makanan, suhu ekstrim, zat kimia toksik, dan radiasi. Saat kondisi lingkungan kembali normal, bakteri akan berubah kembali ke bentuk sel vegetatif. Struktur endospora berurutan dari lapisan luar ke dalam terdiri atas: exosporium (protein), mantel/*coat* spora (protein),

membran luar (lipoprotein), korteks (modifikasi peptidoglikan), dinding sel germinal (peptidoglikan), membran dalam (lipoprotein), genom (DNA, RNA, Protein, *small acid-soluble spore proteins*/SASPa, *dipicolinic acid*/DPA, dan Ca^{2+}) (Gambar 8.13a). Berdasarkan letaknya, endospora bakteri dibagi menjadi tiga jenis yaitu terminal, subterminal, dan sentral endospora (Gambar 8.13b) (Madigan *et al*, 2015).



Gambar 8.13. (a) Penampakan TEM struktur endospora bakteri dan (b) tiga jenis endospora berdasarkan letaknya (Sumber : Madigan *et al*, 2015)

Beberapa spesies bakteri juga dilengkapi dengan adanya struktur badan inklusi yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan seperti karbon, energi, makanan, sulfur, fosfat, atau zat kimia yang lainnya. Badan inklusi ini terbentuk dari kumpulan jenis protein yang teragregasi dan berada bebas di sitoplasma (Madigan *et al*, 2015). Contoh badan inklusi diantaranya adalah granula sebagai tempat penyimpanan makanan pada bakteri infeksius *Corynebacterium diphtheriae* (Gambar 8.14a) (Uthman *et al*, 2012) dan vesikel udara pada bakteri fotosintetik yang hidup dalam perairan. Vesikel udara ini memungkinkan bakteri air mengapung ke permukaan untuk melakukan fotosintesis (Gambar 8.14b) (Silva *et al*, 2013).



Gambar 8.14. (a) Penampakan mikroskopik struktur granula pada *C. diphtheriae* dengan pewarnaan Albert dan (b) penampakan TEM struktur vesikel udara pada bakteri akuatik
(Sumber : (a) Uthman *et al*, 2012 dan (b) Silva *et al*, 2013)

DAFTAR PUSTAKA

- Butler SM, Andrew C. 2005. Going against the grain: chemotaxis and infection in *Vibrio cholerae*. *Nature Reviews Microbiology*. 3(8): 611–620. doi:10.1038/nrmicro1207.
- Campbell NA, Urry LA, Cain ML, Wasserman SA, Minorsky PV, Orr RB. 2020. *Campbell Biology*. 12th Edition. New York: Pearson.
- Griffiths AJF, Wessler SR, Lewontin RC, Gelbart WM, Suzuki DT, Miller JH. 2004. *An Introduction to Genetic Analysis*, 8th Edition. New York: W. H. Freeman and Company.
- Madigan MT, Martinko JM, Bender KS, Buckley DH, Stahl DA. 2015. *Brock Biology of Microorganisms* 14th Edition. New York: Pearson.
- Silva TP, Noyma NP, Duque TLA, Gamalier JP, Vidal LO, Lobaõ LM, Chiarini-Garcia H, Roland F, Melo RCN. 2013. Visualizing aquatic bacteria by light and transmission electron microscopy. *Antonie van Leeuwenhoek*. doi: 10.1007/s10482-013-0047-6.
- Uthman S, Liu S, Giorgini F, Stark MJR, Costanzo M, Schaffrath R. 2012. Diphtheria Disease and Genes Involved in Formation of Diphthamide, Key Effector of the Diphtheria Toxin. *Insight and Control of Infectious Disease in Global Scenario*. 333-356. doi: 10.5772/31680.

BAB 9

REPRODUKSI BAKTERI

Oleh Stormy Vertygo

9.1 Pendahuluan

Reproduksi bakteri adalah suatu proses biologis basal yang sangat penting untuk kelangsungan hidup dan proliferasi bakteri, yang merupakan mikroorganisme paling beragam dan tersebar luas pada berbagai lingkungan di Bumi. Berbeda dengan organisme multiseluler yang lebih kompleks, bakteri bersifat uniseluler, tanpa membran inti (prokariotik) dan tidak memiliki sistem endomembran (membran dalam). Meskipun demikian, kemampuannya untuk berkembang biak sangat efisien dan adaptif.

Beberapa faktor memengaruhi reproduksi bakteri. Pertumbuhan dan kelangsungan hidup bakteri bergantung pada banyak parameter yang berkaitan dengan strain dan lingkungan tempatnya hidup. Faktor-faktor seperti suhu, kelembaban relatif, nutrisi yang cukup, pH, kondisi udara, dan tekanan osmotik, diperlukan untuk pertumbuhan dan reproduksi bakteri. Selain itu, keberadaan air juga termasuk faktor yang signifikan, karena bakteri sering bertumbuh pada lingkungan yang lembab. Dalam rentang suhu yang sesuai, air yang tersedia menjadi komponen yang diperlukan dan merupakan kondisi penting untuk kelangsungan hidup bakteri. Bakteri tidak dapat tumbuh atau berkembang biak secara normal di dalam lingkungan yang kering.

Bakteri dapat menyesuaikan tingkat reproduksinya sebagai respons terhadap isyarat lingkungan yang semakin memperlihatkan kemampuannya untuk berkembang biak pada berbagai habitat ekologis. Selain itu, beberapa jenis bakteri telah mengembangkan strategi reproduksi unik, seperti pembentukan spora ataupun pertukaran materi genetik melalui proses seperti konjugasi.

Memahami reproduksi bakteri tidak hanya penting untuk pengetahuan biologi dasar, tetapi juga memiliki implikasi signifikan dalam berbagai bidang, termasuk kedokteran, bioteknologi, dan

ilmu lingkungan. Kemampuan bakteri untuk berkembang biak dan beradaptasi dengan cepat ini memiliki dampak pada kesehatan manusia, karena berperan dalam perkembangan resistensi antibiotik. Selain itu, pemanfaatan prinsip reproduksi bakteri memiliki aplikasi dalam proses bioteknologi, seperti produksi protein rekombinan dan pengolahan air limbah.

Reproduksi bakteri dapat dibedakan menjadi 2 kategori utama: Reproduksi Aseksual dan Reproduksi Seksual. Reproduksi Aseksual dibagi lagi menjadi: Pembelahan Biner, Kuncup (*budding*), dan Pembentukan Spora (Sporulasi). Untuk Reproduksi Seksual dapat dilakukan melalui 3 mekanisme: Transformasi, Konjugasi dan Transduksi.

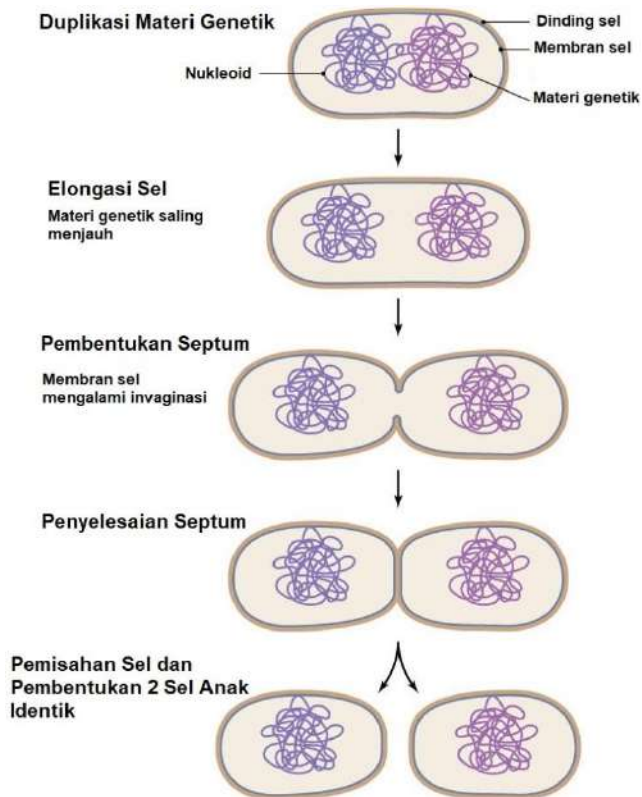
9.2 Reproduksi Aseksual

Reproduksi aseksual bakteri merupakan suatu proses biologis di mana bakteri mereplikasi dirinya dan berkembang biak tanpa melibatkan pasangan. Berbeda dengan reproduksi seksual yang melibatkan pertukaran material genetik antara dua individu, reproduksi aseksual pada bakteri adalah cara yang cepat dan efisien untuk menghasilkan keturunan yang komposisi genetiknya sama atau identik dengan sel induknya.

Bakteri terkenal karena adaptabilitas dan ketahanannya, dan kontributor signifikan terhadap keberhasilannya tersebut terletak pada kemampuannya untuk bereproduksi secara aseksual melalui berbagai mekanisme. Bentuk reproduksi aseksual yang paling umum pada bakteri meliputi pembelahan biner, tunas, dan sporulasi, masing-masing dengan karakteristik unik yang disesuaikan dengan kebutuhan spesies bakteri yang berbeda dan tantangan lingkungan yang sedang dihadapi.

9.2.1 Pembelahan Biner (*Binary Fission*)

Pembelahan Biner (*Binary fission*) adalah bentuk reproduksi aseksual di mana satu sel induk membelah menjadi dua sel anak yang berukuran sama dan identik secara genetik. Proses ini umumnya diamati pada bakteri dan juga pada organisme uniseluler lainnya. Proses reproduksi aseksual ini terjadi menurut langkah-langkah berikut:



Gambar 9.1. Pembelahan Biner
(Sumber: Reece et al., 2011)

1. **Duplikasi Materi Genetik**
Sebelum proses dimulai, sel bakteri menggandakan materi genetiknya (biasanya berupa molekul DNA lingkaran tunggal) melalui proses yang disebut replikasi DNA. Hal ini menghasilkan pembentukan dua salinan identik dari kromosom bakteri.
2. **Elongasi Sel**
Sel bakteri memanjang saat bersiap untuk membelah. Elongasi ini sering disertai dengan peningkatan volume sel.
3. **Pembentukan Septum**
Sebuah septum, atau dinding pemisah, mulai terbentuk di tengah sel. Septum ini dibentuk oleh pertumbuhan ke dalam membran sel dan dinding sel.

4. Penyelesaian Septum

Septum terus bertumbuh hingga sepenuhnya memisahkan sel induk menjadi dua sel anak yang berbeda.

5. Pemisahan Sel

Akhirnya, dua sel anak terpisah sepenuhnya, masing-masing mengandung salinan materi genetik yang direplikasi. Pemisahan ini biasanya dicapai dengan penyelesaian septum dan sintesis komponen membran sel dan dinding sel yang baru.

6. Pembentukan Dua Sel Anak Identik

Hasil dari pembelahan biner adalah dihasilkannya dua sel anak yang komposisi genetiknya sama. Setiap sel anak mewarisi salinan materi genetik sel induk, sehingga menjamin kelangsungan genetiknya.

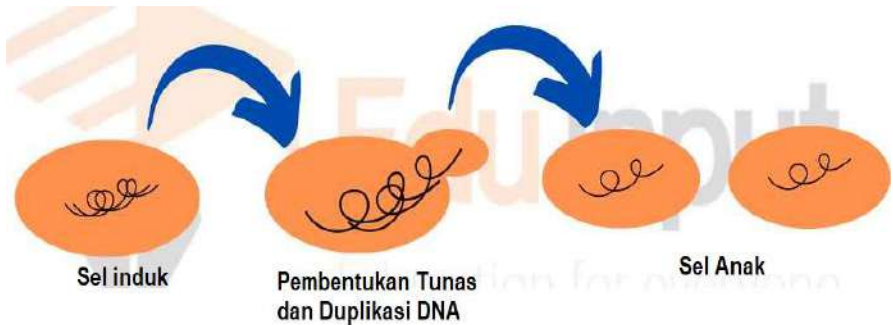
Selama proses ini berlangsung, serangkaian aktivitas fisiologis juga akan membentuk sebuah kompleks multiprotein yang disebut divisome. Divisome akan terlibat dalam pemisahan materi genetik yang telah terduplikasi, peleukukan (invaginasi) membran sel dan sintesis material penyusun dinding sel (misalnya: peptidoglikan) yang memediasi pemisahan sel selama proses pembelahan.

Meskipun pembelahan biner merupakan strategi reproduksi utama yang digunakan oleh organisme prokariotik, namun beberapa spesies telah teramati dapat pula melakukan strategi reproduksi lainnya. Beberapa bakteri, termasuk *Streptomyces* yang memproduksi antibiotik dan *Bdellovibrio* yang bersifat predator, berkembang biak melalui pembelahan nonbiner, di mana tiga atau lebih salinan kromosom disintesis, dan sel berfilamen multinukleoid yang dihasilkan membelah menjadi sel-sel anak yang banyak jumlahnya. Selain itu, juga teramati kemampuannya untuk beralih di antara pembelahan biner dan nonbiner yang berkorelasi dengan ukuran mangsanya. Pada sel mangsa yang relatif kecil, *B. bacteriovorus* mengalami pembelahan biner yang membelah menjadi dua sel anak. Pada sel mangsa yang lebih besar, *B. bacteriovorus* akan beralih ke

pembelahan nonbiner untuk menghasilkan tiga atau lebih sel anak.

9.2.2 Kuncup (*Budding*)

Kuncup (*Budding*) adalah bentuk reproduksi aseksual yang diamati pada beberapa bakteri. Berbeda dengan pembelahan biner yang menghasilkan dua sel anak yang berukuran hampir sama, *budding* melibatkan pembentukan tonjolan kecil atau "tunas" pada sel induk, yang akhirnya menghasilkan sel anak dengan ukuran yang berbeda (biasanya lebih kecil dari ukuran sel induk). Tunas ini akhirnya tumbuh menjadi sel anak yang struktur genetiknya sama. Mekanismenya terjadi menurut proses berikut:



Gambar 9.2. Kuncup (*Budding*)
(Sumber: Batool, 2022)

1. **Inisiasi Pembentukan Tunas**
Proses ini dimulai dengan inisiasi tonjolan atau tunas pada permukaan sel bakteri. Tunas ini mewakili tonjolan dari membran sel dan dinding sel.
2. **Duplikasi DNA**
Seperti pada pembelahan biner, materi genetik (biasanya berupa molekul DNA lingkaran tunggal atau plasmid) mengalami duplikasi, menghasilkan dua salinan kromosom bakteri.
3. **Pertumbuhan Tunas**
Tunas terus tumbuh seiring dengan segregasinya DNA yang telah diduplikasi ke dalam tunas. Pertumbuhan ini sering

disertai dengan sintesis komponen membran sel dan dinding sel baru.

4. Berakhirnya Pertumbuhan Tunas

Pada akhirnya, tunas mencapai ukuran yang memadai, dan materi genetik yang diduplikasi sepenuhnya tertutup di dalamnya.

5. Pemisahan Sel Anak

Hubungan/Sambungan antara tunas dan sel induk menyempit hingga tunas akhirnya terputus, menghasilkan pelepasan sel anak yang identik secara genetik.

Sel anak, yang sekarang terpisah dari sel induk, mampu hidup secara independen dan dapat tumbuh dan membelah lebih lanjut dalam kondisi yang menguntungkan.

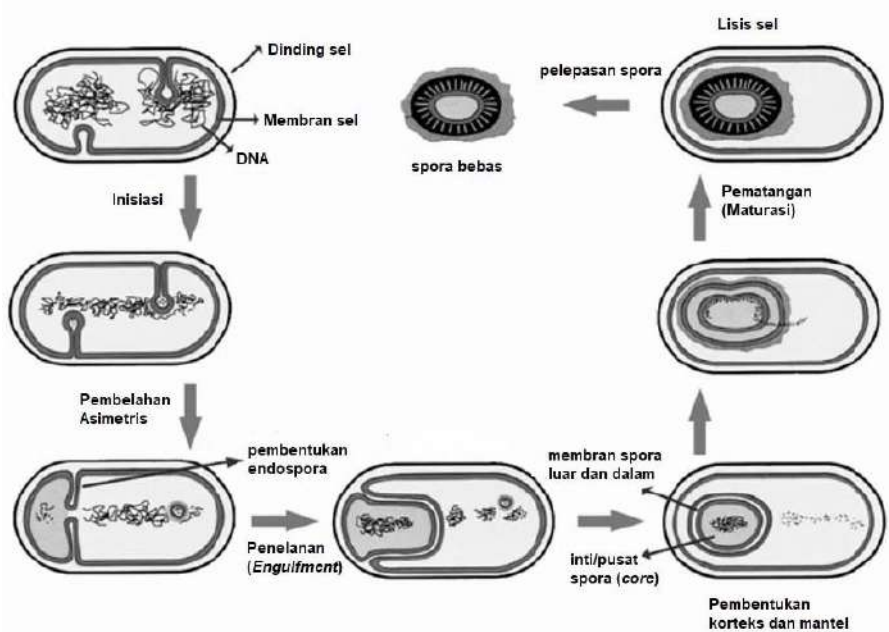
Pembentukan kuncup telah diamati pada beberapa anggota dari *Planctomycetes*, *Cyanobacteria*, *Firmicutes* (juga dikenal sebagai Bakteri Gram-Positif Rendah G+C), dan *Proteobacteria* (misalnya: *Hyphomonas*).

Pada *Proteobacteria Hyphomonas neptunium*, pembentukan tunas terjadi pada bagian ujung perpanjangan sel mirip tangkai (*stalk-like cell*), yang kemudian memisahkan kromosomnya. Apabila replikasi dan pemisahan kromosom pada kedua sel anak terjadi secara bersamaan pada kebanyakan bakteri, namun pada *H. neptunium*, kedua proses ini terjadi secara terpisah. Replikasi kromosom akan dilakukan terlebih dahulu, dan ketika kuncup telah mencapai ukuran ambang batas (*threshold*), barulah kemudian kromosom terreplikasi akan dipindahkan ke bagian kuncup tersebut sebelum terlepas dari sel induk.

9.2.3 Sporulasi

Sporulasi merupakan strategi reproduksi unik yang diamati pada beberapa bakteri, terutama dalam filum *Firmicutes*, termasuk genus *Bacillus* dan *Clostridium*. Sporulasi memungkinkan bakteri membentuk struktur dorman yang sangat tahan, yang disebut endospora, dalam kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Endospora ini sangat tahan terhadap panas, radiasi, kekeringan, dan berbagai bahan kimia, sehingga membuatnya tangguh dan mampu

bertahan pada lingkungan yang tidak kondusif. Proses sporulasi melibatkan beberapa tahapan, yakni:



Gambar 9.3. Sporulasi

(Sumber :Bhadala, 2023)

1. Inisiasi

Sporulasi biasanya diawali sebagai respons terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan, seperti keterbatasan nutrisi. Sel bakteri akan mengalami perubahan dalam ekspresi gen, yang memicu proses sporulasi.

2. Pembelahan Asimetris

Sel bakteri mengalami pembelahan sel secara asimetris, menghasilkan pembentukan prespora yang lebih kecil dan sel induk yang lebih besar. Prespora kelak akan menjadi endospora.

3. Penelanan (*Engulfment*)

Sel induk mengelilingi prespora dan kemudian memasukkannya/menelannya ke dalam selnya sendiri. Proses ini membentuk struktur membran ganda dalam sel induk.

4. Pembentukan Korteks dan Mantel (*Coat*)

Prespora akan mengembangkan lapisan tebal pelindung yang disebut korteks, yang terdiri dari peptidoglikan. Secara bersamaan, lapisan mantel protein dideposisikan di sekitar endospora yang berkembang tersebut.

5. Pematangan (Maturasi)

Endospora akan matang seiring dengan terjadinya proses penghilangan air (dehidrasi), dan beragam lapisan pelindung ditambahkan pada endospora tersebut. Fase pematangan ini berkontribusi pada ketahanan endospora terhadap stres lingkungan.

6. Lisis Sel Induk

Sel induk pada akhirnya mengalami penghancuran (lisis), melepaskan endospora matang ke lingkungan.

Proses sporulasi merupakan mekanisme kelangsungan hidup bagi bakteri yang lebih pada memungkinkannya bertahan dalam kondisi yang tidak menguntungkan. Begitu kondisi lingkungan menjadi lebih baik, maka endospora dapat bergerminasi atau 'berkecambah', menghasilkan sel bakteri vegetatif yang mampu bertumbuh dan bermetabolisme secara normal. Membran luar dan dalam endospora dilengkapi dengan reseptor protein germinasi-spesifik yang dapat mendeteksi sinyal eksternal. Selama proses ini, karakteristik fenotipik dari tahap germinasi spora dianggap sebagai tahap yang paling lemah, seperti yang teramati dalam siklus hidup spesies *Bacilli*. Selama tahap ini, spora menjadi rentan terhadap kondisi fisik dan kimia lingkungan, di mana membran spora dibuat permeabel agar dapat diakses oleh nutrisi dengan berat molekul rendah, ion, dan juga air, yang ditransportasikan melalui korteks inti.

Faktor-faktor fisik, seperti suhu dan pH, dapat membantu protein lapisan membran dalam (protein IM) untuk mengalami perubahan konformasi sehingga berada dalam struktur yang sesuai untuk merespon dengan faktor-faktor fisik tersebut. Kumpulan protein ini yang disebut germinosome, memfasilitasi akses nutrisi ke bagian membran dalam.

Contoh bakteri yang mengalami sporulasi meliputi *Bacillus subtilis* dan *Clostridium difficile*. Memahami proses sporulasi penting dalam berbagai bidang, termasuk mikrobiologi, bioteknologi, dan pengawetan makanan, karena endospora sulit dieliminasi melalui metode sterilisasi konvensional.

9.3 Reproduksi Seksual

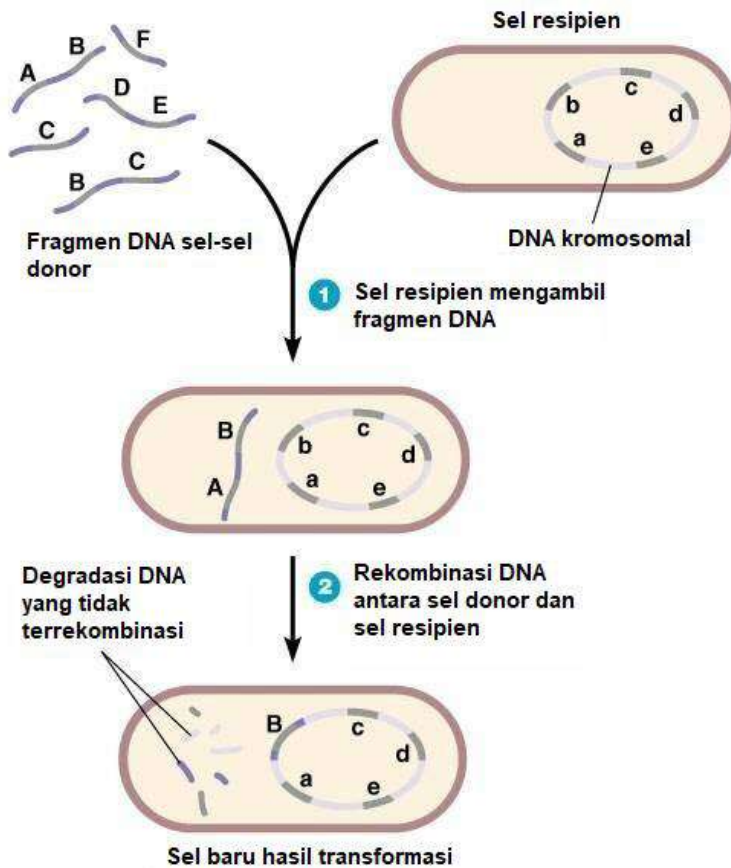
Reproduksi seksual pada bakteri melibatkan pertukaran bahan genetik antara dua sel bakteri, yang menghasilkan pembentukan kombinasi gen baru. Berbeda dengan metode reproduksi aseksual yang lebih umum (seperti *binary fission*), reproduksi seksual memberikan variabilitas atau keragaman genetik, yang dapat meningkatkan adaptabilitas dan kelangsungan hidup populasi bakteri.

Meskipun istilah "reproduksi seksual" digunakan, penting untuk dipahami bahwa proses ini tidak melibatkan fusi sel reproduktif (gamet) seperti yang terjadi pada organisme multiseluler. Reproduksi seksual pada bakteri lebih tepat dijelaskan sebagai suatu bentuk rekombinasi genetik.

Mekanisme-mekanisme pertukaran genetik ini berkontribusi pada evolusi bakteri dengan memfasilitasi penyebaran sifat-sifat yang menguntungkan, seperti resistensi terhadap antibiotik. Selain itu, juga memungkinkan bakteri beradaptasi lebih cepat terhadap perubahan lingkungan. Reproduksi Seksual pada bakteri dapat dilakukan melalui: Transformasi, Konjugasi dan Transduksi.

9.3.1 Transformasi

Transformasi pada bakteri adalah suatu proses di mana sel bakteri mengambil DNA asing dari lingkungan dan menggabungkannya ke dalam genomnya sendiri. Mekanisme transfer gen ini terjadi secara alami dan memungkinkan bakteri memperoleh gen baru, memungkinkannya beradaptasi dengan perubahan kondisi lingkungan atau memperoleh sifat fungsional yang baru. Gambaran umum dari proses transformasi pada bakteri adalah sebagai berikut:



Gambar 9.4. Transformasi
(Sumber :Carpa, 2010)

1. Pengambilan DNA

Bakteri mengambil fragmen DNA yang terdapat secara bebas di sekitarnya. DNA ini dapat dilepaskan melalui proses pemecahan/penghancuran (lisis) sel bakteri lain atau melalui sekresi DNA dari sel yang masih hidup.

2. Pengikatan ke Permukaan Sel

DNA asing diikat ke permukaan sel bakteri. Sel biasanya memiliki protein-protein khusus di permukaannya yang memfasilitasi pengikatan DNA tersebut.

3. Pemasukan ke Dalam Sel

DNA kemudian diangkut melintasi membran sel bakteri dan masuk ke dalam sitoplasma. Proses ini dapat melibatkan berbagai sistem transportasi dan protein.

4. Inkorporasi ke Dalam Genom

Begitu berada di dalam sel bakteri, DNA asing dapat mengalami rekombinasi dengan kromosom bakteri. Rekombinasi melibatkan pertukaran materi genetik antara DNA yang masuk dan genom bakteri resipien.

5. Ekspresi Gen Baru

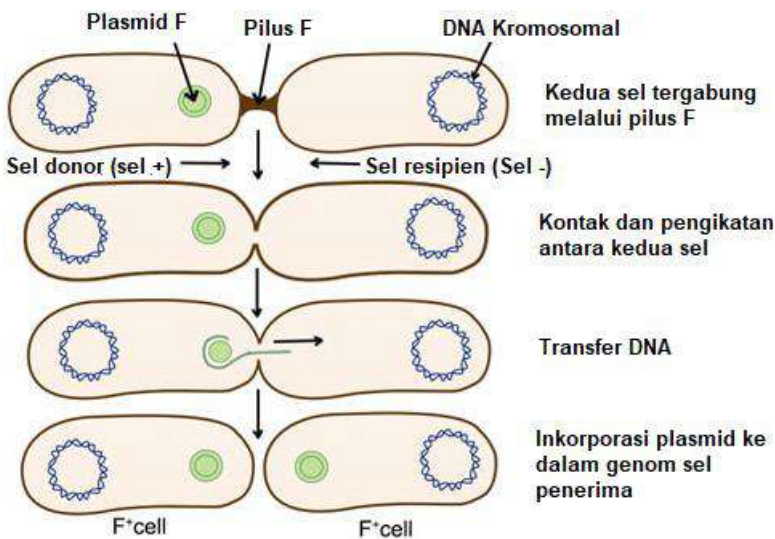
Jika DNA yang terinkorporasi membawa gen-gen fungsional, maka gen-gen ini akan dapat diekspresikan oleh sel bakteri. Proses ini dapat menghasilkan produksi protein ataupun perolehan sifat yang baru.

Proses transformasi juga dapat diinduksi secara sengaja atau buatan di laboratorium. Umumnya metode yang digunakan adalah melalui perlakuan pemberian CaCl_2 ataupun kejutan panas (*heat shock*). Pada transformasi buatan yang dilakukan terhadap sel *Escherichia coli*, terlihat bahwa perlakuan dengan CaCl_2 memiliki efisiensi transformasi sel yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan perlakuan menggunakan kejutan panas (*heat shock*). Hal ini diduga karena adanya interaksi antara ion Ca^{2+} dengan molekul DNA dan LPS (lipopolisakarida) dari membran luar yang kemudian meningkatkan permeabilitasnya sehingga dapat dilalui oleh fragmen-fragmen DNA sel donor.

Transformasi adalah mekanisme signifikan untuk transfer gen secara horizontal pada bakteri, yang memungkinkannya untuk berevolusi dan beradaptasi secara lebih cepat dan efektif. Proses ini memiliki implikasi penting dalam berbagai bidang, termasuk bioteknologi, rekayasa genetika, dan studi genetika bakteri. Di laboratorium, para peneliti dapat menginduksi transformasi buatan pada spesies bakteri tertentu, memasukkan fragmen DNA tertentu untuk berbagai tujuan, seperti produksi protein rekombinan atau studi fungsional gen.

9.3.2 Konjugasi

Konjugasi pada bakteri merupakan suatu proses transfer gen yang melibatkan pertukaran langsung materi genetik antara dua sel bakteri yang hidup dan aktif. Mekanisme ini memungkinkan transfer plasmid, yaitu molekul DNA kecil dan melingkar, dari bakteri donor ke bakteri penerima. Transfer ini difasilitasi oleh struktur bernama pilus (misalnya: pilus F), yang membentuk jembatan sementara antara kedua sel tersebut. Mekanisme ini terjadi menurut proses berikut:



Gambar 9.5. Konjugasi
(Sumber :Madigan et al., 2012)

1. Pembentukan Pilus

Bakteri donor, yang membawa plasmid yang mengandung gen-gen tertentu, membentuk pilus, yaitu suatu tonjolan tipis dan berambut di permukaannya. Pilus memainkan peran penting dalam membentuk kontak fisik dengan bakteri penerima.

2. Kontak dan Pengikatan (*Attachment*)

Pilus dari bakteri donor melakukan kontak dengan bakteri penerima, dan pengikatan terjadi. Koneksi fisik ini memungkinkan terjadinya transfer materi genetik.

3. Transfer DNA

DNA plasmid kemudian ditransfer melalui pilus dari bakteri donor ke bakteri penerima. Transfer ini dapat melibatkan mekanisme khusus untuk mengangkut plasmid melintasi membran sel.

4. Inkorporasi ke Dalam Genom Penerima

Begitu berada di dalam bakteri penerima, plasmid dapat diintegrasikan ke dalam genom penerima melalui rekombinasi. Atau, plasmid dapat berada secara bebas/independen sebagai elemen ekstrakromosomal yang mampu bereplikasi sendiri.

5. Pembentukan Sel Rekombinan Baru

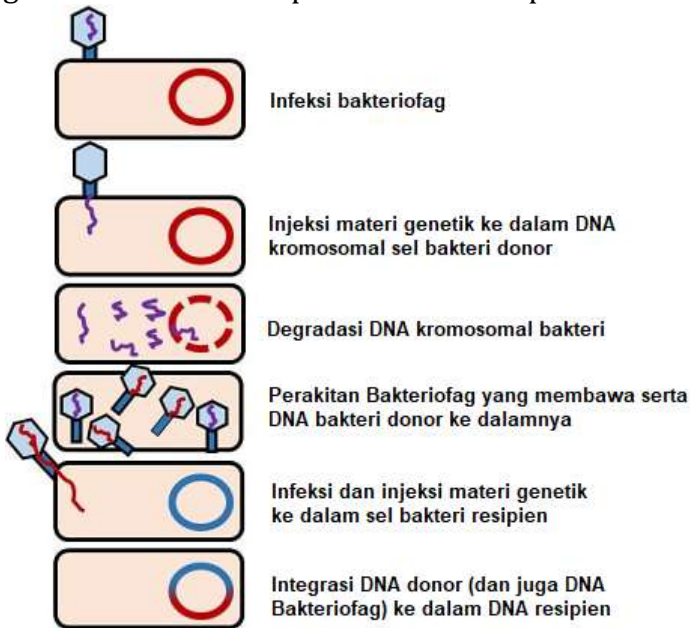
Bakteri penerima, yang sekarang mengandung materi genetik yang ditransfer, dapat mengekspresikan gen-gen yang ada pada plasmidnya tersebut. Hal ini menghasilkan pembentukan sel bakteri rekombinan baru dengan kombinasi materi genetik baik dari sel donor maupun sel penerima.

Secara molekuler, konjugasi diperantarai oleh aparatus protein pengait (*coupling protein*) yang terdiri atas 1-2 protein ATPase dengan serangkaian protein yang membentuk *transenvelope*, yang sensitif terhadap pembentukan pasangan kawin yang cocok atau kompeten. Sel donor membentuk kontak dengan sel penerima melalui pili, yang merupakan struktur berfilamen yang dirakit oleh protein sekresi tipe IV (T4SS) konjugatif pada bakteri Gram-negatif, atau melalui protein agregasi pada beberapa bakteri Gram-positif.

Konjugasi digunakan oleh bakteri untuk menyebarkan resistensi antimikroba (AMR) di lingkungan. Pusat dari proses ini adalah pilus F konjugatif yang tersebar luas yang membentuk hubungan antara sel donor dan sel penerima. Pada bakteri enteropatogen di dalam usus, proses konjugasi dapat terjadi dalam frekuensi yang sangat tinggi. Dengan demikian, konjugasi memainkan peran penting dalam evolusi dan adaptasi bakteri dengan memfasilitasi penyebaran cepat sifat-sifat yang menguntungkan ini bagi bakteri-bakteri bersangkutan.

9.3.3 Transduksi

Transduksi pada bakteri adalah suatu proses transfer gen yang dimediasi oleh bakteriofag, yang merupakan virus yang menginfeksi bakteri. Selama transduksi, DNA bakteri ditransfer dari satu bakteri ke bakteri lainnya dengan bantuan bakteriofag sebagai vektor. Mekanisme ini memungkinkan pertukaran materi genetik dan potensi transfer sifat-sifat tertentu antara bakteri. Berikut adalah gambaran umum dari proses transduksi pada bakteri:



Gambar 9.6. Transduksi
(Sumber : N, 2019)

1. Infeksi Bakteriofag
Bakteriofag menginfeksi sel bakteri dengan melekat pada permukaannya dan menyuntikkan materi genetiknya (baik berupa DNA atau RNA) ke dalam sel bakteri.
2. Replikasi DNA Bakteriofag
Materi genetik bakteriofag yang disuntikkan mengambil alih perangkat sintesis protein dan replikasi DNA sel bakteri untuk mereplikasikan dirinya sendiri. Proses replikasi ini

- seringkali menghasilkan pembentukan partikel bakteriofag baru.
3. Pengemasan DNA Bakteri
Selama perakitan partikel bakteriofag baru, fragmen DNA bakteri dari sel bakteri donor mungkin disalurkan secara keliru ke dalam kapsid virus bersama dengan DNA bakteriofag.
 4. Pelepasan Partikel Bakteriofag
Partikel bakteriofag yang baru terbentuk, yang sekarang mengandung DNA baik dari bakteriofag maupun bakteri, dilepaskan saat sel bakteri mengalami lisis (pemecahan).
 5. Infeksi Sel Bakteri Lain
Partikel bakteriofag yang dilepaskan dapat menginfeksi sel bakteri lain. Selama proses ini, bakteriofag menginjektikan materi genetiknya bersama dengan DNA bakteri ke dalam sel bakteri inang yang baru.
 6. Integrasi DNA Bakteri
DNA bakteri yang terdapat dalam bakteriofag mungkin terintegrasi ke dalam genom sel bakteri inang baru melalui rekombinasi.
 7. Ekspresi Gen Baru
DNA bakteri yang terintegrasi dapat diekspresikan oleh sel bakteri inang baru, untuk menghasilkan protein dan mengekspresikan sifat-sifat tertentu dari materi genetik yang ditransfer tersebut.

Transduksi sebenarnya masih dapat dibagi lagi ke dalam 3 jenis: Transduksi Umum, Transduksi Khusus dan Transduksi Laten. Pada Transduksi Umum, seperti yang terlihat pada *Salmonella* phage P22, semua bagian dari material genetik sel inang dapat diambil untuk dirakit menjadi bakteriofag baru, yang kemudian dapat diinfeksi ke bakteri lainnya. Sebaliknya, pada Transduksi Khusus, hanya gen-gen tertentu saja yang tampak memiliki kecenderungan untuk diambil selama proses perakitan ini, misalnya pada colifag λ . Transduksi Laten merupakan jenis yang paling baru diidentifikasi pada virus-virus temperata yang menginfeksi *Staphylococcus aureus*. Pada mekanisme ini, bakteriofag

yang baru terbentuk tidak langsung melisis bakteri inang namun terintegrasi ke dalam genom inangnya tersebut. Bakteriofag pada akhirnya akan melakukan lisis pada saat sel inangnya telah berada pada fase akhir siklus hidupnya. Melalui cara ini, bakteriofag dapat 'menampung' DNA bakteri dengan jumlah yang lebih banyak dan mampu menginfeksikannya ke dalam bakteri lain dengan frekuensi yang 100x kali lipat lebih tinggi bila dibandingkan dengan kedua jenis transduksi sebelumnya.

Transduksi memungkinkan transfer materi genetik antara bakteri, yang pada akhirnya berkontribusi pada keragaman genetik, dan memfasilitasi penyebaran sifat-sifat menguntungkan, termasuk gen resistensi antibiotik. Proses ini berbeda dari bentuk transfer gen lainnya, seperti konjugasi dan transformasi, karena melibatkan vektor viral (bakteriofag) dalam aktivitas transfer materi genetik.

DAFTAR PUSTAKA

- Angert, E. R. (2005). Alternatives to binary fission in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 3(3), Article 3. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1096>
- Batool, S. (2022, August 6). *Budding—An Overview | Budding in Hydra, Yeast, and Bacteria*. <https://eduinput.com/what-is-budding/>
- Bhadala, D. (2023). *Sporulation: Sporulation in Bacteria, In Amoeba, In Yeast*. Collegedunia. <https://collegedunia.com/exams/sporulation-sporulation-in-bacteria-amoeba-and-in-yeast-articleid-226>
- Binary Fission and other Forms of Reproduction in Bacteria* / CALS. (n.d.). Retrieved January 14, 2024, from <https://cals.cornell.edu/microbiology/research/active-research-labs/angert-lab/epulopiscium/binary-fission-and-other-forms-reproduction-bacteria>
- BYJU. (2024). *Bacterial Genetics—Conjugation, Transduction, Transformation*. BYJUS. <https://byjus.com/biology/bacterial-genetics/>
- Carpa, R. (2010). Genetic recombination in bacteria: Horizon of the beginnings of sexuality in living organisms. *Extreme Life, Biospeology & Astrobiology*, 2.
- Casiraghi, A., Suigo, L., Valoti, E., & Straniero, V. (2020). Targeting Bacterial Cell Division: A Binding Site-Centered Approach to the Most Promising Inhibitors of the Essential Protein FtsZ. *Antibiotics*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9020069>
- Chiang, Y. N., Penadés, J. R., & Chen, J. (2019). Genetic transduction by phages and chromosomal islands: The new and noncanonical. *PLoS Pathogens*, 15(8), e1007878. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1007878>
- Jung, A., Raßbach, A., Pulpetta, R. L., van Teeseling, M. C. F., Heinrich, K., Sobetzko, P., Serrania, J., Becker, A., & Thanbichler, M. (2019). Two-step chromosome segregation in the stalked budding bacterium *Hyphomonas neptunium*. *Nature Communications*, 10(1),

- Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11242-5>
- Koopman, N., Remijas, L., Seppen, J., Setlow, P., & Brul, S. (2022a). Mechanisms and Applications of Bacterial Sporulation and Germination in the Intestine. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6), 3405. <https://doi.org/10.3390/ijms23063405>
- Koopman, N., Remijas, L., Seppen, J., Setlow, P., & Brul, S. (2022b). Mechanisms and Applications of Bacterial Sporulation and Germination in the Intestine. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6), 3405. <https://doi.org/10.3390/ijms23063405>
- M, G., & G, G. (2023). Sporulation, Structure Assembly, and Germination in the Soil Bacterium *Bacillus thuringiensis*: Survival and Success in the Environment and the Insect Host. *Microbiology Research*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/microbiolres14020035>
- Madigan, M. T., Martinko, J., Brock, T., Dunlap, P., & Clark, D. P. (2012). *Brock Biology of Microorganisms* (13th ed.). Pearson.
- N, S. (2019, February 1). What is Transduction? Definition and Types. *Biology Reader*. <https://biologyreader.com/transduction.html>
- Neil, K., Allard, N., & Rodrigue, S. (2021). Molecular Mechanisms Influencing Bacterial Conjugation in the Intestinal Microbiota. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.673260>
- Patkowski, J. B., Dahlberg, T., Amin, H., Gahlot, D. K., Vijayrajratnam, S., Vogel, J. P., Francis, M. S., Baker, J. L., Andersson, M., & Costa, T. R. D. (2023). The F-pilus biomechanical adaptability accelerates conjugative dissemination of antimicrobial resistance and biofilm formation. *Nature Communications*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37600-y>
- Pląskowska, K., Makowski, Ł., Strzałka, A., & Zakrzewska-Czerwińska, J. (n.d.). Binary or Nonbinary Fission? Reproductive Mode of a Predatory Bacterium Depends

- on Prey Size. *mBio*, 14(3), e00772-23.
<https://doi.org/10.1128/mbio.00772-23>
- Qiu, Y., Zhou, Y., Chang, Y., Liang, X., Zhang, H., Lin, X., Qing, K., Zhou, X., & Luo, Z. (2022). The Effects of Ventilation, Humidity, and Temperature on Bacterial Growth and Bacterial Genera Distribution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15345. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215345>
- Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2011). *Campbell Biology* (9th ed.). Pearson Education, Inc.

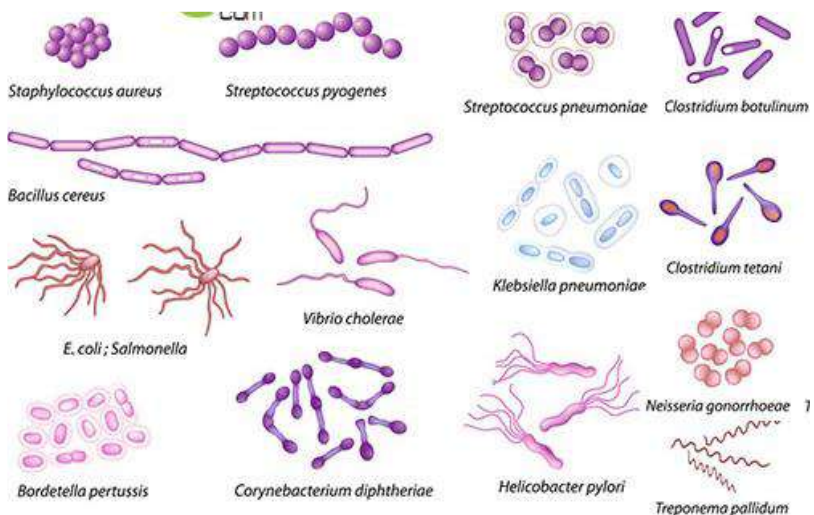
BAB 10

JENIS-JENIS BAKTERI

Oleh Lismayana Hansur

10.1 Pendahuluan

Bakteri adalah organisme hidup bersel satu yang renik dan tidak bisa diamati dengan mata telanjang, harus menggunakan mikroskop. Ada jutaan jenis bakteri yang berbeda yang dapat ditemukan di seluruh dunia, termasuk di dalam tubuh manusia, diantaranya ditemukan di kulit, mulut, sistem pencernaan, sistem reproduksi, dan saluran kemih. Diperkirakan pada tubuh manusia memiliki 10 kali lebih banyak sel bakteri daripada sel manusia di dalam tubuh. Terdapat bakteri yang bersifat patogen yang dapat merugikan dan menyebabkan penyakit, namun biasa diatasi dengan antibiotik. (Fischbach and Walsh, 2009)



Gambar 10.1. Jenis-jenis bakteri (Sumber:biomagz.com)

Terdapat bakteri yang bersifat komensal dan dapat bermanfaat bagi tubuh. Sebagian besar jenis bakteri tidak

berbahaya. Beberapa bahkan bermanfaat, terutama bakteri yang terdapat di kulit atau di dalam usus atau sistem pencernaan. Bakteri tersebut disebut flora residu, atau mikrobiom, yang merupakan kelompok mikroba yang hidup di dalam dan di permukaan tubuh. Bakteri usus menjaga inangnya sehat dengan menyerap nutrisi, mencerna makanan, dan mencegah pertumbuhan bakteri berbahaya.

Bakteri dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria. termasuk bentuk, kebutuhan oksigen, karakteristik pewarnaan Gram, serta kemampuan metabolisme. Berikut ini beberapa jenis bakteri berdasarkan kriteria tersebut:

10.1.1 Berdasarkan bentuknya:

1. Kokus: Bakteri berbentuk bulat atau bulat telur. Contoh dari jenis ini adalah *Staphylococcus aureus* dan *Streptococcus pneumoniae*.
2. Basil: Bakteri berbentuk batang atau silinder. Contoh dari jenis ini adalah *Escherichia coli* (E. coli) dan *Bacillus subtilis*.
3. Spiral: Bakteri berbentuk spiral atau spiral. Contoh dari jenis ini adalah *Treponema pallidum*, yang menyebabkan sifilis, dan *Helicobacter pylori*, yang terkait dengan penyakit ulkus peptikum.
4. Vibrio: Bakteri berbentuk seperti koma atau bulan sabit. Contoh dari jenis ini adalah *Vibrio cholerae*, penyebab kolera.
5. Spirilla: Bakteri berbentuk spiral dengan pergerakan berputar. Contoh dari jenis ini adalah *Spirillum minus*, yang menyebabkan penyakit leptospirosis.
6. Filamen: Bakteri berbentuk filamentous, seperti benang atau cabang-cabang. Contohnya adalah *Actinomyces israelii*.

Beberapa bakteri dapat memiliki bentuk campuran atau berubah bentuk tergantung pada kondisi lingkungan.

10.1.2 Berdasarkan kebutuhan oksigen

Bakteri dapat dibagi menjadi beberapa kelompok utama:

1. Aerob: Bakteri aerob memerlukan oksigen untuk melakukan respirasi atau menghasilkan energi. Bakteri aerob hanya dapat

- tumbuh dalam lingkungan yang kaya akan oksigen. Contoh bakteri aerob adalah *Mycobacterium tuberculosis*, yang menyebabkan tuberkulosis, dan *Bacillus anthracis*, penyebab penyakit antraks.
2. Anaerob: Bakteri anaerob tidak memerlukan oksigen untuk respirasi dan dapat tumbuh di lingkungan yang tidak memiliki oksigen atau memiliki sedikit oksigen. Ada dua jenis utama bakteri anaerob:
 - a. Anaerob obligat: Bakteri ini tidak dapat bertahan hidup dalam keberadaan oksigen dan dapat mati jika terpapar padanya. Contoh bakteri anaerob obligat adalah *Clostridium botulinum*, penyebab botulisme, dan *Bacteroides fragilis*, yang dapat menyebabkan infeksi dalam perut.
 - b. Anaerob fakultatif: Bakteri ini dapat melakukan respirasi anaerobik ketika oksigen tidak tersedia, tetapi juga dapat melakukan respirasi aerob jika oksigen hadir. Contoh bakteri anaerob fakultatif adalah *Escherichia coli* (E. coli) dan *Lactobacillus acidophilus*.
 3. Mikroaerofilik: Bakteri ini memerlukan oksigen dalam jumlah yang sangat rendah untuk tumbuh. Bakteri ini tidak dapat bertahan dalam konsentrasi oksigen yang tinggi. Contoh dari bakteri mikroaerofilik adalah *Helicobacter pylori*, yang terkait dengan penyakit ulkus peptikum.

Kemampuan bakteri untuk tumbuh dalam berbagai kondisi oksigen dapat berdampak pada diagnosis penyakit dan strategi pengobatan.

10.1.3 Berdasarkan karakteristik pewarnaan Gram

Bakteri dapat dibagi menjadi dua kelompok utama:

1. Bakteri Gram-positif: Bakteri Gram-positif memiliki dinding sel yang relatif tebal dan kaya akan peptidoglikan. Ketika disubur dengan pewarnaan Gram, bakteri ini akan menahan warna ungu atau biru dari pewarnaan kristal violet, dan akan tetap berwarna tersebut setelah diberi larutan lugol dan dicuci dengan alkohol. Contoh dari bakteri Gram-positif termasuk

Staphylococcus aureus, *Streptococcus pyogenes*, dan *Bacillus anthracis*.

2. Bakteri Gram-negatif: Bakteri Gram-negatif memiliki dinding sel yang lebih tipis dan memiliki lapisan luar yang terdiri dari lipopolisakarida. Saat disubur dengan pewarnaan Gram, bakteri ini akan kehilangan warna ungu atau biru saat dicuci dengan alkohol, dan kemudian menyerap pewarnaan merah muda dari zat pewarna safranin. Contoh dari bakteri Gram-negatif termasuk *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., dan *Pseudomonas aeruginosa*.

Pewarnaan Gram sering digunakan dalam laboratorium mikrobiologi untuk membantu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan bakteri berdasarkan sifat-sifat dinding selnya. Ini juga dapat memberikan petunjuk awal dalam memilih pengobatan antibiotik yang sesuai, karena bakteri Gram-positif dan Gram-negatif cenderung merespons antibiotik dengan cara yang berbeda.

10.1.4 Kemampuan metabolisme

Berikut adalah beberapa klasifikasi umum:

1. Bakteri Aerob: Bakteri ini memerlukan oksigen untuk melakukan respirasi dan menghasilkan energi. Bakteri jenis ini hanya dapat tumbuh dalam lingkungan yang kaya akan oksigen.
2. Bakteri Anaerob: Bakteri ini tidak memerlukan oksigen untuk respirasi dan dapat tumbuh di lingkungan yang tidak memiliki oksigen atau memiliki sedikit oksigen. Ada dua jenis utama bakteri anaerob:
 - a. Anaerob Obligat: Bakteri ini tidak dapat bertahan hidup dalam keberadaan oksigen dan dapat mati jika terpapar padanya.
 - b. Anaerob Fakultatif: Bakteri ini dapat melakukan respirasi anaerobik ketika oksigen tidak tersedia, tetapi juga dapat melakukan respirasi aerob jika oksigen hadir.
3. Bakteri Mikroaerofilik: Bakteri ini memerlukan oksigen dalam jumlah yang sangat rendah untuk tumbuh. Bakteri jenis ini tidak dapat bertahan dalam konsentrasi oksigen yang tinggi.

4. Bakteri Fototrofik: Bakteri ini menggunakan energi dari cahaya matahari untuk membuat makanan sendiri melalui fotosintesis. Contoh bakteri ini adalah bakteri hijau sulfur dan bakteri ungu non-sulfur.
5. Bakteri Kemoautotrofik: Bakteri ini mendapatkan energi dari reaksi kimia dan menggunakan karbon dioksida sebagai sumber karbon untuk sintesis sel. Contohnya adalah bakteri nitrifikasi yang mengoksidasi amonia menjadi nitrit atau nitrat.
6. Bakteri Heterotrofik: Bakteri ini mendapatkan energi dan karbon dari senyawa organik yang sudah ada. Bakteri tersebut dapat menguraikan senyawa organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana.

Klasifikasi ini membantu dalam pemahaman tentang bagaimana bakteri memperoleh energi dan sumber daya yang dibutuhkan untuk bertahan hidup.

10.2 Bakteri Patogen

Bakteri patogen adalah organisme mikroskopis yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia, hewan, atau tumbuhan. Jenis bakteri ini memiliki kemampuan untuk menginfeksi, berkembang biak, dan menghasilkan toksin yang dapat merusak jaringan tubuh inangnya.

10.2.1 Bakteri Penyebab Infeksi Saluran Pernapasan

Infeksi saluran pernapasan (ISPA) dapat disebabkan oleh berbagai jenis bakteri. Di bawah ini, akan menjelaskan beberapa bakteri penyebab ISPA yang paling umum (Wang *et al.*, 2014):

1. *Streptococcus pneumoniae*: Bakteri ini adalah penyebab umum dari infeksi saluran pernapasan atas (ISPA) seperti sinusitis, radang tenggorokan (faringitis), dan infeksi telinga (otitis media). *Streptococcus pneumoniae* juga merupakan penyebab utama pneumonia, yang merupakan infeksi saluran pernapasan bawah. Bakteri ini dapat menyerang orang dari segala usia, tetapi anak-anak, orang tua, dan individu dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah berisiko lebih tinggi.

2. *Haemophilus influenzae*: Meskipun namanya menyerupai virus flu, *Haemophilus influenzae* sebenarnya adalah bakteri yang menyebabkan berbagai jenis infeksi saluran pernapasan, termasuk bronkitis, pneumonia, dan otitis media. Ada dua jenis utama *Haemophilus influenzae*, yaitu tipe b yang lebih sering menyebabkan penyakit dan tipe a, b, c, d, dan lainnya yang dapat menyebabkan infeksi serius terutama pada anak-anak.
3. *Mycoplasma pneumoniae*: Bakteri ini adalah penyebab umum pneumonia atipikal atau pneumonia lobaris yang tidak disebabkan oleh bakteri atau virus lainnya. *Mycoplasma pneumoniae* dapat menyebabkan gejala ringan hingga parah dan sering kali menyerang orang-orang muda dan sehat.
4. *Chlamydia pneumoniae*: Bakteri ini juga merupakan penyebab pneumonia atipikal yang sering dijumpai. Infeksi *Chlamydia pneumoniae* dapat menyebabkan gejala seperti pilek, batuk, dan demam, yang sering kali ringan tetapi dapat berkembang menjadi kondisi yang lebih serius terutama pada orang tua dan individu dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah.
5. *Legionella pneumophila*: Bakteri ini menyebabkan penyakit yang dikenal sebagai Legionnaires' disease, yaitu bentuk pneumonia yang serius dan bahkan dapat mengancam jiwa. Bakteri ini umumnya ditemukan di lingkungan air yang terkontaminasi seperti kolam renang, jacuzzi, dan sistem pendingin udara. Orang yang terpapar bakteri ini biasanya mengalami demam, batuk, sesak napas, dan gejala lainnya yang mirip dengan pneumonia.
6. *Staphylococcus aureus*: Bakteri ini biasanya ditemukan pada kulit dan selaput lendir dan dapat menyebabkan berbagai infeksi, termasuk infeksi saluran pernapasan. *Staphylococcus aureus* dapat menyebabkan radang paru-paru (pneumonia) atau abses paru-paru pada individu dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah.
7. *Klebsiella pneumoniae*: Bakteri ini merupakan penyebab pneumonia bakterial yang sering terjadi pada orang-orang dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah, terutama pasien yang telah dirawat di rumah sakit atau mengalami kondisi medis yang serius.

Beberapa kasus ISPA disebabkan oleh bakteri. Namun Infeksi saluran pernapasan juga bisa disebabkan oleh virus, seperti virus influenza, virus parainfluenza, rhinovirus, dan banyak lainnya. Diagnostik yang tepat diperlukan untuk memastikan penyebab infeksi dan memilih pengobatan yang sesuai. Untuk menegakkan diagnosis, petugas kesehatan perlu melakukan tes laboratorium seperti tes dahak atau kultur bakteri untuk membantu menentukan jenis bakteri penyebab infeksi(Daito *et al.*, 2011).

10.2.2 Bakteri Penyebab Infeksi Saluran Pencernaan

Infeksi saluran pencernaan dapat disebabkan oleh berbagai jenis bakteri. Di bawah ini, akan menjelaskan beberapa bakteri penyebab infeksi saluran pencernaan yang paling umum(Mirsepasi-Lauridsen *et al.*, 2019):

1. *Salmonella*: Bakteri ini menyebabkan infeksi salmonellosis, yang biasanya disebabkan oleh konsumsi makanan atau air yang terkontaminasi dengan kotoran hewan yang terinfeksi. Gejalanya dapat beragam, mulai dari diare, mual, muntah, demam, sakit perut, hingga dehidrasi. *Salmonella* dapat ditemukan pada berbagai jenis makanan, seperti telur yang tidak dimasak dengan baik, daging mentah, unggas, produk susu yang tidak dipasteurisasi, dan sayuran yang terkontaminasi.
2. *Escherichia coli* (*E. coli*): Ada beberapa jenis *E. coli*, termasuk strain patogenik seperti *E. coli* O157:H7 yang terkenal. Infeksi *E. coli* dapat menyebabkan gejala seperti diare berdarah, mual, muntah, sakit perut, dan demam. *E. coli* biasanya ditularkan melalui konsumsi makanan yang terkontaminasi, terutama daging sapi yang tidak dimasak dengan baik, produk susu mentah, dan sayuran yang terkontaminasi.
3. *Campylobacter jejuni*: Bakteri ini adalah penyebab umum dari infeksi saluran pencernaan yang disebut campylobacteriosis. Gejala yang umumnya muncul termasuk diare, sakit perut, demam, dan mual. Infeksi biasanya disebabkan oleh konsumsi makanan atau air yang terkontaminasi, terutama daging unggas yang tidak dimasak dengan baik, susu mentah, dan air yang terkontaminasi kotoran hewan.

4. *Clostridium difficile* (*C. difficile*): Bakteri ini dapat menyebabkan infeksi yang disebut *C. difficile*-associated diarrhea (CDAD), yang sering terjadi setelah penggunaan antibiotik yang mengganggu keseimbangan normal bakteri dalam usus. Gejalanya termasuk diare berair atau berdarah, sakit perut, demam, dan dehidrasi. *C. difficile* dapat menyebar melalui kontak dengan permukaan yang terkontaminasi atau melalui oral-fecal route.
5. *Shigella*: Bakteri ini menyebabkan penyakit yang disebut shigellosis atau disentri basiler. Gejala meliputi diare berdarah, demam, mual, muntah, dan kram perut. Penularannya terjadi melalui kontak langsung dengan orang yang terinfeksi atau dengan mengonsumsi makanan atau air yang terkontaminasi.
6. *Vibrio cholerae*: Bakteri ini menyebabkan kolera, yang merupakan penyakit serius yang ditandai dengan diare berair yang berlebihan, muntah, dan dehidrasi parah. Kolera sering kali terjadi dalam wabah dan dapat menyebar melalui konsumsi makanan atau air yang terkontaminasi dengan kotoran orang yang terinfeksi.
7. *Yersinia enterocolitica* dan *Yersinia pseudotuberculosis*: Kedua bakteri ini dapat menyebabkan penyakit yang disebut yersiniosis, yang menyebabkan gejala seperti diare, sakit perut, demam, dan kram perut. Makanan yang terkontaminasi, terutama daging mentah atau tidak dimasak dengan baik, adalah sumber umum infeksi *Yersinia*.

Pencegahan infeksi saluran pencernaan melibatkan praktek kebersihan yang baik, termasuk mencuci tangan dengan sabun dan air mengalir sebelum menyiapkan makanan dan makan, memasak makanan hingga matang, menyimpan makanan dengan benar, dan menghindari konsumsi air atau makanan yang terkontaminasi. Pasien yang mengalami gejala infeksi saluran pencernaan, penting untuk melakukan perawatan medis dan menghindari menyebarkan infeksi kepada orang lain.

10.2.3 Bakteri Penyebab Infeksi Saluran Kemih

Infeksi saluran kemih (ISK) adalah kondisi yang disebabkan oleh pertumbuhan bakteri di saluran kemih, yang meliputi uretra (saluran yang mengeluarkan urin dari kandung kemih), kandung kemih, ureter, dan kadang-kadang bahkan ginjal. Infeksi saluran kemih dapat disebabkan oleh berbagai jenis bakteri, tetapi yang paling umum adalah bakteri dari usus manusia, yang paling sering *Escherichia coli* (*E. coli*). Berikut adalah beberapa bakteri lain yang juga dapat menyebabkan infeksi saluran kemih:

1. *Escherichia coli* (*E. coli*): Bakteri ini adalah penyebab paling umum dari infeksi saluran kemih, menyebabkan sekitar 80-90% dari semua kasus. *E. coli* umumnya berasal dari usus manusia dan dapat masuk ke saluran kemih melalui uretra. Faktor-faktor risiko untuk infeksi *E. coli* termasuk hubungan seksual yang sering, penggunaan spermisida, dan kondisi medis yang mengganggu aliran urin.
2. *Staphylococcus saprophyticus*: Bakteri ini merupakan penyebab infeksi saluran kemih yang umum pada wanita muda, terutama setelah aktivitas seksual. *S. saprophyticus* biasanya berasal dari lingkungan sekitar kita dan dapat masuk ke saluran kemih melalui uretra.
3. *Klebsiella pneumoniae*: Bakteri ini dapat menyebabkan infeksi saluran kemih, terutama pada individu yang telah mengalami tindakan medis invasif seperti kateterisasi atau operasi. *Klebsiella pneumoniae* juga sering ditemukan pada orang yang mengalami penyakit saluran kemih yang mendasari atau pada pasien dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah.
4. *Proteus mirabilis*: Bakteri ini adalah penyebab umum infeksi saluran kemih, terutama pada individu dengan kondisi medis tertentu seperti pembesaran prostat atau kelainan saluran kemih. *P. mirabilis* juga sering dikaitkan dengan pembentukan batu ginjal.
5. *Enterococcus faecalis*: Bakteri ini adalah komponen normal dari flora usus manusia, tetapi juga dapat menyebabkan infeksi saluran kemih, terutama pada orang-orang dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah atau yang telah menjalani prosedur medis invasif.

Faktor-faktor risiko untuk infeksi saluran kemih meliputi jenis kelamin (wanita memiliki risiko lebih tinggi), aktivitas seksual yang sering, kehamilan, penggunaan kateter urin, adanya gangguan yang menghambat aliran urin, penggunaan spermisida atau kontrasepsi tertentu, serta kondisi medis yang memengaruhi sistem kekebalan tubuh.

Gejala infeksi saluran kemih dapat bervariasi tergantung pada bagian saluran kemih yang terinfeksi dan tingkat keparahannya. Gejala umum termasuk sering buang air kecil, sensasi terbakar saat buang air kecil, urin berbau tidak sedap, urin keruh atau berwarna gelap, rasa tidak nyaman di perut bagian bawah, dan demam. Diagnosis infeksi saluran kemih biasanya didasarkan pada gejala klinis dan hasil tes laboratorium seperti urinalisis dan kultur urine.

Pengobatan infeksi saluran kemih melibatkan penggunaan antibiotik yang tepat sesuai dengan jenis bakteri yang menyebabkan infeksi dan sensitivitasnya terhadap antibiotik tertentu. Penting untuk menyelesaikan seluruh antibiotik yang diresepkan oleh dokter meskipun gejalanya telah hilang untuk mencegah kekambuhan infeksi dan perkembangan resistensi antibiotik. Selain itu, mengonsumsi banyak cairan, menjaga kebersihan diri, dan menghindari faktor risiko yang dapat memperburuk infeksi dapat membantu mempercepat pemulihan dan mencegah kekambuhan.

10.2.4 Bakteri Penyebab Infeksi Kulit

Infeksi kulit dapat disebabkan oleh berbagai jenis bakteri, baik yang bersifat normal di kulit manusia maupun yang masuk dari luar tubuh. Berikut adalah beberapa bakteri penyebab infeksi kulit yang paling umum:

1. *Staphylococcus aureus*: Bakteri ini merupakan penyebab paling umum dari infeksi kulit. *Staphylococcus aureus* dapat menyebabkan berbagai kondisi, mulai dari jerawat, bisul, impetigo, selulitis (infeksi kulit dangkal), abses kulit, hingga infeksi jaringan lunak yang lebih serius seperti fasciitis nekrotik.
2. *Streptococcus pyogenes* (Group A Streptococcus): Bakteri ini adalah penyebab umum infeksi kulit, terutama streptokokus beta hemolitik grup A. Infeksi yang disebabkan oleh

- Streptococcus pyogenes* termasuk selulitis, impetigo, erisipelas (infeksi kulit dangkal), dan infeksi jaringan lunak yang lebih serius seperti fasciitis nekrotik dan sindrom syok toksik.
3. *Pseudomonas aeruginosa*: Bakteri ini adalah penyebab infeksi kulit yang sering terjadi pada luka bakar, luka terbuka, atau pada orang dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah. *Pseudomonas aeruginosa* dapat menyebabkan infeksi yang sulit diobati dan sering kali berkembang menjadi infeksi yang lebih serius.
 4. *Clostridium perfringens*: Bakteri ini menyebabkan gangren gas, sebuah infeksi jaringan lunak yang serius yang terjadi ketika bakteri *Clostridium perfringens* memproduksi gas di dalam jaringan yang terinfeksi. Gangren gas dapat berkembang dengan cepat dan dapat mengancam jiwa jika tidak segera diobati.
 5. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA): MRSA adalah strain *Staphylococcus aureus* yang tahan terhadap sebagian besar antibiotik beta-laktam, termasuk penisilin dan sefalosporin. Infeksi MRSA dapat berkembang pada kulit dan jaringan lunak, menyebabkan abses, selulitis, bisul, dan infeksi kulit yang lebih serius.
 6. Enterobacteriaceae: Keluarga bakteri ini, yang mencakup *Escherichia coli*, *Klebsiella* spp., dan *Enterobacter* spp., dapat menyebabkan infeksi kulit dan jaringan lunak pada orang dengan sistem kekebalan tubuh yang lemah atau dengan kondisi medis tertentu.

Gejala infeksi kulit dan jaringan lunak bisa bervariasi tergantung pada jenis bakteri penyebabnya dan tingkat keparahannya. Gejala umum meliputi kemerahan, pembengkakan, nyeri, hangat saat disentuh, dan pengeluaran nanah dari area yang terinfeksi. Diagnosis biasanya didasarkan pada pemeriksaan fisik dan kadang-kadang tes laboratorium seperti kultur bakteri dari sampel jaringan atau cairan.

Pengobatan infeksi kulit dan jaringan lunak biasanya melibatkan pemberian antibiotik yang sesuai dengan jenis bakteri yang menyebabkan infeksi. Untuk infeksi yang lebih serius, seperti

fasciitis nekrotik atau gangren gas, perawatan medis darurat mungkin diperlukan, termasuk pembedahan untuk mengangkat jaringan yang terinfeksi dan pemberian antibiotik intravena. Pencegahan infeksi kulit dan jaringan lunak melibatkan menjaga kebersihan diri, merawat luka dengan benar, menghindari kontak dengan bakteri patogen, dan menghindari faktor risiko yang dapat meningkatkan infeksi.

10.3 Bakteri Menguntungkan

10.3.1 Bakteri Pembuat Kompos

Bakteri pembuat kompos, atau bakteri pengurai, adalah jenis bakteri yang memainkan peran penting dalam proses pengomposan atau komposisi limbah organik menjadi bahan kompos yang berguna. Proses ini merupakan bagian dari daur ulang organik yang penting untuk menjaga keseimbangan lingkungan dan mengurangi volume limbah.

Berikut adalah beberapa jenis bakteri pembuat kompos yang umum terlibat dalam proses pengomposan:

1. **Bakteri aerobik:** Bakteri ini memerlukan oksigen untuk hidup dan berkembang biak. Bakteri ini membantu memulai proses pengomposan dengan mendekomposisi bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Contoh bakteri aerobik yang umum adalah bakteri dari genus *Bacillus* dan *Pseudomonas*.
2. **Bakteri anaerobik:** Berbeda dengan bakteri aerobik, bakteri anaerobik dapat hidup dan berkembang biak tanpa oksigen. Bakteri tersebut berperan dalam tahap-tahap lanjut pengomposan, terutama dalam mendekomposisi bahan organik yang sulit terurai. Beberapa contoh bakteri anaerobik yang terlibat dalam pengomposan adalah bakteri dari genus *Clostridium* dan *Methanobacterium*.

Selain bakteri, actinomycetes, dan fungi, banyak mikroorganisme lain yang juga berperan dalam proses pengomposan, termasuk protozoa, nematoda, dan mikroorganisme lainnya. Kehadiran dan aktivitas mikroorganisme ini penting untuk menjaga kelancaran dan efisiensi proses pengomposan.

Komposisi bakteri pembuat kompos dalam suatu tumpukan kompos dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis bahan organik yang dikomposkan, kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban, serta metode pengomposan yang digunakan. Untuk mempercepat dan memperbaiki proses pengomposan, beberapa teknik seperti pemberian bahan pencetus kompos, pengaturan kondisi lingkungan, dan pemilihan bahan baku yang tepat dapat digunakan.

10.3.2 Bakteri Sebagai Agen Fermentasi Makanan dan Minuman

Bakteri sebagai agen fermentasi makanan dan minuman adalah mikroorganisme yang berperan penting dalam proses fermentasi makanan dan minuman. Proses fermentasi melibatkan konversi bahan makanan atau minuman menjadi produk yang lebih bergizi, lebih mudah dicerna, dan memiliki rasa yang lebih baik.(Dimidi *et al.*, 2019) Berikut adalah beberapa contoh bakteri pembuat makanan dan minuman yang umum:

1. *Lactobacillus*: Genus *Lactobacillus* terdiri dari sejumlah spesies bakteri asam laktat yang banyak digunakan dalam proses fermentasi makanan. *Lactobacillus* berkontribusi pada pembuatan yogurt, kefir, dan berbagai produk susu fermentasi lainnya. Selain itu, *Lactobacillus* juga digunakan dalam fermentasi sayuran, seperti dalam pembuatan kimchi dan sauerkraut.
2. *Streptococcus thermophilus*: Bakteri ini sering kali digunakan bersama dengan *Lactobacillus* dalam pembuatan produk susu fermentasi seperti yogurt. *Streptococcus thermophilus* membantu dalam proses fermentasi dan menghasilkan asam laktat yang membantu mematikan bakteri patogen dan memberikan rasa asam pada produk akhir.
3. *Bifidobacterium*: Genus *Bifidobacterium* merupakan bakteri asam laktat lainnya yang digunakan dalam produksi yogurt dan produk susu fermentasi lainnya. *Bifidobacterium* juga dianggap memiliki manfaat kesehatan karena kemampuannya untuk bertahan hidup di saluran pencernaan dan memberikan efek positif pada flora usus.

4. *Acetobacter*: Bakteri ini berperan penting dalam pembuatan cuka, seperti cuka sari apel. *Acetobacter* mengoksidasi etanol menjadi asam asetat dalam proses fermentasi, yang memberikan rasa asam pada produk akhir.
5. *Lactococcus*: *Lactococcus*, seperti *Lactococcus lactis*, merupakan bakteri asam laktat yang umum digunakan dalam pembuatan keju dan produk susu fermentasi lainnya. *Lactococcus* membantu mengubah laktosa dalam susu menjadi asam laktat, yang penting untuk proses pembentukan keju dan memberikan rasa yang khas.
6. *Saccharomyces cerevisiae*: Meskipun bukan bakteri, *Saccharomyces cerevisiae* adalah ragi yang sangat penting dalam pembuatan berbagai produk fermentasi, termasuk roti, bir, anggur, dan sebagainya. Raginya membantu dalam proses fermentasi dengan mengubah gula menjadi alkohol dan gas karbon dioksida.
7. *Propionibacterium*: Bakteri ini digunakan dalam pembuatan keju Swiss, seperti Emmental dan Gruyere. *Propionibacterium* menghasilkan asam propionat dan gas karbon dioksida selama fermentasi, yang berkontribusi pada pembentukan rongga-rongga di dalam keju dan memberikan rasa khas.

Bakteri-bakteri ini berperan penting dalam industri makanan dan minuman karena dapat membantu memperbaiki rasa, tekstur, dan nilai gizi produk. Selain itu, beberapa bakteri pembuat makanan dan minuman juga memiliki manfaat kesehatan yang terkait dengan konsumsi dalam produk-produk fermentasi.

10.3.3 Bakteri Pendegradasi Limbah

Bakteri pendegradasi limbah, juga dikenal sebagai bakteri pengurai, adalah mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk menguraikan dan mendekomposisi bahan organik dalam limbah menjadi senyawa yang lebih sederhana. Proses ini penting dalam daur ulang materi organik, mengurangi volume limbah, dan menjaga keseimbangan ekosistem. Berikut adalah beberapa contoh bakteri pendegradasi limbah yang umum:

1. Bakteri aerobik: Bakteri ini memerlukan oksigen untuk proses dekomposisi limbah. Bakteri tersebut berperan dalam menguraikan materi organik menjadi senyawa sederhana seperti karbon dioksida dan air. Contoh bakteri aerobik yang terlibat dalam penguraian limbah adalah *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan beberapa spesies dari genus *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* yang terlibat dalam siklus nitrogen.
2. Bakteri anaerobik: Bakteri ini dapat hidup dan berkembang biak di lingkungan tanpa oksigen. Bakteri tersebut berperan dalam proses dekomposisi materi organik di lingkungan anaerobik seperti tanah yang tergenang air atau dalam lumpur. Contoh bakteri anaerobik yang penting dalam penguraian limbah termasuk *Clostridium*, *Methanobacterium*, dan beberapa spesies dari genus *Desulfovibrio* yang terlibat dalam pembentukan gas metana (CH_4).
3. *Actinomycetes*: Meskipun sebenarnya bukan bakteri, *actinomycetes* adalah mikroorganisme yang berperan dalam dekomposisi bahan organik di lingkungan. *Actinomycetes* memiliki peran penting dalam penguraian bahan organik yang lebih kompleks seperti selulosa, lignin, dan kitin. Contoh *actinomycetes* yang terlibat dalam penguraian limbah termasuk spesies dari genus *Streptomyces* dan *Actinomyces*.
4. Fungi: Selain bakteri, fungi seperti jamur juga memiliki kemampuan untuk menguraikan materi organik. Fungi berperan dalam dekomposisi bahan organik seperti kayu, daun, dan serasah di lingkungan. Contoh fungi yang penting dalam penguraian limbah termasuk spesies dari genus *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Trichoderma*.

Kehadiran dan aktivitas bakteri pendegradasi limbah sangat penting dalam proses pengomposan, penguraian limbah di instalasi pengolahan air limbah, dan proses alami dekomposisi di lingkungan. Mikroorganisme tersebut membantu mempercepat dekomposisi materi organik, menghasilkan senyawa yang lebih sederhana, dan mengurangi risiko polusi lingkungan akibat akumulasi limbah organik. Selain itu, beberapa bakteri pendegradasi limbah juga dapat digunakan dalam teknologi bioremediasi untuk

membersihkan lingkungan yang tercemar oleh limbah organik atau toksik.

10.3.4 Bakteri Simbiotik dalam Tubuh Manusia

Bakteri simbiotik dalam tubuh manusia merujuk pada bakteri yang hidup secara alami di dalam tubuh manusia dan membentuk hubungan simbiotik, atau saling menguntungkan, dengan manusia. Hubungan simbiotik ini sering kali menguntungkan bagi kesehatan manusia dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan mikrobiota tubuh manusia (Enani *et al.*, 2018). Berikut adalah beberapa contoh bakteri simbiotik yang umum terdapat dalam tubuh manusia:

1. Bakteri usus: Usus manusia adalah rumah bagi sejumlah besar bakteri simbiotik yang membentuk apa yang disebut sebagai mikrobiota usus. Bakteri-bakteri ini membantu dalam pencernaan makanan, sintesis vitamin, dan perlindungan terhadap invasi bakteri patogen (Dimidi *et al.*, 2019). Beberapa contoh bakteri usus yang umum termasuk:
 - a. *Bifidobacterium*: Berperan dalam menjaga keseimbangan flora usus dan membantu dalam pencernaan serat.
 - b. *Lactobacillus*: Membantu dalam produksi asam laktat yang menghambat pertumbuhan bakteri patogen dan menjaga keseimbangan pH usus.
 - c. *Escherichia coli* (*E. coli*): Beberapa strain *E. coli* adalah bagian alami dari flora usus dan berperan dalam sintesis vitamin K.
2. Bakteri kulit: Kulit manusia juga memiliki mikrobiota yang penting untuk menjaga keseimbangan dan kesehatan kulit. Bakteri simbiotik di kulit membantu melindungi kulit dari invasi patogen, menjaga kelembaban kulit, dan mengurangi risiko terkena infeksi. Beberapa contoh bakteri simbiotik di kulit manusia termasuk:
 - a. *Staphylococcus epidermidis*: Bakteri ini merupakan bagian alami dari flora kulit dan membantu dalam perlindungan terhadap bakteri patogen.
 - b. *Propionibacterium acnes*: Meskipun terkait dengan jerawat ketika berlebihan, *P. acnes* adalah bakteri normal di kulit

yang membantu menjaga keseimbangan minyak dan mengurangi pertumbuhan bakteri patogen.

3. Bakteri vagina: Mikrobiota vagina juga merupakan bagian penting dari sistem kekebalan tubuh wanita dan berperan dalam menjaga keseimbangan pH vagina dan melindungi terhadap infeksi. Beberapa contoh bakteri simbiotik di vagina manusia termasuk:
 - a. *Lactobacillus crispatus*: Bakteri ini umumnya ditemukan di vagina sehat dan membantu menjaga keseimbangan pH.
 - b. *Lactobacillus iners*: Bakteri ini juga penting dalam menjaga keseimbangan mikrobiota vagina dan mengurangi risiko infeksi.
4. Bakteri mulut: Mikrobiota mulut juga memiliki peran penting dalam kesehatan mulut dan pencernaan awal makanan. Bakteri simbiotik di mulut membantu dalam menjaga keseimbangan pH mulut dan melindungi terhadap invasi bakteri patogen. Beberapa contoh bakteri simbiotik di mulut manusia termasuk:
 - a. *Streptococcus salivarius*: Bakteri ini membantu dalam menghambat pertumbuhan bakteri patogen dan menjaga keseimbangan pH mulut.
 - b. *Streptococcus mutans*: Meskipun terkait dengan karies gigi ketika berlebihan, *S. mutans* adalah bagian normal dari flora mulut dan membantu dalam proses pencernaan awal karbohidrat.

Hubungan simbiotik antara manusia dan bakteri ini sangat penting bagi kesehatan dan keseimbangan tubuh manusia. Disfungsi mikrobiota dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan pencernaan, infeksi, dan penyakit autoimun. Oleh karena itu, menjaga keseimbangan mikrobiota tubuh dengan pola makan yang sehat, hidrasi yang cukup, dan pengurangan stres sangat penting untuk kesehatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Daito, H. *et al.* (2011) 'Mycobacterial hypersensitivity pneumonitis requires TLR9–MyD88 in lung CD11b + CD11c + cells', 38(3), pp. 688–701. doi: 10.1183/09031936.00177110.
- Dimidi, E. *et al.* (2019) 'Fermented Foods: Definitions and Characteristics, Impact on the Gut Microbiota and Effects on Gastrointestinal Health and Disease.', *Nutrients*. Switzerland, 11(8). doi: 10.3390/nu11081806.
- Enani, S. *et al.* (2018) 'Impact of ageing and a synbiotic on the immune response to seasonal influenza vaccination; a randomised controlled trial.', *Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland)*, 37(2), pp. 443–451. doi: 10.1016/j.clnu.2017.01.011.
- Fischbach, M. A. and Walsh, C. T. (2009) 'Antibiotics for emerging pathogens.', *Science (New York, N.Y.)*. United States, 325(5944), pp. 1089–1093. doi: 10.1126/science.1176667.
- Mirsepasi-Lauridsen, H. C. *et al.* (2019) 'Escherichia coli Pathobionts Associated with Inflammatory Bowel Disease', *Clinical Microbiology Reviews*, 32(2), pp. 10.1128/cmr.00060-18. doi: 10.1128/cmr.00060-18.
- Wang, J. *et al.* (2014) 'Klebsiella pneumoniae alleviates influenza-induced acute lung injury via limiting NK cell expansion.', *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)*. United States, 193(3), pp. 1133–1141. doi: 10.4049/jimmunol.1303303.

BAB 11

BAKTERIA: PERANAN DALAM KEHIDUPAN

Oleh Rury Eryna Putri

11.1 Pendahuluan

Bakteri bersifat ubiquitus, yang tidak hanya tersebar di seluruh tempat, namun juga ditemukan dalam tubuh manusia, hewan, dan manusia. Hal-hal yang harus dipelajari terkait bakteri bahwa sebagian besar bakteri bersifat positif yang memainkan peran penting - dalam lingkungan, hewan, dan manusia. Bakteri menghasilkan beragam metabolit yang dapat dimanfaatkan untuk beragam bidang. Bidang industri, pengolahan makanan dan minuman, biomedis dan farmasi, dan pertanian termasuk akuakultur dan peternakan merupakan sebagian kecil dari bidang-bidang dalam kehidupan manusia yang bergantung pada aktivitas hidup bakteri.

11.2 Bakteri sebagai Bioremediator Polutan

Beragam komoditas diproduksi dalam jumlah melimpah di seluruh dunia, diantaranya adalah kedelai, jagung, tebu, singkong, kopi, sawit, buah-buahan dan masih banyak yang lain (Lopes and Ligabue-Braun, 2021). Komoditas-komoditas tersebut bertanggung jawab dalam menumpuknya sejumlah residu produk pertanian harian dalam jumlah yang sangat besar, termasuk sekam padi, ampas tebu dan singkong, kulit kopi dan tandan sawit (Luthfi *et al.*, 2020; Lopes and Ligabue-Braun, 2021). Residu-residu tersebut masih mengandung beragam komponen yang dapat dimanfaatkan sebagai substrat untuk pertumbuhan mikroorganisme, termasuk bakteri.

11.2.1 Bioremediasi Residu Pestisida

Pestisida yang mengandung ester organifosfat, karbamat, dan piretroid (OCP) termasuk dalam jenis polutan utama di lahan pertanian dan perkebunan. Toksisitas pestisida OCP ini terhadap manusia maupun organisme lain telah cukup banyak dilaporkan (Bhatt *et al.*, 2021a). Esterase dapat digunakan untuk mengkatalisis proses hidrolisis ikatan ester dalam struktur induk pestisida OCP (Bhatt *et al.*, 2021b). Mekanisme ini memungkinkan proses degradasi polutan residu pestisida menjadi lebih cepat (Bhatt *et al.*, 2021b). Bakterial esterase yang dihasilkan oleh *Pseudomonas nitroreducens* CW7, *Rhodopseudomonas palustris* PSB-S, *Rhodococcus pyridinivorans* Y6, *Pantoea ananatis* Sd-1, *Bacillus* sp. 3C, dan *B. subtilis* J6, dilaporkan berpotensi untuk bioremediasi pestisida (Yao *et al.*, 2020; Bhatt, Rene, *et al.*, 2021; Gangola *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). Biodegradasi residu pestisida klorpirifos (CPs) yang mencemari wilayah perairan payau dapat dilakukan dengan pengkayaan bakteri-bakteri di wilayah tersebut, diantaranya adalah psikrofilik *Shewanella* sp. BT05 (Govarthanan *et al.*, 2020). *Shewanella* sp. BT05 dilaporkan juga memiliki aktivitas PGP bagi tanaman bakau di ekosistem tersebut.

11.2.2 Bioremediasi Logam Berat

Seringkali, selain polutan senyawa toksik, lahan pertanian maupun perairan disekitarnya juga terkontaminasi dengan logam berat. Logam berat memiliki sifat biomagnifikasi sehingga dapat mengancam lingkungan pada konsentrasi yang tinggi (Jaishankar *et al.*, 2014). Timbal (Pb), cadmium (Cd), kromium (Cr), seng (Zn), besi (Fe), tembaga (Cu), mangan (Mn), dan nikel (Ni) dikategorikan sebagai logam berat yang sangat beracun (Priyadarshane and Das, 2021). Mereka bersifat persisten karena tidak dapat diurai ataupun dihancurkan, dan terus menerus terakumulasi dalam rantai makanan (Chen *et al.*, 2020). Bakteri yang memiliki beragam mekanisme hidup seperti biosorpsi, biotransformasi, reduksi, eflux ataupun bioakumulasi, serta toleransi yang tinggi terhadap polutan logam dapat dimanfaatkan untuk bioremediasi logam berat (Pushkar *et al.*, 2021). Bakteri resisten logam berat dapat menggunakan satu ataupun kombinasi dari beberapa mekanisme

untuk mengatasi toksisitas cemaran logam berat (Bharagava and Mishra, 2018).

11.2.3 Bioremediasi Cemaran Minyak

Bioremediasi dengan memanfaatkan kelompok bakteri juga dapat diimplementasikan untuk mengatasi cemaran minyak di perairan. Tumpahan minyak pada permukaan perairan dapat memperkaya jenis-jenis bakteri yang mampu memanfaatkan minyak bumi dan menggunakan senyawa hidrokarbon sebagai substrat aktivitas metabolismenya (Hossain *et al.*, 2022). Senyawa hidrokarbon digunakan oleh bakteri dengan tiga cara yang berbeda, yaitu (a) fototropik-anoksigenik, (b) kemotrofik-aerobik, dan (c) kemotrofik-anaerobik (Ganesan *et al.*, 2022). Proses biodegradasi hidrokarbon oleh beberapa jenis bakteri seperti halotoleran *Staphylococcus pasteurii*, *Acinetobacter* sp., *B. thuringiensis*, *B. pumilus*, dan *Rhodococcus hoagi* mengurai hidrokarbon dengan memproduksi biosurfaktan ataupun enzim lakase (Viesser *et al.*, 2020; Hentati *et al.*, 2021; Ganesan *et al.*, 2022). Lebih jauh, bakteri-bakteri pendegradasi senyawa hidrokarbon terutama yang menghasilkan lakase dilaporkan juga mampu mengurai polimer plastik, jenis polutan yang banyak mencemari lautan (Denaro *et al.*, 2020; Muriel-Millán, Millán-López dan Pardo-López, 2021).

11.3 Bakteri dalam bidang Medis dan Farmasi

Perkembangan saat ini menunjukkan kenaikan trend pemanfaatan bakteri sebagai probiotik untuk peningkatan kesehatan manusia.

11.3.1 Bakteri untuk Probiotik Manusia

Bakteri asam laktat (BAL) secara umum digunakan sebagai probiotik secara tidak langsung menjadi kelompok bakteri yang penting untuk dunia medis dan farmasi. BAL mencakup 14 genus, diantaranya adalah *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, dan *Streptococcus* sebagai genus inti (Bintsis, 2018). Probiotik secara klinis digunakan untuk pencegahan dan pengobatan infeksi dan penyakit saluran pencernaan, pengentasan sembelit, perlindungan

terhadap diare, pencegahan alergi, dan mencegah eritrotoksis (Ayivi *et al.*, 2020; Cuevas-González *et al.*, 2021).

Penelitian terhadap suplemen probiotik (*Bifidobacterium longum* CECT 7347, *L. casei* CECT 9104, dan *L. rhamnosus* CECT 8361) mengungkapkan probiotik tersebut tidak sekedar suplemen kesehatan usus namun ternyata memiliki aktivitas antioksidan. Probiotik tersebut menghasilkan perbaikan cekaman oksidatif pada pria sehat yang menjalani latihan fisik intensitas tinggi (Macarro *et al.*, 2021). Selain itu, BAL *food grade* yaitu *Pediococcus pentosaceus* R1 dan *L. fermentum* R6 juga menunjukkan kemampuan untuk melawan cekaman oksidatif (Zhang *et al.*, 2021). Keduanya menunjukkan aktivasi sistem pertahanan antioksidan yang tepat ketika dihadapkan dengan keberadaan *reactive oxygen species* (ROS) seperti anion superoksida (O_2^-), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan radikal hidroksil ($HO\cdot$) (Zhang *et al.*, 2021). Berdasarkan bukti-bukti ini, BAL *food grade* dapat menjadi pendekatan yang potensial dan aman untuk mengurangi infeksi patogen, terutama dengan meningkatkan aktivitas biologisnya.

11.4 Bakteri dalam Bidang Pengolahan Makanan

Probiotik *food grade* didapatkan pada makanan non-fermentasi dan makanan fermentasi, baik yang bersifat produk susu/olahan susu, dan non-susu, serta makanan tradisional. Selain untuk medis, BAL sebagai bagian dari probiotik, terlibat dalam proses fermentasi pada tingkatan yang berbeda, memberikan efek positif maupun efek negatif.

11.4.1 Bakteri pada Fermentasi Produk Susu

Proses proteolisis oleh BAL dalam fermentasi susu meliputi degradasi protein, transport peptida, degradasi peptida, dan metabolisme asam amino, yang melibatkan enzim protease yang dihasilkan oleh BAL (Wang *et al.*, 2021). Selain itu, BAL yang mencerna laktosa dalam susu akan melepaskan asam laktat sebagai produk metabolisme yang kemudian menurunkan pH susu. Peningkatan keasaman susu secara bersamaan akan mempercepat pengentalan susu yang menjadi proses penting untuk menghasilkan produk akhir berupa yoghurt, keju, kefir, krim asam, dan sebagainya

(Kerry *et al.*, 2018). BAL dalam fermentasi susu juga berkontribusi untuk mengurai lemak susu dengan aktivitas lipolitik yang menghasilkan asam lemak rantai pendek, serta senyawa volatile yang berkaitan dengan aroma produk susu (Sharma *et al.*, 2023).

11.4.2 Bakteri sebagai Pengawet Makanan

Bakteri asam laktat menghasilkan suatu antimikrob peptide sebagai suatu pengawet (*preservatives*) alami dan aman pada beragam makanan tanpa mengubah karakteristik makanan seperti nutrisi, fisikokimia, hingga sensorik (de Souza, de Oliveira and de Oliveira, 2023). Berdasarkan hal tersebut, BAL yang mampu menghasilkan bakteriosin dapat digunakan dalam pengolahan dan pengawetan makanan untuk melawan patogen bawaan makanan dan bakteri pembusuk (Nisa *et al.*, 2023).

Proses pengawetan makanan yang mengandung BAL berupa *Propionibacterium* dan *Bifidobacterium* memanfaatkan aktivitas pembentukan asam organik (laktat, asetat, propionat, format, dll.), acetoin, diasetil, hingga bakteriosin selama penyimpanan (Zapaśnik, Sokołowska and Bryła, 2022). *Lactobacillus* dimanfaatkan untuk memproduksi salah satu jenis bakteriosin yang efektif dan memiliki spektrum antimikrob yang luas yaitu nisin. Karakteristik tersebut menjadikan nisin secara komersial digunakan dalam pengawetan daging segar maupun olahan, sehingga dapat memperpanjang umur simpan daging maupun kualitas daging (Barcenilla *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2023). Dilain sisi, terdapat laporan yang menunjukkan penambahan kultur sel langsung dari BAL fungsional seperti *Ligilactobacillus salivaricus* (10^6 cfu/g) pada pengawetan daging dapat menghambat patogen *Listeria monocytogenes* dan *Salmonella* sp. pada kulit ayam (Sakaridis *et al.*, 2014).

11.4.3 Bakteri pada Pembuatan Minuman Fermentasi

Jenis bakteri lain yang berkontribusi besar dalam pembuatan makanan dan minuman adalah bakteri asam asetat (BAA). BAA diproduksi secara komersial sebagai *starter* untuk pembuatan minuman fermentasi, sebagai contoh yang saat ini sedang banyak diminati adalah teh kombucha. Berbarengan dengan khamir (*yeast*), bakteri dari jenis *Komagateibacter* merupakan mikroba yang

mendominasi dalam proses fermentasi dan kualitas teh kombucha (Barbosa *et al.*, 2021).

Komagateibacter menghasilkan produk senyawa yang mempengaruhi rasa, aroma dan kualitas teh kombucha, yang ditandai dengan ragam senyawa volatil yang terdapat dalam kombucha (Meng *et al.*, 2024). Selain itu, *Komagateibacter* bersama dengan katekin juga berkontribusi dalam mengontrol keberadaan kontaminasi mikroba lain ataupun patogen selama proses fermentasi (Barbosa *et al.*, 2021). BAA selain *Komagateibacter* yang menjadi komposisi dalam *starter* kombucha antara lain *Acetobacter* dan *Glukonobacter*. Bakteri-bakteri tersebut menghasilkan etanol, asam organik dan vitamin yang mempengaruhi karakteristik rasa, aroma dan sensorik pada kombucha (Tran *et al.*, 2020), lalu juga dihasilkan massa biofilm selulosa yang populer disebut sebagai *scooby* (Laavanya, Shirkole dan Balasubramanian, 2021).

Serupa dengan pembuatan kombucha, pembuatan makanan komersil lain yang banyak digemari saat ini yaitu nata de coco, massa biofilm selulosa yang dihasilkan oleh jenis-jenis BAA yang serupa yaitu *Komagateibacter*. *K. nataicola* mampu memanfaatkan gula dalam air kelapa yang digunakan sebagai substrat untuk kemudian terkonversi menjadi asam asetat serta substansi mirip gel yang kemudian diolah menjadi nata de coco (Qin *et al.*, 2024). Namun, terdapat laporan terbaru yang juga menunjukkan potensi penambahan jenis bakteri *starter* lain yaitu BAL *L. fermentum* yang ternyata mampu menghasilkan *yield* biomassa selulosa yang signifikan lebih tinggi (Jiang *et al.*, 2023). Genus *Lactobacillus* juga membantu proses fermentasi pada pembuatan makanan tradisional dari daerah melayu yang berbahan dasar daging buah durian, yaitu tempoyak (Ahmad *et al.*, 2018; Rajagukguk dan Arnold, 2021; Anggadhanian *et al.*, 2023). Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, rasa asam pada tempoyak dipengaruhi oleh produksi asam-asam organik selama proses fermentasi dari *Lactobacillus* (Rajagukguk dan Arnold 2021). Secara tidak langsung, keberadaan *Lactobacillus* pada pembuatan tempoyak dapat mempengaruhi karakteristik sensorik pada produk tempoyak yang dihasilkan (Rajagukguk dan Arnold 2021).

11.5 Bakteri dalam Bidang Pertanian

Pemanfaatan bakteri beserta metabolit primer dan sekunder yang dihasilkan bakteri dimanfaatkan juga dalam bidang pertanian, termasuk mencangkup perikanan dan peternakan. Biofertilizer atau pupuk hayati adalah metode yang telah cukup banyak dikembangkan dalam bidang pertanian, mengandung konsorsium bakteri dari kelompok rhizobakteria pemacu tumbuh tanaman (*plant growth promoting rhizobacteria* atau PGPR). Penggunaan bakteri dalam bentuk pupuk hayati diketahui mampu meningkatkan produktivitas tanaman pangan (Wang *et al.*, 2022). PGPR juga berperan penting dalam menstimulasi imunitas tanaman terhadap patogen melalui induksi resistensi sistemik.

11.5.1 Hortikultura : Bakteri Pemacu Tumbuh Tanaman

Bakteri sebagai bagian dari mikrobiom tanaman berperan besar sebagai pemacu pertumbuhan tanaman dengan beberapa mekanisme, baik mekanisme secara langsung maupun tidak langsung (Wang *et al.*, 2022). Mekanisme langsung pertama adalah bakteri yang mampu melakukan fiksasi nitrogen (N_2), yang terbagi menjadi dua kelompok yaitu bakteri penambat N_2 simbiosis dan bakteri penambat N_2 bebas, bergantung pada jenis asosiasi yang dikembangkan oleh bakteri ke tanaman (Shah *et al.*, 2021). *Rhizobium*, *Frankia*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Allorhizobium* dan *Azorhizobium* merupakan genus utama yang menjadi pemfiksasi nitrogen simbiosis tanaman, terutama yang berinteraksi dengan tanaman legume, sedangkan *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Gluconacetobacter*, dan *Herbaspirillum* adalah genus-genus yang termasuk dalam pemfiksasi N_2 bebas (Shah *et al.*, 2021). Sebagai tambahan, terdapat satu lagi jenis mikroba yang melakukan penambatan nitrogen yaitu sianobakter, yaitu kelompok penambat N_2 fotosintetik.

Penambatan nitrogen pada bakteri simbiosis dimulai dengan interaksi silang antara bakteri pengikat nitrogen, *Rhizobium* adalah jenis paling umum, dengan tanaman inang, yaitu tanaman kacang-kacangan atau legume (Yang *et al.*, 2022). Interaksi silang tersebut melibatkan molekul-molekul sinyal. Lalu akan terbentuk struktur khusus pada akar tanaman berupa bintil akar, tempat *Rhizobium*

akan mereduksi nitrogen bebas (N_2) di atmosfer menjadi bentuk-bentuk yang tersedia bagi tanaman, yang utama adalah ammonia (NH_3) (Yang *et al.*, 2022). Fiksasi nitrogen secara biologis bersifat penting karena berkaitan dengan produksi pangan global dan keberlangsungan siklus nitrogen ekosistem (Yang *et al.*, 2022). Secara umum, konversi N_2 menjadi NH_3 oleh *Rhizobium* melibatkan aktivitas enzim dinitrogenase (EC 1.18.2.1), yang membutuhkan sejumlah besar energi yaitu setara 16 mol ATP per mol nitrogen yang difiksasi, dan bersifat sangat sensitif terhadap oksigen (Chen *et al.*, 2021).

Mekanisme kedua adalah pelarutan fosfat (P), molekul penting bagi tanaman setelah nitrogen namun tidak tersedia dalam bentuk bebas di alam. Bakteri pelarut fosfat (BPF) memainkan peran yang multifungsi dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan P dalam tanah, sekaligus mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman, serta membantu ketahanan tanaman terhadap cekaman (Fan *et al.*, 2018; Cheng *et al.*, 2023). BPF mengubah P terikat (P anorganik) dari tanah, bangkai hewan, dan residu tanaman menjadi P yang tersedia untuk diabsorpsi oleh tanaman sekaligus mendukung siklus biokimia P tanah-tanaman (Al-Ali *et al.*, 2018). BPF juga dapat mempengaruhi struktur komunitas mikroba rizosfer dan konfigurasi sistem perakaran tanaman sebagai hasil dari respon BPF terhadap eksudat akar (asam organik dan polisakarida) (Al-Ali *et al.*, 2018). Genus bakteri yang dilaporkan sebagai BPF meliputi *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Burkholderia*, *Flavobacterium*, dan *Thiobacillus* (Fan *et al.*, 2018).

Mekanisme ketiga adalah sebagai penghasil fitohormon, diantaranya adalah auksin termasuk *indole-acetic acid* (IAA), sitokinin, asam giberelin, dan asam absisat (Egamberdieva *et al.*, 2017). Beberapa spesies yang berbeda dari genus *Bacillus* mampu melakukan biosintesis fitohormon berupa IAA (Poveda dan González-Andrés, 2021), selain itu *Paenibacillaceae* dan *Flavobacteriaceae* dilaporkan mampu menghasilkan auksin IAA. Keberadaan *P. polymixa* dan *Chryseobacterium culicis* penghasil IAA mendorong pembentukan *rhizosheath* pada tanaman barley (Xu *et al.*, 2023). Penerapan *B. toyonensis* Bt04 penghasil IAA dan sitokinin

menunjukkan perubahan fenotipe akar tanaman jagung untuk membantu tanaman jagung bertahan di bawah kondisi cekaman alumunium (Zerrouk *et al.*, 2020).

B. methylotrophicus M4-96 menghasilkan asam giberelat yang menstimulasi pertumbuhan tanaman strawberry yang diindikasikan dengan pertambahan panjang petiol dan jumlah akar (Vicente-Hernández *et al.*, 2019). Bakteri tersebut juga secara positif memperkuat dinding sel daun tanaman strawberry dengan cara meningkatkan kuantitas endapan kalosa pada daun strawberry hingga lima kali lipat. Hal ini mendorong reaksi pertahanan cepat dalam menghambat infeksi cendawan embun tepung, sehingga terbukti bahwa ada mekanisme induksi resistensi sistemik oleh *B. methylotrophicus* M4-96 (Vicente-Hernández *et al.*, 2018).

11.5.2 Hortikultura: Bakteri sebagai Agen Pengendali Hayati

Produksi siderofor meskipun menjadi indikator pemacuan tumbuh tanaman namun sejatinya lebih berperan besar dalam meningkatkan imunitas tanaman. Siderofor merupakan metabolit sekunder yang dihasilkan bakteri yang menangkap besi (Fe) dari lingkungan untuk membentuk kompleks ion Fe^{3+} yang dapat larut air yang dapat di-uptake secara aktif oleh bakteri dan organisme lain (Kramer, Özkaya dan Kümmerli, 2020; Ghazy dan El-Nahrawy, 2021). Genus umum yang termasuk bakteri penghasil siderofor adalah *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Bulkholderia*, *Beijerinckia*, dan *Arthrobacter* (Sun *et al.*, 2022). Induksi ketahanan terhadap penyakit layu daun akibat serangan *Cephalosporium maydis* didapatkan dengan penerapan kombinasi *B. subtilis* dan *P. koreensis* (Ghazy dan El-Nahrawy 2022). Kedua bakteri tersebut mendorong tanaman jagung untuk mengurangi infeksi *C. maydis* dengan cara meningkatkan ketebalan lapisan selubung sklerenkim yang mengelilingi berkas pembuluh dalam batang tajuk jagung (Ghazy dan El-Nahrawy 2022).

Pengendalian biologis atau bikontrol penyakit tanaman menggunakan agen pengendali berupa bakteri merupakan studi yang sudah masif dan terus berkembang. Genus *Bacillus* masih menjadi genus yang dominan sebagai objek studi biokontrol penyakit tanaman hingga penyakit pascapanen. *B. subtilis* terbukti

dapat menjadi agen biokontrol yang efektif dalam menekan kejadian penyakit layu pada tanaman kedelai varietas Grobogan yang diinfeksi dengan fitopatogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *glycines* dengan cara menghasilkan lipopeptida (Putri *et al.*, 2023).

Selain itu, mekanisme pengendalian penyakit pada patogen yang sama kemungkinan juga dapat melalui produksi enzim penghidrolisis dinding sel cendawan berupa kitinase (Dukare dan Paul, 2021), dan β -glukanase (Putri *et al.*, 2021). Penerapan *Bacillus* seperti *B. velezensis*, *B. licheniformis*, dan *B. altitudinis* berpotensi besar dalam mencegah ataupun memperlambat proses kerusakan buah maupun sayuran karena infeksi *Botrytis cinerea* dan *Colletotrichum* pada cabai, *Rhizopus stolonifer* pada buah peach, dan *Ceratocystis fimbriata* pada ubi jalar (Wang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Russi, Granada dan Schwambach, 2024).

11.5.3 Akuakultur : Bakteri sebagai Pengatur Kualitas Air Kolam Budidaya

Di lain sisi, beragam bakteri ternyata berperan penting dalam bidang akuakultur, misalkan adalah bakteri nitrifikasi, denitrifikasi dan anamox yang banyak ditemukan pada lingkungan budidaya udang. Kondisi nitrifikasi, denitrifikasi, dan anammox terjadi secara simultan pada kolam ikan dan udang yang kondisi airnya memiliki konsentrasi nitrogen yang tinggi (Wen *et al.*, 2016). Bakteri nitrifier menghilangkan ammonia dan kontaminan organik melalui reaksi oksidasi biologis ammonia menjadi nitrit dan nitrat. Namun, saat kondisi oksigen di lingkungan perairan tersebut terbatas maka ammonia dioksidasi menjadi nitrit oleh bakteri pengoksidasi ammonia (*ammonia oxidizing bacteria* atau AOB). Ammonia yang tersisa akan dihilangkan melalui proses anammox oleh bakteri anammox, yang diikuti oleh proses denitrifikasi yang mereduksi nitrit dan nitrat menjadi nitrogen bebas (N₂) oleh denitrifier (Lu *et al.*, 2020). *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, dan *Deinococcus-Thermus* menjadi kelompok *nitrifier* heterotrof dan *denitrifier* aerobik yang ditemukan dominan pada kolam udang (Vinothkumar *et al.*, 2021).

11.5.4 Akuakultur : Bakteri sebagai Probiotik Hewan Akuatik

Bakteri berpotensi besar digunakan sebagai probiotik dan alternatif pakan dalam budidaya ikan dan udang. Bakteri kaya akan protein dan mengandung lebih banyak nukleotida bila dibandingkan dengan tepung ikan tradisional (Wang *et al.*, 2020). Suplementasi pakan ikan dan udang dengan bakteri bermanfaat bagi pertumbuhan, imunitas, dan respon cekaman dari hewan akuatik, bahkan hingga meningkatkan kelezatan pakan ikan atau udang (Gamboa-Delgado dan Márquez-Reyes, 2018). Imunitas hewan akuatik dapat dijaga dengan pemberian probiotik dengan kandungan bakteri probiotik yang ternyata serupa dengan yang diperuntukkan pada manusia, seperti BAL. BAL *L. plantarum*, beserta *Clostridium*, *B. subtilis*, *Bacteridaceae*, dan *Aeromonas* menghasilkan enzim yaitu amilase, protease, dan bacteriosin. Selain menjaga imunitas, dalam bidang akuakultur, probiotik memberikan beberapa manfaat berupa meningkatkan performa pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, status kesehatan, integritas penghalang epitel usus, mikrobioma usus, dan kualitas air (El-Saadony *et al.*, 2021)

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A. *et al.* (2018) 'Probiotic potentials of *Lactobacillus plantarum* isolated from fermented durian (Tempoyak), a Malaysian traditional condiment', *Food Science and Nutrition*, 6(6), pp. 1370–1377. Available at: <https://doi.org/10.1002/fsn3.672>.
- Al-Ali, A. *et al.* (2018) 'Biofilm formation is determinant in tomato rhizosphere colonization by *Bacillus velezensis* FZB42', *Environmental Science and Pollution Research*, 25(30), pp. 29910–29920. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0469-1>.
- Anggadhanian, L. *et al.* (2023) 'Exploring tempoyak, fermented durian paste, a traditional Indonesian indigenous fermented food: typical of Malay tribe', *Journal of Ethnic Foods*, 10(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s42779-023-00206-2>.
- Ayivi, R.D. *et al.* (2020) 'Lactic Acid Bacteria: Food Safety and Human Health Applications', *Dairy*, 1(3), pp. 202–232. Available at: <https://doi.org/10.3390/dairy1030015>.
- Barbosa, C.D. *et al.* (2021) 'Microbial–physicochemical integrated analysis of kombucha fermentation', *Lwt*, 148(January). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111788>.
- Barcenilla, C. *et al.* (2022) 'Application of lactic acid bacteria for the biopreservation of meat products: A systematic review', *Meat Science*, 183. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108661>.
- Bharagava, R.N. and Mishra, S. (2018) 'Hexavalent chromium reduction potential of *Cellulosimicrobium* sp. isolated from common effluent treatment plant of tannery industries', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147(September 2017), pp. 102–109. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.040>.
- Bhatt, P., Zhou, X., *et al.* (2021) 'Characterization of the role of esterases in the biodegradation of organophosphate, carbamate, and pyrethroid pesticides', *Journal of Hazardous Materials*, 411(January), p. 125026. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.125026>.

- Bhatt, P., Rene, E.R., *et al.* (2021) 'Systems biology analysis of pyrethroid biodegradation in bacteria and its effect on the cellular environment of pests and humans', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), p. 106582. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106582>.
- Chen, W.F. *et al.* (2021) 'Recent development and new insight of diversification and symbiosis specificity of legume rhizobia: mechanism and application', *Journal of Applied Microbiology*, 131(2), pp. 553–563. Available at: <https://doi.org/10.1111/jam.14960>.
- Chen, X. *et al.* (2020) 'Speciation, toxicity mechanism and remediation ways of heavy metals during composting: A novel theoretical microbial remediation method is proposed', *Journal of Environmental Management*, 272(July), p. 111109. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111109>.
- Cheng, Y. *et al.* (2023) 'Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity', *Science of the Total Environment*, 901(August), p. 166468. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166468>.
- Cuevas-González, P.F. *et al.* (2021) 'Food-grade lactic acid bacteria and probiotics as a potential protective tool against erythroxenic dietary xenobiotics', *Trends in Food Science and Technology*, 116(May), pp. 1041–1055. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.004>.
- Denaro, R. *et al.* (2020) 'Marine hydrocarbon-degrading bacteria breakdown poly(ethylene terephthalate) (PET)', *Science of the Total Environment*, 749. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141608>.
- Dukare, A. and Paul, S. (2021) 'Biological control of Fusarium wilt and growth promotion in pigeon pea (*Cajanus cajan*) by antagonistic rhizobacteria, displaying multiple modes of pathogen inhibition', *Rhizosphere*, 17(October 2020), p. 100278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100278>.

- El-Saadony, M.T. *et al.* (2021) 'The functionality of probiotics in aquaculture: An overview', *Fish and Shellfish Immunology*, 117(June), pp. 36–52. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.07.007>.
- Fan, Y. *et al.* (2018) 'Decreased soil organic P fraction associated with ectomycorrhizal fungal activity to meet increased P demand under N application in a subtropical forest ecosystem', *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), pp. 149–161. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1251-8>.
- Gamboa-Delgado, J. and Márquez-Reyes, J.M. (2018) 'Potential of microbial-derived nutrients for aquaculture development', *Reviews in Aquaculture*, 10(1), pp. 224–246. Available at: <https://doi.org/10.1111/raq.12157>.
- Ganesan, M. *et al.* (2022) 'Bioremediation by oil degrading marine bacteria: An overview of supplements and pathways in key processes', *Chemosphere*, 303(P1), p. 134956. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134956>.
- Gangola, S. *et al.* (2022) 'Novel mechanism and degradation kinetics of pesticides mixture using *Bacillus* sp. strain 3C in contaminated sites', *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 181(August 2021), p. 104996. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2021.104996>.
- George Kerry, R. *et al.* (2018) 'Benefaction of probiotics for human health: A review', *Journal of Food and Drug Analysis*, 26(3), pp. 927–939. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.01.002>.
- Ghazy, N. and El-Nahrawy, S. (2021) 'Siderophore production by *Bacillus subtilis* MF497446 and *Pseudomonas koreensis* MG209738 and their efficacy in controlling *Cephalosporium maydis* in maize plant', *Archives of Microbiology*, 203(3), pp. 1195–1209. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-02113-5>.
- Govarthanan, M. *et al.* (2020) 'Rapid biodegradation of chlorpyrifos by plant growth-promoting psychrophilic *Shewanella* sp. BT05: An eco-friendly approach to clean up pesticide-contaminated environment', *Chemosphere*, 247, p. 125948. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020>.

125948.

- Hentati, D. *et al.* (2021) 'Investigation of halotolerant marine *Staphylococcus* sp. C0100, as a promising hydrocarbon-degrading and biosurfactant-producing bacterium, under saline conditions', *Journal of Environmental Management*, 277(October 2020), p. 111480. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111480>.
- Hossain, M.F. *et al.* (2022) 'Bioremediation potential of hydrocarbon degrading bacteria: isolation, characterization, and assessment', *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), pp. 211–216. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.069>.
- Huang, Y. *et al.* (2023) 'Efficient biodegradation of multiple pyrethroid pesticides by *Rhodococcus pyridinivorans* strain Y6 and its degradation mechanism', *Chemical Engineering Journal*, 469(May), p. 143863. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143863>.
- Jaishankar, M. *et al.* (2014) 'Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals', *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), pp. 60–72. Available at: <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
- Jiang, H. *et al.* (2023) 'Effect of co-culture of *Komagataeibacter nataicola* and selected *Lactobacillus fermentum* on the production and characterization of bacterial cellulose', *Lwt*, 173(August 2022), p. 114224. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114224>.
- Kramer, J., Özkaya, Ö. and Kümmerli, R. (2020) 'Bacterial siderophores in community and host interactions', *Nature Reviews Microbiology*, 18(3), pp. 152–163. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0284-4>.
- Laavanya, D., Shirkole, S. and Balasubramanian, P. (2021) 'Current challenges, applications and future perspectives of SCOPY cellulose of Kombucha fermentation', *Journal of Cleaner Production*, 295, p. 126454. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126454>.
- Lopes, F.C. and Ligabue-Braun, R. (2021) 'Agro-Industrial Residues: Eco-Friendly and Inexpensive Substrates for Microbial

- Pigments Production', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(March). Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.589414>.
- Lu, J. *et al.* (2020) 'Nitrogen removal in recirculating aquaculture water with high dissolved oxygen conditions using the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification system', *Bioresource Technology*, 305(February), p. 123037. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123037>.
- Macarro, M.S. *et al.* (2021) 'Antioxidant effect of a probiotic product on a model of oxidative stress induced by high-intensity and duration physical exercise', *Antioxidants*, 10(2), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.3390/antiox10020323>.
- Meng, Y. *et al.* (2024) 'Microbial interactions and dynamic changes of volatile flavor compounds during the fermentation of traditional kombucha', *Food Chemistry*, 430(January 2023), p. 137060. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137060>.
- Mohd Luthfi, W.N.S. *et al.* (2020) 'Production and characterization of bioflocculant via solid state fermentation process using oil palm empty fruit bunch fibers as substrate', *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23(July 2019), p. 101454. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101454>.
- Muriel-Millán, L.F., Millán-López, S. and Pardo-López, L. (2021) 'Biotechnological applications of marine bacteria in bioremediation of environments polluted with hydrocarbons and plastics', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(19), pp. 7171–7185. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11569-4>.
- Nisa, M. *et al.* (2023) 'Combating food spoilage and pathogenic microbes via bacteriocins: A natural and eco-friendly substitute to antibiotics', *Food Control*, 149(February), p. 109710. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109710>.
- Poveda, J. and González-Andrés, F. (2021) 'Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(23), pp. 8629–8645. Available at:

<https://doi.org/10.1007/s00253-021-11492-8>.

- Priyadarshane, M. and Das, S. (2021) 'Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), p. 104686. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104686>.
- Pushkar, B. *et al.* (2021) 'Chromium pollution and its bioremediation mechanisms in bacteria: A review', *Journal of Environmental Management*, 287(March), p. 112279. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112279>.
- Putri, R.E. *et al.* (2021) 'Antagonistic activity of glucanolytic bacteria *Bacillus subtilis* W3.15 against *Fusarium oxysporum* and its enzyme characterization', *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(9), pp. 4067–4077. Available at: <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D220956>.
- Putri, R.E. *et al.* (2023) 'The disease suppression of soybean (var. Grobogan) by the implementation of *Bacillus subtilis* strain CR.9 antifungal compounds nanoemulsion', *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(6), pp. 384–393. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.03.004>.
- Qin, X. *et al.* (2024) 'Exploring the biotic and abiotic drivers influencing nata de coco production by *Komagataeibacter nataicola* in pre-fermented coconut water', *International Journal of Food Microbiology*, 414(January), p. 110620. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110620>.
- Rajagukguk, Y.V. and Arnold, M. (2021) 'Tempoyak: Fermented durian paste of Malay ethnic and its functional properties', *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 23(October 2020), p. 100297. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100297>.
- Russi, A., Granada, C.E. and Schwambach, J. (2024) 'Optimization of *Bacillus velezensis* S26 sporulation for enhanced biocontrol of gray mold and anthracnose in postharvest strawberries', *Postharvest Biology and Technology*, 210(December 2023). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023>.

112737.

- Sakaridis, I. *et al.* (2014) 'Lactic Acid Bacteria Isolated from Chicken Carcasses with Inhibitory Activity against *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes*', *Czech Journal of Food Sciences*, 32(1), pp. 61–68. Available at: <https://doi.org/10.17221/414/2012-cjfs>.
- Shah, A. *et al.* (2021) 'PGPR in Agriculture: A Sustainable Approach to Increasing Climate Change Resilience', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(July), pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667546>.
- Sharma, H. *et al.* (2023) 'Impact of lactic acid bacteria and their metabolites on the techno-functional properties and health benefits of fermented dairy products', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(21), pp. 4819–4841. Available at: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2007844>.
- de Souza, E.L., de Oliveira, K.Á. and de Oliveira, M.E. (2023) 'Influence of lactic acid bacteria metabolites on physical and chemical food properties', *Current Opinion in Food Science*, 49, p. 100981. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100981>.
- Sun, Y. *et al.* (2022) 'Screening of Siderophore-Producing Bacteria and Their Effects on Promoting the Growth of Plants', *Current Microbiology*, 79(5), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00284-022-02777-w>.
- T, B. (2018) 'Lactic acid bacteria: their applications in foods', *Journal of Bacteriology & Mycology: Open Access*, 6(2), pp. 89–94. Available at: <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2018.06.00182>.
- Tran, T. *et al.* (2020) 'Microbiological and technological parameters impacting the chemical composition and sensory quality of kombucha', *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), pp. 2050–2070. Available at: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12574>.
- Vicente-Hernández, A. *et al.* (2019) 'Bacillus methylotrophicus M4-96 Stimulates the Growth of Strawberry (*Fragaria × ananassa* "Aromas") Plants In Vitro and Slows Botrytis cinerea Infection by Two Different Methods of Interaction',

- Journal of Plant Growth Regulation*, 38(3), pp. 765–777. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9888-6>.
- Viesser, J.A. *et al.* (2020) 'Petroleum-Tolerant Rhizospheric Bacteria: Isolation, Characterization and Bioremediation Potential', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59029-9>.
- Vinothkumar, R. *et al.* (2021) 'Heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacteria: Characterization and comparison of shrimp pond and effluent discharge channel in aspects of composition and function', *Aquaculture*, 539(March), p. 736659. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736659>.
- Wang, C. *et al.* (2020) 'Beneficial bacteria for aquaculture: nutrition, bacteriostasis and immunoregulation', *Journal of Applied Microbiology*, 128(1), pp. 28–40. Available at: <https://doi.org/10.1111/jam.14383>.
- Wang, X. *et al.* (2023) 'Biological control efficacy of *Bacillus licheniformis* HG03 against soft rot disease of postharvest peach', *Food Control*, 145(April 2022), p. 109402. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109402>.
- Wang, Y. *et al.* (2022) 'A Potential Biofertilizer—Siderophilic Bacteria Isolated From the Rhizosphere of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*', *Frontiers in Microbiology*, 13(May), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.870413>.
- Wang, Yaqi *et al.* (2021) 'Metabolism Characteristics of Lactic Acid Bacteria and the Expanding Applications in Food Industry', *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9(May), pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>.
- Wen, X. *et al.* (2016) 'A novel process combining simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) with denitrifying phosphorus removal (DPR) to treat sewage', *Bioresource Technology*, 222, pp. 309–316. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.132>.
- Wu, J. *et al.* (2023) 'Nisin: From a structural and meat preservation perspective', *Food Microbiology*, 111(December 2022), p.

104207. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104207>.
- Xu, F. *et al.* (2023) 'Auxin-producing bacteria promote barley rhizosheath formation', *Nature Communications*, 14(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40916-4>.
- Yang, J. *et al.* (2022) 'Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses', *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), pp. 244–267. Available at: <https://doi.org/10.1111/jipb.13207>.
- Yao, Q. *et al.* (2020) 'Identification and characterization of a novel bacterial carbohydrate esterase from the bacterium *Pantoea ananatis* Sd-1 with potential for degradation of lignocellulose and pesticides', *Biotechnology Letters*, 42(8), pp. 1479–1488. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10529-020-02855-8>.
- Zapaśnik, A., Sokołowska, B. and Bryła, M. (2022) 'Role of Lactic Acid Bacteria in Food Preservation and Safety', *Foods*, 11(9), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods11091283>.
- Zerrouk, I.Z. *et al.* (2020) 'Growth and aluminum tolerance of maize roots mediated by auxin- and cytokinin-producing *Bacillus toyonensis* requires polar auxin transport', *Environmental and Experimental Botany*, 176(March), p. 104064. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104064>.
- Zhang, H. *et al.* (2021) 'Physiology and antioxidant activity of *Pediococcus pentosaceus* R1 and *Lactobacillus fermentum* R6 in response to lactic acid stress', *Lwt*, 149(June), p. 111878. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111878>.
- Zhang, M. *et al.* (2024) 'A novel cold-adapted pyrethroid-degrading esterase from *Bacillus subtilis* J6 and its application for pyrethroid-residual alleviation in food matrix', *Journal of Hazardous Materials*, 463(August 2023). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132847>.
- Zhang, Y.J. *et al.* (2023) 'Potential utility of endophytic *Bacillus altitudinis* strain P32-3 as a biocontrol agent for the postharvest prevention of sweet potato black rot', *Biological Control*, 186(August), p. 105350. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105350>.

BIODATA PENULIS



Rahayu Wulan, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi S1 Teknologi Pangan
Fakultas Pertanian Universitas Tidar

Penulis lahir di Purworejo, pada 21 Desember 1995. Penulis merupakan lulusan dari Institut Pertanian Bogor pada S1 Biologi pada tahun 2017 dan S2 Mikrobiologi pada tahun 2021. Penulis merupakan *awardee* beasiswa PMDSU batch keempat dari Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Tahun 2018. Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Tidar. Penulis memulai karir sebagai dosen sejak Mei 2022 dan aktif pada kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Saat ini penulis fokus pada penelitian di bidang mikrobiologi, terutama probiotik khamir dan bakteri, prebiotik, *gut microbiota*, bioteknologi mikroba, serta *food safety*. Penulis juga telah tersertifikasi sebagai *Biosafety Officer* pada Sertifikasi Internasional (SNI ISO/IEC 17:024:2012) Certified International Biosafety Officer (CIBsO).

BIODATA PENULIS



Deswidya S Hutaauruk, S.Pd., M.Si.

Dosen Program Studi Analis Kesehatan
Fakultas Kesehatan Universitas Efarina

Deswidya S Hutaauruk, lahir di desa Hutnamora, Kecamatan Pangururan, Kabupaten Samosir pada tanggal 15 Desember 1989. Memulai pendidikan di SD Negeri 1 Pangururan, lalu melanjut ke SMP Negeri 1 P **Gambar 10.1.** Jenis-jenis bakteri (angururan dan menyelesaikan pendidikan wajib 9 tahun di SMA Negeri 1 Pangururan. Setelah tamat SMA, melanjutkan studi di Jurusan Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Medan tahun 2017 dan lulus tahun 2011. Pada tahun 2012, melanjutkan Program Pascasarjana (S2) di Universitas Sumatera Utara dengan mengambil Program Studi Biologi (Mikrobiologi), lulus tahun 2014.

Sejak tahun 2015 diangkat sebagai dosen tetap di Program Studi D III Analis Kesehatan, Fakultas Kesehatan Universitas Efarina sampai dengan saat ini. Pada tahun 2018 - Maret 2022 penulis di percayakan memegang posisi Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Efarina. Penulis telah beberapa kali memenangkan Hibah Penelitian Dosen Pemula baik sebagai ketua maupun anggota dan hingga kini telah memiliki beberapa publikasi baik di tingkat Lokal, Nasional maupun Internasional.

BIODATA PENULIS



Rizqi Yanuar Pauzi, S.Pd., M.Si.

Dosen Program Studi Kedokteran Umum
Fakultas Kedokteran Universitas Jenderal Soedirman

Penulis lahir di Cianjur tanggal 7 Januari 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kedokteran Umum Fakultas Kedokteran, Universitas Jenderal Soedirman. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Biologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Biologi. Penulis mengampu mata kuliah mikrobiologi sejak 2019. Selain mikrobiologi, penulis juga menekuni bidang biologi molekuler terutama genomik.

BIODATA PENULIS



Andi Indrawati, S.Si., M.Kes.

Dosen Program Studi Sarjana Kebidanan
Institut Kesehatan dan Bisnis Kurnia Jaya Persada

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 23 Maret 1973. Menyelesaikan Gelar Sarjana Biologi pada Program Studi Biologi Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin tahun 1997 dan memperoleh gelar Magister pada Program Studi Biomedik Konsentrasi Mikrobiologi Universitas Hasanuddin tahun 2009. Penulis menekuni bidang Biologi dan Mikrobiologi. Sebelumnya, penulis adalah dosen pada Prodi Farmasi Fakultas Farmasi Universitas Indonesia Timur mengampuh matakuliah Biologi Sel, Anatomi dan Fisiologi Tumbuhan, Mikrobiologi Farmasi, dan Mikrobiologi Farmasi Terapan. Selain itu, penulis juga mengampuh matakuliah Mikrobiologi, Bakteriologi, Mikologi, dan Parasitologi pada Prodi D3 Analisis Kesehatan Universitas Indonesia Timur. Saat ini penulis adalah dosen pada Program Studi Sarjana Kebidanan Fakultas Kesehatan Institut Kesehatan dan Bisnis Kurnia Jaya Persada di Kota Palopo. Penulis juga telah menulis dalam beberapa *Book Chapter*: Buku Biologi Lingkungan, Buku Hygiene Sanitasi Makanan dan Minuman, Buku Mikrobiologi Lingkungan, dan Buku Bunga Rampai Jagai Anakta'.

BIODATA PENULIS



Dr. Rina Hidayati Pratiwi

Dosen Universitas Indraprasta PGRI, Jakarta

Penulis merupakan staf pengajar perguruan tinggi di Universitas Indraprasta PGRI, Jakarta, program studi Pendidikan Biologi (S1) dan Pendidikan MIPA (S2). Penulis juga sebagai dosen Luar Biasa di Universitas Terbuka serta trainer Mikrobiologi di perusahaan. Pendidikan S-1 diperoleh penulis dari Jurusan Biologi, Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2003. Di Universitas yang sama, penulis juga menyelesaikan pendidikan masternya (S-2) pada Program Studi Bioteknologi melalui program beasiswa BPPS Dikti. Pendidikan S-3 diselesaikan di Jurusan Biologi, Universitas Indonesia (UI) tahun 2016 menggunakan beasiswa BPPDN Dikti. Keilmuan penulis ialah Mikrobiologi, Pendidikan Mikrobiologi, Microbial Prospecting dan Kemoprospecting. Dari skripsi hingga disertasi, riset yang penulis lakukan di bidang Mikrobiologi. Hingga saat ini pun, penulis juga aktif melakukan penelitian dalam berbagai bidang Mikrobiologi, Bioinformatika dan *drug discovery* dari hibah riset Kementerian, baik KemenristekDikti maupun Kemendikbud-Ristek. Pencarian senyawa bioaktif, baik dari mikroorganisme fage maupun bakteri endofit hingga mendesign obat menjadi fokus dari bidang risetnya. Selain menulis buku, penulis juga aktif menulis di berbagai jurnal ilmiah internasional dan nasional. Saat ini penulis juga aktif sebagai editor dan reviewer di jurnal nasional maupun internasional serta reviewer penelitian Dikti. E-mail penulis: rina.hp2012@gmail.com. Researchgate penulis: <https://www.researchgate.net/search/publication?q=rina%20hidayati%20pratiwi>

BIODATA PENULIS



Dr. Drs. I Wayan Suanda, S.P., M.Si

Putra kelahiran tanggal 31 Desember 1965 di Kelurahan Pedungan, Kecamatan Denpasar Selatan Kota Denpasar-Bali (80222). Jenjang pendidikan dasar dan menengah sampai perguruan tinggi ditempuh di Bali yaitu: SD (1972-1978); SMP (1978-1981); SMPP 32 Denpasar (SMA Negeri 5 Denpasar) tahun 1981- 1984. Pendidikan Tinggi S1 Pendidikan Biologi (1985-1990); S1 Pertanian, Jurusan Hama dan Penyakit Tumbuhan (1989-1993); Program Pascasarjana S2 Jurusan Bioteknologi Pertanian Universitas Udayana, Bali (1999-2002) dan Program Doktor (S3) tahun 2012-2017 di Program Studi Ilmu Pertanian, Konsentrasi Sumber Daya Hayati (SDH) di Universitas Udayana. Penulis mulai mengajar di SMP, SMA, SMK di Kota Denpasar dari tahun 1986-2012 dan Dosen PNS Kopertis Wil. VIII (sekarang LLDIKTI) Wil. VIII tahun 1991 yang dipekerjakan pertama kali di Universitas Katolik Widya Mandira Kupang dan akhirnya tahun 1993 direkomendasi di IKIP PGRI Bali yang sekarang menjadi Universitas PGRI Mahadewa Indonesia, di Denpasar-Bali. Penulis ditempatkan (*homebase*) di Program Studi Pendidikan Biologi dan pernah menduduki jabatan di PT yaitu: Kaprodi Pendidikan Biologi (1995-1999); PD III FPMIPA (1999-2003); Kaprodi Pendidikan Biologi (2003-2011); Dekan FPMIPA (2011-2015) dan sebagai Ketua Badan Penjamin Mutu (BPM) di tingkat institusi (2015-2020) serta Ketua Tim PAK Pengusulan Jabatan Fungsional (2022 sampai sekarang) dan

beberapa jabatan organisasi di luar kampus. Modul/Diktat mengajar serta beberapa produk Pupuk Organik, Pestisida Organik dan pengelolaan sumber daya hayati (SDH) termasuk produk Hasil Fermentasi, serta menjadi Asesor Nasional BKD pada bidang Bioteknologi Pertanian dan Perkebunan (NIRA. 991110820020524117232).

BIODATA PENULIS



Firdaus Fahdi, M.Pd

Dosen Program Studi Sarjana Farmasi
Fakultas Farmasi
Institut Kesehatan Deli Husada Deli Tua

Penulils merupakan putri daerah kelahiran Banda Aceh, 26 Agustus 1989. Saat ini penulis merupakan dosen pada Program Studi Sarjana Farmasi, Fakultas Farmasi, Institut Kesehatan Deli Husada Deli Tua. penulis menempuh Pendidikan di Universitas Negeri Medan pada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam lulus di tahun 2011. Kemudian penulis melanjutkan ke jenjang Magister di Universitas Negeri Medan pada Program Studi Pendidikan Biologi. Penulis mulai aktif menulis buku tahun 2022, buku pertama yang ditulis berjudul “Biomedik Dasar” merupakan Book Chapter yang ditulis bersama beberapa penulis lainnya. Kemudian buku kedua yang ditulis juga merupakan book chapter berjudul “Rempah dan Herbal di Pekarangan.”

E-mail : daus2966@gmail.com

BIODATA PENULIS



Dina Aribah, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi DIII Analis Kesehatan
AAK Delima Husada Gresik

Penulis lahir di Gresik tanggal 02 November 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi DIII Analis Kesehatan AAK Delima Husada Gresik. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang dan melanjutkan S2 pada Jurusan Mikrobiologi IPB University.

BIODATA PENULIS



Stormy Vertygo, S.Si, M. Sc

Dosen Program Studi Teknologi Pakan Ternak
Jurusan Peternakan Politeknik Pertanian Negeri Kupang

Anak kedua dari pasangan Drs. Godlief Vertygo, MA dan Emmie Thong ini, lahir di Kupang, Nusa Tenggara Timur pada tanggal 21 Juni 1988. Pendidikan sarjananya ditempuh di Jurusan Biologi, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana Kupang. Pada tahun 2013, ia melanjutkan studi magisternya di *Illinois Institute of Technology*, Chicago, Amerika Serikat dengan konsentrasi di bidang Mikrobiologi.

Pengalaman bekerja beliau termasuk pernah menjadi guru Biologi di Nusa Cendana International Plus School (NCIPS) Kupang, dan menjadi staf pengajar di beberapa institusi di kota Kupang di antaranya di Universitas Nusa Cendana, Universitas Kristen Artha Wacana dan Universitas San Pedro. Beberapa karya bukunya yang telah diterbitkan di antaranya: Biologi Dasar (Untuk Produksi Ternak), Biologi Dasar (Untuk Teknologi Pakan Ternak), Teori Genetika, Teori Biologi Sel, Biokimia: Teori dan Aplikasi, Anatomi dan Fisiologi Tumbuhan, Ilmu Tanah dan Nutrisi Tanaman, *The Live Science*, Aplikasi Mikrobiologi dalam Peternakan, Bakteriologi I, dan Mikrobiologi.

Saat ini beliau telah menjadi staf pengajar tetap di Program Studi Teknologi Pakan Ternak, Jurusan Peternakan, Politeknik Pertanian Negeri Kupang. Fokus mata kuliah yang diajarkan adalah Biologi Dasar dan mata kuliah lainnya yang berbasis Mikrobiologi.

Selama pandemi COVID-19, beliau pernah diperbantukan sebagai salah satu staf laboran di Laboratorium Biomolekuler Kesehatan Masyarakat Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) yang menangani analisis qPCR sampel COVID-19 dengan metode *pooled-test*, yang diberikan kepada masyarakat secara gratis.

BIODATA PENULIS

Lismayana Hansur

Dosen Program Studi Pend Dokter
Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan Universitas
Muhammadiyah makassar

Penulis lahir di Katonantana, 27 juli 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Fakultas kedokteran dan Kesehatan (FKIK) Universitas Muhammadiyah makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi pada fakultas Biologi Universitas Negeri makassar dan melanjutkan S2 pada Jurusan Mikrobiologi, Institute Pertanian Bogor. Penulis juga sedang melanjutkan jenjang doktoral pada Jurusan Ilmu Biomedik Fakultas kedokteran Universitas Indonesia. Penulis menekuni bidang yang berkaitan dengan Ilmu Biomedik dan tertarik pada penyakit yang berhubungan dengan patogen.

BIODATA PENULIS



Dr. Rury Eryna Putri, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Magister Ilmu Forensik
Sekolah Pascasarjana Universitas Airlangga

Penulis lahir di Kediri hampir tiga puluh tahun yang lalu. Penulis adalah dosen pada Dosen Program Studi Magister Ilmu Forensik, Sekolah Pascasarjana Universitas Airlangga. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Departmen Biologi dan melanjutkan S2 dan S3 pada Program Studi Mikrobiologi di IPB University. Penulis saat ini sedang fokus menjadi pengajar untuk mahasiswa forensik UNAIR dan meneliti terkait penyakit tanaman dan interaksi mikrob-tanaman.