

BAKTERIOLOGI

PENULIS :

**DEWI CHUSNIASIH, ANIK KUSMIATUN, MUHAMMAD SUBHAN A. SIBADU,
NUR LAILI DWI HIDAYATI, HENDRI SATRIA KAMAL UYUN**



BAKTERIOLOGI

**Dewi Chusniasih
Anik Kusmiatun
Muhammad Subhan A. Sibadu
Nur Laili Dwi Hidayati
Hendri Satria Kamal Uyun**



GET PRESS INDONESIA

BAKTERIOLOGI

Penulis :

Dewi Chusniasih
Anik Kusmiatun
Muhammad Subhan A. Sibadu
Nur Laili Dwi Hidayati
Hendri Satria Kamal Uyun

ISBN : 978-623-125-378-1

Editor : Dr. Oktavianis, M.Biomed.

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, September 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 Bakteriologi ini.

Buku Ini Membahas Ruang Lingkup Bakteriologi, Peranan Bakteriologi, Sejarah Perkembangan Mikrobiologi, Mikroskop Dan Penggunaannya, Metabolisme Bakteri.

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, Agustus 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
BAB 1 RUANG LINGKUP BAKTERIOLOGI	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Sel Bakteri	1
1.3 Lingkungan Hidup Bakteri	3
1.4 Interaksi Bakteri dan Manusia.....	5
1.5 Kebutuhan Nutrisi Sel Bakteri.....	7
1.6 Kelompok Bakteri Secara Umum	8
DAFTAR PUSTAKA.....	11
BAB 2 PERANAN BAKTERIOLOGI.....	13
2.1 Pendahuluan.....	13
2.2 Peranan Bakteriologi di Bidang Farmasi	13
2.3 Peranan Bakteriologi di Bidang Kesehatan	16
2.4 Peranan Bakteriologi di Bidang Industri Makanan dan Minuman	18
2.5 Peranan Bakteriologi di Bidang Lingkungan	21
2.6 Peranan Bakteriologi di Bidang Pertanian.....	22
2.7 Peranan Bakteriologi dalam Pembuatan Biofuel	24
DAFTAR PUSTAKA.....	28
BAB 3 SEJARAH PERKEMBANGAN MIKROBIOLOGI	31
3.1 Klasifikasi Mikroorganisme	31
3.1.1 Klasifikasi Bakteri	31
3.1.2 Klasifikasi Fungi	31
3.1.3 Klasifikasi Protista	32
3.1.4 Klasifikasi Virus	32
3.2 Morfologi Mikroorganisme	33
3.2.1 Bakteri	33
3.2.2 Alga	35
3.2.3 Fungi	36
3.2.4 Virus	36
3.3 Anatomi Mikroorganisme.....	37
3.4 Sejarah Perkembangan Mikroorganisme: Era Perintisan	39

3.4.1 Penemuan Mikroba	39
3.4.2 Penemuan Animalculus	40
3.4.3 Teori Abiogenesis	40
3.4.4 Persengketaan Teori Abiogenesis	41
3.4.5 Pembuktian Ketidakbenaran Abiogenesis	41
3.4.6 Teori Biogenesis	42
3.4.7 Teori Tentang Fermentasi	45
3.4.8 Teori Terjadinya Infeksi atau Penyakit	46
3.4.9 Mikroba Penyebab Penyakit	48
3.5 Periode keemasan (1850-1910)	48
3.5.1 Piaraan Murni	48
3.5.2 Postulat Koch (1882)	49
3.6 Ilmuwan-ilmuwan dalam perkembangan mikrobiologi	50
DAFTAR PUSTAKA	52
BAB 4 MIKROSKOP DAN PENGGUNAANNYA	55
4.1 Pendahuluan	55
4.2 Sejarah	55
4.3 Bagian Mikroskop	56
4.3.1 Lensa Okuler	57
4.3.2 Lensa Objektif	57
4.3.3 Kondensor	58
4.3.4 Diafragma	58
4.3.5 Cermin	58
4.3.6 Revolver	59
4.3.7 Tabung Mikroskop	59
4.3.8 Lengan Mikroskop	59
4.3.9 Meja Preparat	59
4.3.10 Makrometer (Pengatur Kasar) dan Mikrometer (Pengatur Halus)	59
4.3.11 Kaki Mikroskop	60
4.4 Macam-Macam Mikroskop	60
4.4.1 Mikroskop Cahaya (Bidlack dan Jansky, 2011)	60
4.4.2 Mikroskop Elektron (Radhina et al, 2021)	66
4.5 Penggunaan Mikroskop	67
DAFTAR PUSTAKA	71

BAB 5 METABOLISME BAKTERI	73
5.1 Pendahuluan.....	73
5.2 Glikolisis	74
5.2.1 Jalur Embden-Meyerhof (EMP).....	74
5.2.2 Jalur pentosa fosfat (PP).....	76
5.2.3 Derkaboksilasi Oksidasi asam piruvat.....	78
5.2.4 Siklus Krebs.....	79
5.3 Fermentasi.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	85
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Beberapa morfologi sel bakteri	2
Gambar 1.2. Komunitas bakteri pada habitatnya.....	4
Gambar 1.3. Interaksi mutualisme antara bakteri bioluminesens dengan ikan <i>Photoblepharon palpebratus</i>	5
Gambar 1.4. Beberapa produk makanan hasil fermentasi.....	6
Gambar 1.5. Sel bakteri mensintesis dan menyimpan PHA, material plastik yang mudah didegradasi.	7
Gambar 1.6. Komposisi unsur esensial sel bakteri	8
Gambar 1.7. Penyakit Lyme yang disebabkan karena infeksi <i>Borrelia burgdorferi</i> yang ditransmisikan melalui serangga <i>Ixodes</i>	9
Gambar 2.1. <i>Timeline</i> perkembangan antibiotik	14
Gambar 2.2. Pengelompokan antibiotik sebagian besar berasal dari produk antibiotik alami yang dihasilkan oleh Actinomycetes	15
Gambar 2.3. Siklus hidup <i>Streptomyces</i> yang menghasilkan antibiotik.....	16
Gambar 2.4. Komponen BWCBs sebagai alat diagnostik penyakit	18
Gambar 2.5. Penggunaan metode GMEs untuk remediasi lingkungan.....	22
Gambar 2.6. Interaksi multidimensi antara tanaman dan PGPM, antara tanaman dan patogen, dan antara PGPM dan patogen	23
Gambar 2.7. Rute dekarbonisasi	25
Gambar 2.8. Kalsifikasi biofuel	26
Gambar 3.1. Bentuk-bentuk bakteri.....	34
Gambar 3.2. Struktur Sel Prokariotik	38
Gambar 3.3. Struktur Sel Eukariotik	39
Gambar 3.4. Botol Pasteur Berleher Ansa tetap Steril karena Lengkung pada Leher	44

Gambar 3.5. Air Kaldu tetap Steril dalam Ruangan Inkubasi Tyndall yang Bebas Debu	45
Gambar 3.6. Ilustrasi Langkah-langkah Postulat Koch	49
Gambar 4.1. Bagian-bagian Mikroskop	56
Gambar 4.2. Lensa Okuler Mikroskop	57
Gambar 4.3. Lensa Objektif Mikroskop	58
Gambar 4.4. Diafragma Mikroskop	58
Gambar 4.5. Mikroskop Majemuk	62
Gambar 4.6. Mikroskop Stereo	63
Gambar 4.7. Mikroskop Fluorescence	64
Gambar 4.8. Mikroskop Stereo	65
Gambar 4.9. Mikroskop Inverted	66
Gambar 4.10. Mikroskop Elektron; TEM (kiri) dan SEM (Kanan)	67
Gambar 5.1. Jalur Entner-Doudoroff	76
Gambar 5.2. Jalur Pentafosfat	77
Gambar 5.3. Reaksi Tahap 1 pada Siklus Krebs	79
Gambar 5.4. Reaksi Tahap 2 pada Siklus Krebs	80
Gambar 5.5. Reaksi Tahap 3 pada Siklus Krebs	80
Gambar 5.6. Reaksi Tahap 4 pada Siklus Krebs	81
Gambar 5.7. Reaksi Tahap 5 pada Siklus Krebs	81
Gambar 5.8. Reaksi Tahap 6 pada Siklus Krebs	81
Gambar 5.9. Reaksi Tahap 7 pada Siklus Krebs	82
Gambar 5.10. Reaksi Tahap 8 pada Siklus Krebs	82
Gambar 5.11. Siklus Krebs Secara lengka	83

BAB 1

RUANG LINGKUP BAKTERIOLOGI

1.1 Pendahuluan

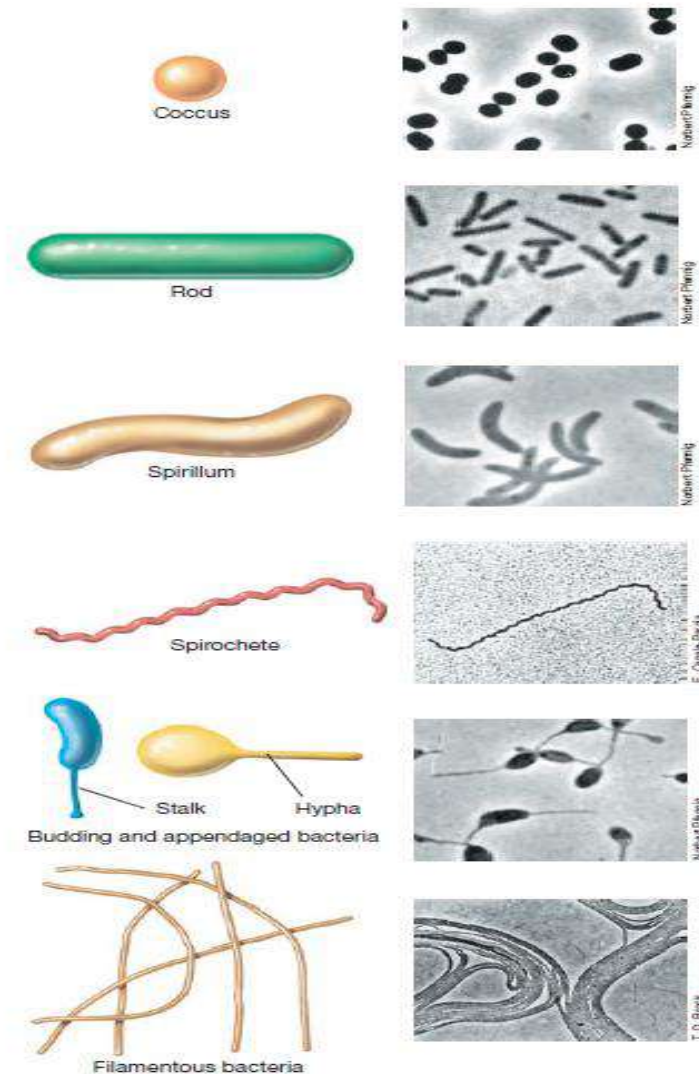
Bakteriologi merupakan suatu cabang ilmu mikrobiologi yang membahas mengenai bakteri. Pembahasan bakteriologi mencakup struktur dan morfologi sel bakteri, nutrisi dan pertumbuhan bakteri, metabolisme, klasifikasi, reproduksi, hingga genetika bakteri. Bakteri tergolong sebagai organisme prokariotik. Namun demikian, sel bakteri dilindungi oleh struktur dinding sel yang dibentuk dari susunan peptidoglikan. Selain mempelajari mengenai seluk beluk sel bakteri, bahasan bakteriologi juga membahas mengenai manfaat bakteri pada kehidupan manusia, seperti pada aspek kesehatan, produk makanan, lingkungan, hingga industri.

Kebanyakan organisme prokariotik hidup dalam bentuk uniseluler, meskipun terdapat beberapa spesies yang saling melekat satu sama lain setelah pembelahan sel. Sel prokariotik umumnya memiliki diameter sekitar 0.5-5 μm , lebih kecil daripada ukuran eukariotik. Namun, meskipun uniseluler, sel prokariotik didesain untuk tetap dapat melakukan aktivitas metabolisme sel dalam satu sel tunggal.

1.2 Sel Bakteri

Bakteri merupakan organisme prokariotik uniseluler, sehingga dalam pengamatan sel bakteri, identifikasi didasarkan pada bentuk dan ukuran sel. Pada bidang mikrobiologi, morfologi sel berarti bentuk sel. Beberapa contoh morfologi sel bakteri ditunjukkan pada Gambar 1.2. Beberapa kelompok bakteri diidentifikasi dapat membentuk morfologi yang berbeda pada sel individu. Sebagai contoh, spirochetes yang memiliki bentuk melingkar erat, memiliki perluasan selnya seperti tabung atau tangkai panjang. Atau bakteri filamentous yang memiliki bentuk sel panjang, tipis, atau berantai. Pada bagian luar, sel bakteri dilindungi

oleh struktur membran sitoplasma. Secara umum, membran sitoplasma terdiri atas dua lapis fosfolipid (fosfolipid bilayer). Fosfolipid terdiri atas komponen hidrofobik (asam lemak) dan hidrofilik (gliserol-fosfat).



Gambar 1.1. Beberapa morfologi sel bakteri
(Sumber : Madigan, 2015)

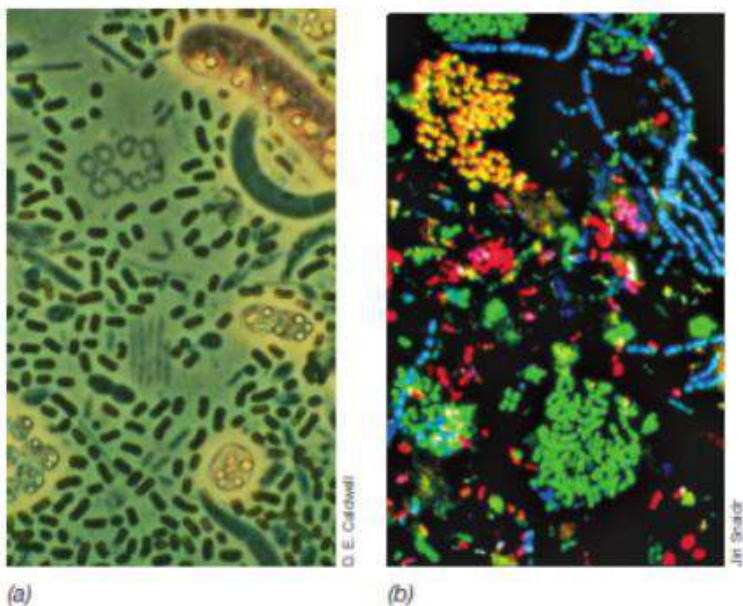
Secara struktural, bakteri dibedakan menjadi kelompok bakteri gram positif dan bakteri gram negatif. Pengelompokan ini didasarkan pada reaksi warna yang muncul setelah dilakukan pewarnaan gram. Dinding sel bakteri gram negatif terdiri atas dua lapis, dan bakteri gram positif memiliki dinding sel yang jauh lebih tebal dan terdiri dari satu jenis molekul.

Sel bakteri sebagaimana sel prokariotik, memiliki struktur internal dan susunan DNA yang lebih sederhana dibandingkan sel eukariotik. Sel bakteri memiliki kromosom yang berbentuk melingkar (sirkuler). Karena tidak memiliki nukleus, kromosom bakteri terdapat pada bagian sitoplasma yang tidak tertutup oleh membran, disebut sebagai nukleoid.

Sel bakteri dapat bereproduksi dengan cepat secara pembelahan biner. Satu sel bakteri dapat membelah menghasilkan 2 sel, dan membelah lagi menghasilkan 4, 8, 16, dan seterusnya. Dalam kondisi optimal, sel bakteri dapat membelah setiap 1-3 jam, dan menghasilkan satu generasi baru dalam waktu 20 menit. Dengan kemampuan ini, sel bakteri dan sel prokariotik lainnya dapat mengkolonisasi bumi dalam waktu dua hari. Namun, faktanya, sel bakteri yang melimpah dapat menghasilkan metabolit yang dapat meracuni sel bakteri lainnya, atau terbatasnya ketersediaan nutrisi, sehingga populasi bakteri tidak akan melampaui batas.

1.3 Lingkungan Hidup Bakteri

Pada lingkungan alaminya, sel bakteri dapat berinteraksi dan berasosiasi dengan sel lainnya. Lingkungan tempat hidup populasi bakteri disebut sebagai habitat. Populasi sel bakteri akan berinteraksi dengan populasi sel lainnya pada suatu komunitas mikroba (Gambar 1.2).

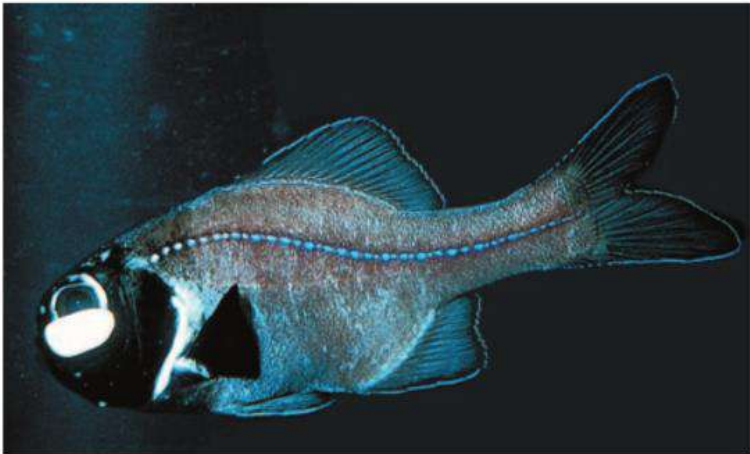


Gambar 1.2. Komunitas bakteri pada habitatnya. (a) Komunitas bakteri pada danau di Michigan, terlihat bakteri fototropik hijau dan ungu (b) komunitas bakteri pada sampel lumpur limbah.
(Sumber : Madigan, 2015)

Bakteri dapat ditemukan dimana saja, termasuk pada tanah, air, tumbuhan, hewan, hingga manusia. Bakteri juga dapat bertahan hidup pada lingkungan ekstrim. Jenis prokariotik, termasuk bakteri, dapat ditemukan pada lingkungan dengan salinitas yang tinggi. Bakteri memiliki kemampuan beradaptasi cukup baik pada lingkungan dengan konsentrasi garam yang tinggi, dan pada lingkungan dengan tekanan osmotik yang tinggi (Dworkin *et al.*, 2006).

Ekosistem dapat dipengaruhi oleh aktivitas mikroba, termasuk bakteri. Bakteri dapat melakukan metabolisme dengan menyerap nutrisi dari ekosistem dan menggunakannya untuk membentuk sel yang baru. Di saat yang sama, bakteri akan mengekskresikan produk buangan ke lingkungan ekosistemnya. Aktivitas metabolisme bakteri dapat berpengaruh pada ekosistem disekitarnya, baik secara fisik maupun kimiawi. Sebagai contoh, Oksigen merupakan nutrisi yang vital bagi beberapa organisme, dan

merupakan senyawa yang cukup beracun bagi organisme lainnya. Jika bakteri aerobik menggunakan oksigen pada suatu habitat dan menjadikan habitat tersebut anoksik, hal ini dapat membuat mikroorganisme anaerobik dapat tumbuh pada habitat tersebut. Bakteri, seperti sel prokariotik lainnya, dapat membentuk hubungan simbiosis dengan organisme lain yang berukuran lebih besar. Secara umum, organisme yang berukuran lebih besar disebut sebagai host/inang, dan organisme yang berukuran lebih kecil disebut sebagai simbion. Interaksi antara sel bakteri dengan inangnya yang menghasilkan keuntungan bagi kedua pihak disebut sebagai simbiosis mutualisme.



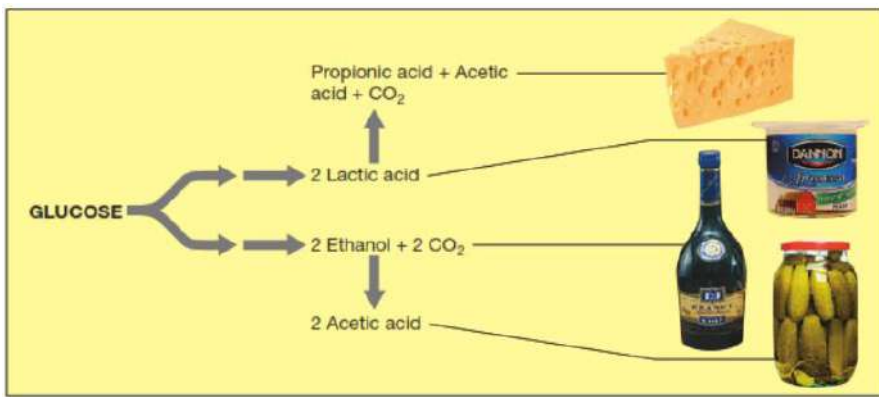
Gambar 1.3. Interaksi mutualisme antara bakteri bioluminesens dengan ikan *Photoblepharon palpebratus*. Ikan menggunakan cahaya yang dihasilkan bakteri untuk menarik perhatian mangsa dan lawan jenis, sedangkan bakteri mendapat nutrisi dari tubuh ikan

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

1.4 Interaksi Bakteri dan Manusia

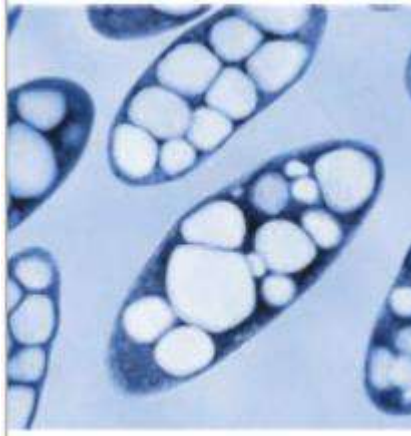
Bakteri memegang peranan penting dalam industri beberapa aspek yang bermanfaat bagi manusia, salah satunya adalah industri makanan. Makanan segar seperti daging, buah, dan sayur sayuran merupakan jenis makanan yang sangat rentan terkontaminasi oleh

mikroba termasuk bakteri, dan perlu dijaga kualitasnya sehingga tidak membahayakan konsumennya. Tidak semua bakteri berperan sebagai mikroba perusak pangan, beberapa jenis bakteri lainnya menjadi kunci dalam produksi bahan pangan, seperti produk fermentasi. Sebagai contoh, banyak produk olahan susu yang memanfaatkan aktivitas metabolisme mikroba untuk memproduksi produknya, seperti keju dan yoghurt (Madigan, 2015).



Gambar 1.4. Beberapa produk makanan hasil fermentasi
(Sumber : Madigan, 2015)

Pada aspek lingkungan, bakteri dapat digunakan sebagai agen pembersih polutan dan zat toksik pada lingkungan, melalui proses bioremediasi. Melalui proses bioremediasi, bakteri dapat membersihkan polutan seperti minyak, pelarut organik, pestisida, dan polutan toksik lainnya. Proses bioremediasi dapat mempercepat proses pembersihan polutan dengan menambahkan isolat bakteri agen bioremediasi, atau menambahkan nutrisi yang dapat menstimulasi pertumbuhan bakteri indigenous untuk mendegradasi polutan. Salah satu polutan yang berdampak serius saat ini adalah plastik. Plastik digunakan untuk hampir semua industri, dari pembungkus makanan hingga bahan mainan. Bahan plastik membutuhkan waktu yang sangat lama untuk dapat didegradasi secara sempurna di alam. Beberapa jenis bakteri dapat mensintesis polihidroksialkanoat (PHA), yang digunakan sebagai sumber energi bakteri. PHA ini dapat diproduksi, diekstraksi, dan digunakan sebagai bahan plastik yang lebih mudah didegradasi.



Gambar 1.5. Sel bakteri mensintesis dan menyimpan PHA, material plastik yang mudah didegradasi.
(Sumber : (Campbell *et al.*, 2020))

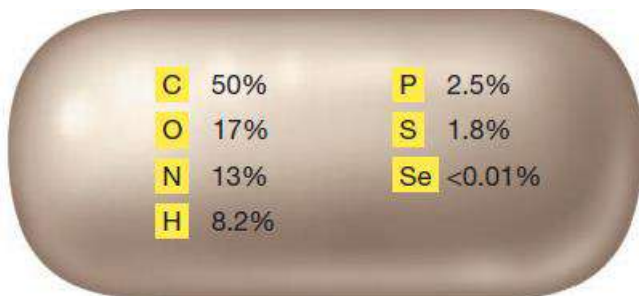
Pada aspek kesehatan, bakteri juga digunakan sebagai sumber produksi produk obat-obatan dan enzim. Beberapa jenis bakteri diketahui berpotensi dalam produksi bahan metabolit yang memiliki aktivitas antibiotik maupun aktivitas metabolisme lainnya yang berpotensi digunakan sebagai bahan obat.

1.5 Kebutuhan Nutrisi Sel Bakteri

Semua nutrisi mikroba adalah senyawa yang dibangun dari unsur kimia. Namun, hanya beberapa unsur kimia saja yang esensial dan mendominasi tubuh organisme hidup, yaitu hidrogen (H), oksigen (O), karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), sulfur (S), dan selenium (Se). Selain unsur-unsur tersebut, setidaknya ada 50 unsur yang dimetabolisme dengan berbagai cara oleh sel bakteri (Madigan, 2015).

Air menyusun 70-80% dari total berat basah sel. Selain air, sel bakteri juga disusun oleh makromolekul seperti protein, asam nukleat, lipid, dan polisakarida. Masing-masing makromolekul tersusun atas monomernya. Protein mendominasi komposisi makromolekul dari sel mikroba, mencapai 55% dari total berat kering sel. Gambar 1.6 menunjukkan komponen kimiawi dari sel

Escherichia coli. Pada kebanyakan jenis mikroba khususnya bakteri, unsur karbon dan nitrogen menjadi makronutrien yang penting.



Gambar 1.6. Komposisi unsur esensial sel bakteri
(Sumber : Madigan, 2015))

Sebanyak 13% dari total sel bakteri tersusun atas nitrogen, yang terdapat dalam bentuk protein, asam nukleat, dan makromolekul sel lainnya. Nitrogen di alam paling banyak terdapat dalam bentuk amonia (NH_3), nitrat (NO_3^-), atau gas nitrogen (N_2). Pada dasarnya, semua prokariot dapat menggunakan NH_3 sebagai sumber nitrogen, namun beberapa prokariot juga dapat menggunakan NO_3^- . Namun, N_2 hanya dapat dimanfaatkan oleh prokariotik pemfiksasi nitrogen.

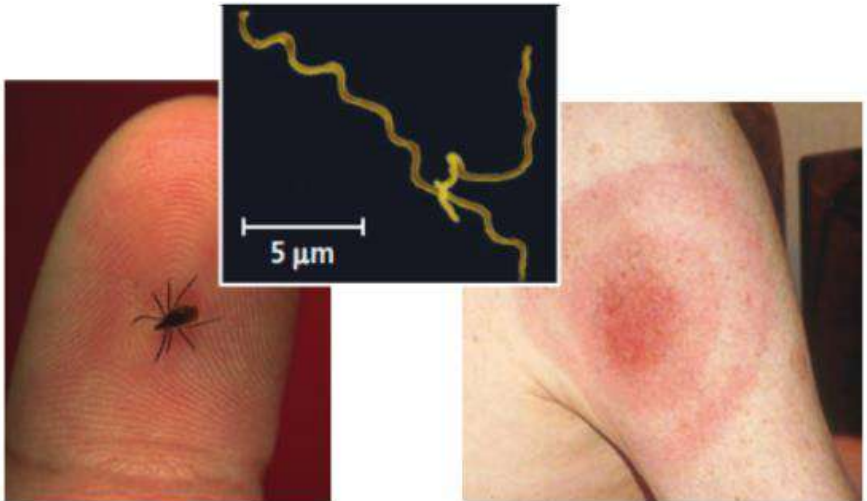
1.6 Kelompok Bakteri Secara Umum

Jenis bakteri gram negatif dikelompokkan ke dalam kelompok Proteobacteria. Bakteri fotoautotrof, kemoautotrof, dan heterotrof masuk kedalam kelompok ini. Beberapa proteobacteria bersifat anaerob, dan ada juga yang aerobik. Sistematika molekuler mengelompokkan kelompok Proteobacteria menjadi 5 sub kelompok, yaitu Alpha Proteobacteria, Beta Proteobacteria, Gamma Proteobacteria, Delta Proteobacteria, dan Epsilon Proteobacteria (Campbell *et al.*, 2020).

Kelompok bakteri Gram positif menjadi kelompok yang berlawanan dengan Proteobacteria. Kelompok bakteri Gram positif termasuk spesies soliter *Bacillus anthracis* yang mengakibatkan penyakit antraks, dan *Clostridium botulinum* yang menyebabkan botulisme.

Saat ini, semua prokariotik yang menyebabkan penyakit merupakan kelompok bakteri. Hampir setengah dari total penyakit manusia disebabkan karena bakteri. Sebagai contoh, sekitar 1 juta manusia meninggal karena infeksi *Mycobacterium tuberculosis* penyebab penyakit paru-paru tuberculosis. Beberapa bakteri patogen ditularkan melalui spesies lain, seperti serangga.

Bakteri patogen umumnya menyebabkan gejala sakit karena adanya toksin yang dihasilkan. Toksin bakteri patogen dapat dikelompokkan sebagai eksotoksin dan endotoksin. Eksotoksin merupakan protein yang disekresikan oleh bakteri. Penyakit kolera, salah satu penyakit diare berbahaya, disebabkan karena eksotoksin dari *Vibrio cholerae*.



Gambar 1.7. Penyakit Lyme yang disebabkan karena infeksi *Borrelia burgdorferi* yang ditransmisikan melalui serangga *Ixodes*.
(Sumber : (Campbell *et al.*, 2020))

Selain kolera, penyakit botulisme yang cukup fatal disebabkan karena toksin botulinum, yaitu jenis eksotoksin yang disekresikan oleh bakteri Gram positif *Clostridium botulinum*. Bakteri ini umumnya ditemukan pada produk makanan, seperti makanan kaleng. Toksin botulinum dapat menyebabkan penyakit meskipun sel bakterinya sudah mati saat dimakan.

Berbeda dengan eksotoksin, endotoksin merupakan kelompok lipopolisakarida dari membran luar bakteri Gram negatif. Endotoksin hanya dilepas ke luar sel ketika sel bakteri telah mati dan dinding selnya rusak. Bakteri yang memproduksi endotoksin salah satunya adalah *Salmonella typhi* penyebab demam tifoid.

Saat ini, sudah banyak teknologi farmasi yang diaplikasikan untuk menurunkan angka infeksi bakteri patogen, salah satunya adalah antibiotik. Namun, pertumbuhan bakteri yang sangat cepat memungkinkan bakteri menghasilkan gen resisten dan membuat sel resisten terhadap antibiotik.

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, N. A. *et al.* (2020) *Biology*. Pearson.
- Dworkin, M. *et al.* (2006) *The Prokaryotes Third Edition*, Springer.
doi: 10.1007/978-3-642-30123-0_54.
- Madigan, et al (2015) *Micro-organisms*, Pearson. doi:
10.1017/cbo9780511549984.016.

BAB 2

PERANAN BAKTERIOLOGI

2.1 Pendahuluan

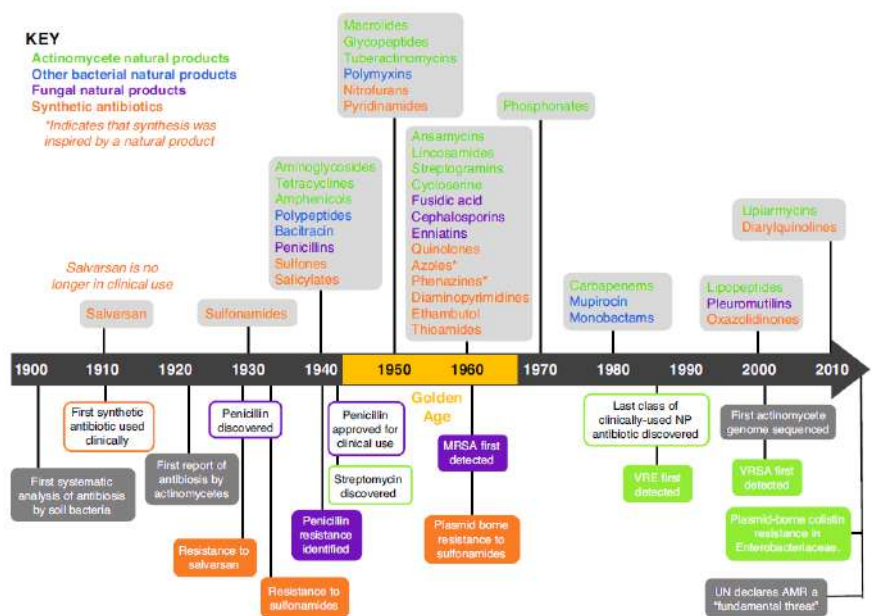
Bakteriologi merupakan salah satu cabang biologi yang berperan penting dalam perkembangan ilmu dasar maupun terapan. Bakteriologi menjadi salah satu bidang yang paling signifikan dalam biologi, sehingga memungkinkan untuk menentukan bagaimana bakteri dapat menyebabkan penyakit, menemukan pengobatan untuk penyakit tersebut dan bahkan menggunakan beberapa bakteri untuk aplikasi di bidang kesehatan, industri, pertanian, dan lingkungan. Mayoritas unsur-unsur alam di bumi mengandung bakteri. Semua makhluk hidup, termasuk manusia, tumbuhan, dan hewan, terhubung erat dengan bakteri yang secara konsisten mendaur ulang nutrisi penting seperti karbon dan nitrogen, memecah bahan organik, dan mempengaruhi kehidupan kita sehari-hari. Bakteriologi juga digunakan dalam banyak aspek kehidupan sehari-hari, termasuk produksi antibiotik untuk obat-obatan, rekayasa genetika, produksi biofuel, bioremediasi, dan pembuatan atau pengolahan makanan dan minuman dengan penerapan bioteknologi.

2.2 Peranan Bakteriologi di Bidang Farmasi

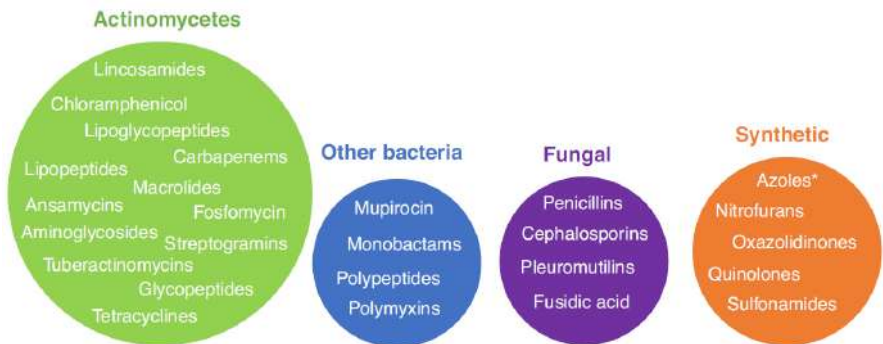
Salah satu kontribusi bakteriologi yang paling signifikan terhadap industri farmasi adalah penemuan antibiotik. Mikroorganisme menghasilkan antibiotik sebagai produk sampingan metabolisme. Antibiotik adalah senyawa yang dibuat oleh mikroba untuk menghancurkan mikroba yang lain dan berperan dalam mengidentifikasi actinomycetes sebagai produsen senyawa antimikroba yang produktif (Waksman *et al.*, 2010). Penemuan awal Waksman mengidentifikasi genus *Streptomyces* sebagai produsen antibiotik alami atau metabolit sekunder, yang merupakan senyawa yang tidak diperlukan untuk pertumbuhan, perkembangan, atau reproduksi normal organisme di laboratorium.

Banyak antibiotik alami yang diproduksi oleh *Streptomyces* bersifat aktif terhadap bakteri, jamur, virus, nematoda dan serangga dan mereka juga telah dikembangkan sebagai anti-kanker dan obat immunosupresan (Newman & Cragg, 2016). Selain *Streptomyces*, bakteri tanah yang banyak menghasilkan senyawa antibiotik berasal dari genus *Bacillus* (Traxler & Kolter, 2015).

Antibiotik pertama, salvarsan, digunakan pada tahun 1910. Lebih dari 100 tahun antibiotik telah berubah drastis menjadi obat modern. Penemuan penisilin pada tahun 1928 menjadi awal mula masa emas penemuan antibiotik produk alami dan puncaknya di pertengahan tahun 1950-an (Gambar 2.1). Sejak itu, penurunan bertahap dalam penemuan antibiotik dan pengembangan turunannya, serta terjadi evolusi resistensi antibiotik.



Gambar 2.1. Timeline perkembangan antibiotik
(Sumber : Hutching *et al.*, 2019)

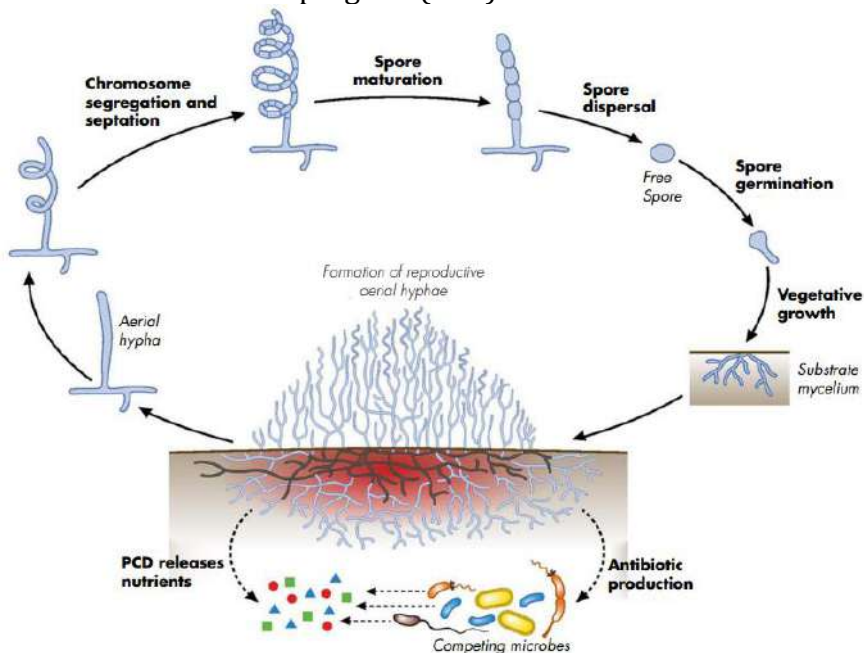


Gambar 2.2. Pengelompokan antibiotik sebagian besar berasal dari produk antibiotik alami yang dihasilkan oleh Actinomycetes
(Sumber : Hutching *et al.*, 2019)

Actinobacteria atau Actinomycetes membentuk filum kosmopolitan yang meliputi bakteri berbentuk batang dan berserabut yang menghasilkan sebagian besar antibiotik (Gambar 2.2). Actinobacteria tumbuh subur di tanah lingkungan serta ekosistem laut dan air tawar (Van der Meij *et al.*, 2017). Actinobacteria dikenal sebagai produser dari metabolit sekunder, termasuk dua pertiga dari semua antibiotik yang dikenal serta banyak antikanker, antijamur dan agen immunosupresif (Barka *et al.*, 2016). Karakter terbaik genus Actinomycetaceae adalah *Streptomyces*, genus yang sangat beragam dengan sekitar 600 spesies, dan bertanggung jawab atas produksi setengah dari semua antibiotik yang dikenal saat ini (Labeda *et al.*, 2012).

Siklus hidup *Streptomyces* dimulai dengan perkecambahan spora dengan menumbuhkan satu atau dua tabung germinal yang selanjutnya berkembang ke dalam hifa (Gambar 2.3). Hifa tumbuh dengan percabangan dan ekstensi ujung, sehingga membentuk jaringan hifa yang bersama-sama membentuk miselium vegetatif. Respon terhadap tekanan kondisi lingkungan seperti penipisan nutrisi, proporsi miselium dikorbankan, setelah degradasi autolitik melalui kematian sel terprogram atau dikenal dengan istilah *programmed cell death* (PCD). Hal ini mengakibatkan pelepasan nutrisi di lingkungan yang akan digunakan untuk pembentukan hifa udara dan spora. Timbulnya diferensiasi sel bertepatan dengan

produksi antibiotik, yang memberikan perlindungan terhadap mikroorganisme pesaing yang tertarik oleh nutrisi yang dilepaskan selama kematian sel terprogram (PCD).



Gambar 2.3. Siklus hidup *Streptomyces* yang menghasilkan antibiotik

(Sumber : Van der Meij *et al.*, 2017)

2.3 Peranan Bakteriologi di Bidang Kesehatan

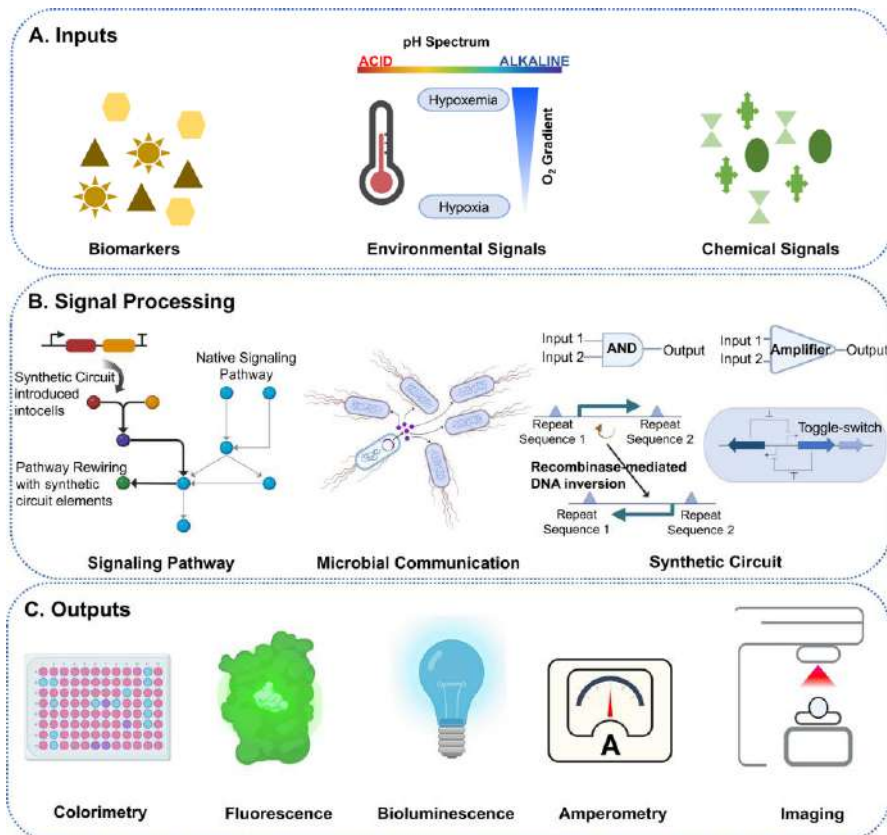
Interaksi bakteri di dalam tubuh manusia ada yang bersifat menguntungkan dan merugikan atau berbahaya bagi kesehatan. Bakteri secara alami berada di tubuh manusia disebut sebagai mikroflora normal. Contoh mikroflora oral yang hidup pada rongga mulut manusia meliputi: spesies actinobacteria, bacteroidetes, klamidia, kloroflexi, euryarchaeota, firmicutes, fusobacteria, proteobacteria, spirochaetes, streptococcus, sinergistetes dan tenericutes (Abbas *et al.*, 2021).

Munculnya mikrobiologi medis sering dikaitkan dengan munculnya teori kuman penyakit menular. Bakteriologi medis abad kesembilan belas telah mensyaratkan janji bahwa mengidentifikasi

bakteri patogen akan menawarkan peluang untuk pengendalian penyakit. pneumonia, tuberkulosis, dan diare merupakan penyakit yang disebabkan oleh bakteri dan banyak menyebabkan kematian. Para ahli mikrobiologi medis yang dapat mengenali, mengisolasi, mendiagnosis, dan mencegah bakteri patogen yang dapat menyebabkan penyakit memainkan peranan penting dalam perkembangan bakteriologi di bidang kesehatan.

Kemajuan terbaru dalam bidang biologi kedokteran dan etiologi penyakit antara lain berkembangnya sensor hidup yang mampu mendeteksi dan mendiagnosis penyakit secara akurat. Keragaman dan kelimpahan bakteri dalam tubuh manusia (yaitu, diperkirakan 10: 1 hingga 1: 1 rasio bakteri / sel manusia) dan genom bakteri yang sederhana dan mudah dimanipulasi, hal memberikan peluang sebagai *biosensing* untuk aplikasi medis. Melalui proses rekayasa genetika, sensor sel bakteri atau disebut dengan *bacterial whole-cell biosensors* (BWCBs) dapat berfungsi sebagai mesin hidup dengan unit penginderaan, pemrosesan, dan komunikasi yang terintegrasi untuk merespons kehadiran analit dan menghasilkan output yang sinyalnya dapat terdeteksi (Tanniche & Behkam, 2023).

Mekanisme BWCBs sebagai biosensor dapat dijelaskan seperti Gambar 2.4. Gambar A: BWCBs menerima input dalam bentuk biomarker, sinyal kimia (termasuk metabolit yang diproduksi inang dan senyawa sintetis), dan sinyal lingkungan (termasuk suhu, pH, dan tingkat oksigen). Gambar B: BWCBs memproses sinyal input menggunakan jalur pensinyalan kabel ulang, sirkuit pensinyalan sel-sel yang direkayasa untuk penginderaan skala populasi, dan sintetis sirkuit penginderaan. Gambar C: Akhirnya, BWCBs menghasilkan output reporter seperti sinyal kolorimetri, *fluorescent*, atau *bioluminescent*, arus, atau pencitraan medis (misalnya, CT scan).



Gambar 2.4. Komponen BWCBS sebagai alat diagnostik penyakit
(Sumber : Tanniche & Behkam, 2023)

2.4 Peranan Bakteriologi di Bidang Industri Makanan dan Minuman

Bakteri dapat menghasilkan produk makanan dan minuman yang berbeda melalui proses fermentasi. Metode fermentasi adalah perubahan biokimia gula sederhana menjadi produk yang menguntungkan seperti alkohol, asam, karbon dioksida melalui berbagai jalur metabolisme. Saat ini, penggunaan bakteri untuk menghasilkan makanan atau meningkatkan kualitas makanan sangat umum, dan ahli bioteknologi berusaha menghasilkan produk makanan khusus dengan bantuan bakteri. Ada banyak aplikasi bakteri dan mikroba lainnya dalam industri yang sangat berdampak

pada peningkatan kualitas dan kuantitas variasi produk makanan dan minuman. Beberapa contoh produk makanan dan minuman yang dihasilkan melalui proses fermentasi dengan bantuan bakteri dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Produk makanan dan minuman hasil fermentasi menggunakan bakteri

No.	Genus/Spesies Bakteri	Produk / Aplikasi
1	<i>Acetobacter aceti</i>	Fermentasi cuka
2	<i>Acetobacter pasteurianus</i>	Fermentasi cuka, fermentasi coklat
3	<i>Bacillus coagulans</i>	Coklat, glukosa isomerase (bahan aditif makanan), kedelai fermentasi
4	<i>Bacillus licheniformis</i>	Protease (bahan aditif makanan)
5	<i>Bacillus subtilis</i>	Kedelai fermentasi, protease, glikolipid, riboflavin-B2 (bahan aditif makanan)
6	<i>Bacillus paranthrasis</i>	Biodegradasi limbah makanan
7	<i>Bacillus siamenis</i>	Biodegradasi limbah makanan
8	<i>Bacillus tequilensis</i>	Biodegradasi limbah makanan
9	<i>Bacillus cereus</i>	Biodegradasi limbah makanan
10	<i>Bacillus velezensis</i>	Biodegradasi limbah makanan
11	<i>Bifidobacterium animalis</i>	Susu fermentasi yang mengandung probiotik
12	<i>Bifidobacterium breve</i>	Susu fermentasi
13	<i>Brachybacterium alimentarium</i>	Keju
14	<i>Brevibacterium flavum</i>	Asam amino, asam malat, asam glutamat, lisin, monosodium glutamat

No.	Genus/Spesies Bakteri	Produk / Aplikasi
		(bahan aditif makanan)
15	<i>Corynebacterium ammoniagenes</i>	Pematangan keju
16	<i>Enterobacter aerogenes</i>	Fermentasi roti
17	<i>Enterococcus durans</i>	Fermentasi keju
18	<i>Enterococcus faecium</i>	Kedelai, susu, daging, sayuran fermentasi
19	<i>Exiguobacterium acetylicum</i>	Biodegradasi limbah makanan
20	<i>Burkholderia contaminans</i>	Biodegradasi limbah makanan
21	<i>Klebsiella pneumonia</i>	Fermentasi tempe, produksi vitamin B12
22	<i>Lactobacillus acetotolerans</i>	Fermentasi cuka
23	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Susu fermentasi, probiotik, sayuran fermentasi
24	<i>Lactobacillus brevis</i>	Fermentasi roti, anggur, susu
25	<i>Lactobacillus buchneri</i>	Fermentasi anggur
26	<i>Lactobacillus casei</i>	Starter fermentasi susu, pematangan keju
27	<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	Yogurt, susu fermentasi, keju mozarella
28	<i>Lactobacillus fermentum</i>	Susu fermentasi, urease (bahan aditif makanan)
29	<i>Lactobacillus ghanensis</i>	Coklat
30	<i>Lactobacillus helveticus</i>	Starter fermentasi susu, pematangan keju, sayuran
31	<i>Lactobacillus hilgardii</i>	Fermentasi anggur
32	<i>Lactobacillus kefir</i>	Susu fermentasi (kefir), pengurang rasa pahit pada jus jeruk
33	<i>Lactobacillus kimchii</i>	Fermentasi kimchi
34	<i>Lactobacillus oeni</i>	Fermentasi anggur
35	<i>Lactobacillus paracasei</i>	Fermentasi keju, probiotik, anggur, daging

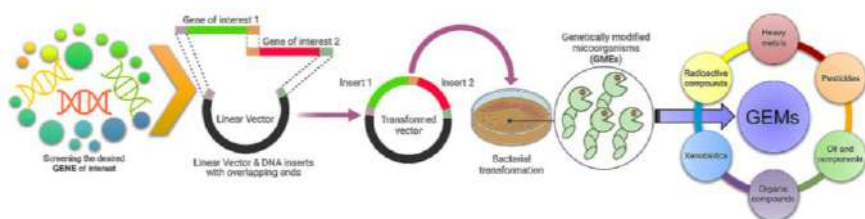
No.	Genus/Spesies Bakteri	Produk / Aplikasi
36	<i>Lactobacillus plantarum</i>	Fermentasi sayuran, minyak zaitun, susu, daging
37	<i>Lactobacillus sakei</i>	Fermentasi keju dan daging, minuman
38	<i>Lactobacillus salivarius</i>	Fermentasi keju
39	<i>Lactobacillus versmoldensis</i>	Sosis
40	<i>Lactococcus lactis</i>	Starter fermentasi susu, nisin
41	<i>Pediococcus acidilactici</i>	Fermentasi daging, starter keju
42	<i>Pediococcus pentosaceus</i>	Fermentasi daging
43	<i>Propionibacterium acidipropionic</i>	Fermentasi daging
44	<i>Propionibacterium freudenreichii</i>	Fermentasi keju, probiotik
45	<i>Streptococcus natalensis</i>	Natamisin (bahan aditif makanan)
46	<i>Weissella genus</i>	Fermentasi coklat, fermentasi sosis, keju, yogurt
47	<i>Zymomonas mobilis</i>	Minuman fermentasi

Sumber: Gholami-Shabani *et al.* (2023)

2.5 Peranan Bakteriologi di Bidang Lingkungan

Pencemaran lingkungan yang tinggi menjadi masalah yang berdampak buruk di bumi. Bioremediasi merupakan salah satu cara untuk menghilangkan polutan dan senyawa berbahaya yang mencemari lingkungan. Teknik rekayasa genetika mikroba atau disebut *genetically engineered microbes* (GEMs) telah dikembangkan dalam penerapan bioremediasi (Gambar 2.5). Penggunaan teknik GEMs menjadi metode alternatif yang lebih aman bagi lingkungan (Hou *et al.*, 2020). GEMs dibuat dengan memperkenalkan protein yang lebih kuat ke dalam bakteri melalui bioteknologi atau rekayasa genetika untuk meningkatkan sifat yang diinginkan. Biodegradasi tumpahan minyak, halobenzoat naftalena, tolueena, trikloroetilena, oktan, xilena, dan beberapa pencemaran lainnya telah diatasi dengan menggunakan GEM seperti bakteri, jamur, dan alga.

Mikroorganisme yang diinduksi secara bioteknologi menjadi lebih kuat daripada yang terjadi secara alami dan dapat menurunkan kontaminan lebih cepat karena mikroba tersebut dapat dengan cepat beradaptasi dengan polutan baru yang mereka temui atau co-metabolisme. Rekayasa genetika adalah proses yang bermanfaat bagi perbaikan kualitas lingkungan dan pada akhirnya berdampak baik bagi kesehatan manusia.



Gambar 2.5. Penggunaan metode GMEs untuk remediasi lingkungan
(Sumber : Rafeeq *et al.*, 2023)

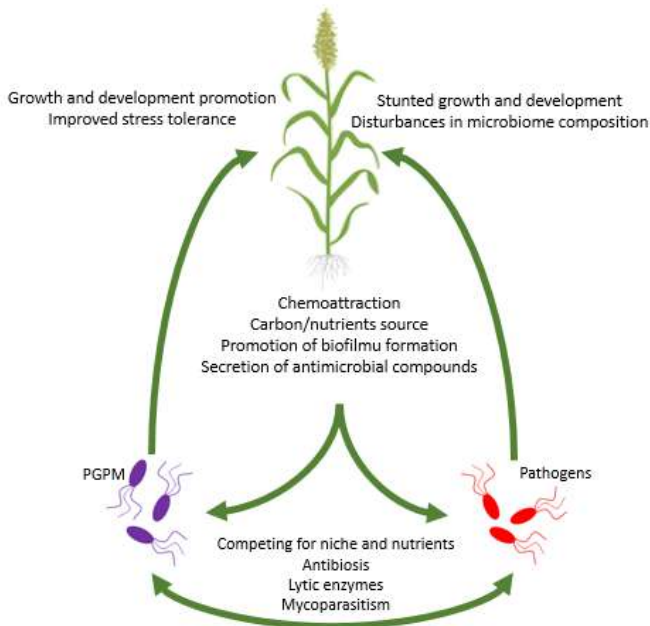
Beberapa contoh mikroorganisme yang telah melalui proses rekayasa genetika dan dapat bermanfaat dalam mengatasi cemaran logam berat pada lingkungan yaitu:

1. *E. coli* strain SE5000 mendegradasi cemaran nikel di perairan (Tsyganov *et al.*, 2020).
2. *Pseudomonas putida* strain X3 mendegradasi cadmium (Ayogu *et al.*, 2020).
3. *Acidithiobacillus ferrooxidans* mendegradasi cemaran merkuri (Arshadi & Yaghmaei, 2020).
4. *Mesorhizobium huakuii* mendegradasi akumulasi Cd^{2+} (Luo *et al.*, 2020).

2.6 Peranan Bakteriologi di Bidang Pertanian

Teknik pertanian secara tradisional, seperti penggunaan pupuk kimia, pestisida, fungisida, dan herbisida, memungkinkan perlindungan tanaman terhadap patogen dan hasil panen yang baik. Senyawa kimia yang ada dalam bahan kimia pertanian berbahaya bagi lingkungan dan menyebabkan polusi pada tanah, atmosfer, dan

air. Upaya untuk memenuhi permintaan pangan baik dari segi kuantitas maupun kualitas, penggunaan bioinokulan (Chaudhary *et al.*, 2020), yaitu pupuk hayati dan biopestisida. Bioinokulan terdiri dari mikroba hidup yang mampu aktif mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman disebut PGPM (*plant growth-promoting microorganisms*). Mikroorganisme tersebut dapat memacu pertumbuhan dan memiliki potensi besar tidak hanya untuk meningkatkan hasil panen tetapi juga untuk proses remediasi tanah (Maitra *et al.*, 2021).



Gambar 2.6. Interaksi multidimensi antara tanaman dan PGPM, antara tanaman dan patogen, dan antara PGPM dan patogen (Sumber : Antoszewski *et al.*, 2022)

Mikroorganisme pemacu pertumbuhan tanaman merangsang pertumbuhan dan perkembangan tanaman melalui berbagai mekanisme langsung dan tidak langsung (Gambar 2.6). Mekanisme PGPM secara langsung antara lain reduksi fitohormon, asimilasi nitrogen, kelarutan, dan mineralisasi makro unsur mikro, dan modulasi tingkat endogen etilen pada jaringan tanaman. Contoh mekanisme tidak langsung adalah penghambatan pertumbuhan

patogen melalui antibiosis, sekresi enzim litik, dan persaingan, misalnya, melalui produksi siderofor, induksi / penghambatan gen ekspresi tanaman, induksi respon imun tanaman, dan manipulasi komposisi mikrobioma tanaman.

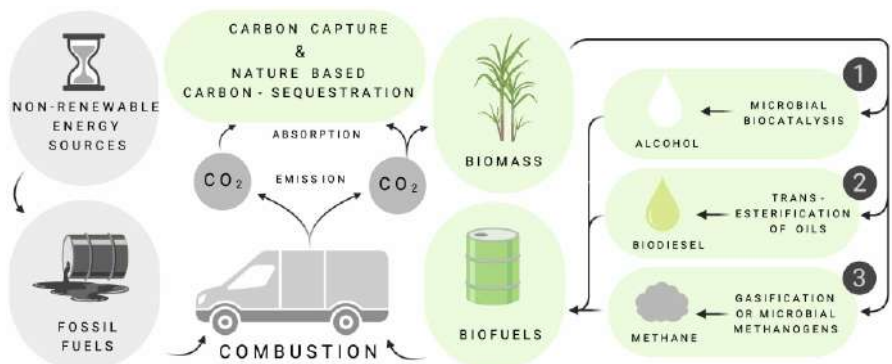
Contoh bakteri yang dimanfaatkan sebagai PGPM antara lain sebagai berikut:

1. *Acinetobacter* sp. RG30 dan *Pseudomonas putida* GN04 yang mampu bersimbiosis dengan tanaman jagung (*Zea mays*). PGPM mampu meningkatkan toleransi tanaman jagung terhadap Cu, peningkatan kandungan klorofil, peningkatan konsentrasi Cu dalam jaringan (Rojas-Tapias *et al.*, 2014).
2. *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium* sp., dan *Bradyrhizobium* sp. yang bersimbiosis pada tanaman padi (*Oryza sativa*). Manfaat PGPM bagi tanaman yaitu peningkatan hasil dan serapan N, P, K, dan Fe, peningkatan kekuatan benih, biomassa kering, dan luas daun dengan kemunculan bibit yang lebih cepat (Bizwas *et al.*, 2000)
3. Konsorsium enam Bakteri (*Arthrobacter nitroguajacolicus*, *Bacillus cereus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus mojavensis*, *Pseudomonas azotoformans*, dan *Pseudomonas frederiksbergensis*) membantu memberikan perlindungan pada tanaman *Nicotiana attenuata* (tembakau) terhadap serangan jamur patogen *Fusarium* sp. dan *Alternaria* sp. (Santhanam *et al.*, 2015).
4. *Serratia marcescens* yang bersimbiosis dengan tanaman terung (*Solanum melongena*). Manfaat bagi tanaman yaitu pengurangan stres garam, penurunan kandungan Na^+/Cl^- dalam daun, tingkat peroksidasi lipid lebih rendah, dan aktivitas enzim antioksidan lebih tinggi, peningkatan biomassa, batang lebih panjang, dan luas permukaan daun lebih lebar (Turhan *et al.* 2020).

2.7 Peranan Bakteriologi dalam Pembuatan Biofuel

Dekarbonisasi bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar fosil, baik dengan substitusi energi fosil di bentuk batubara, minyak bumi dan gas alam dengan bahan bakar yang berasal dari biomassa (Gambar 2.7).

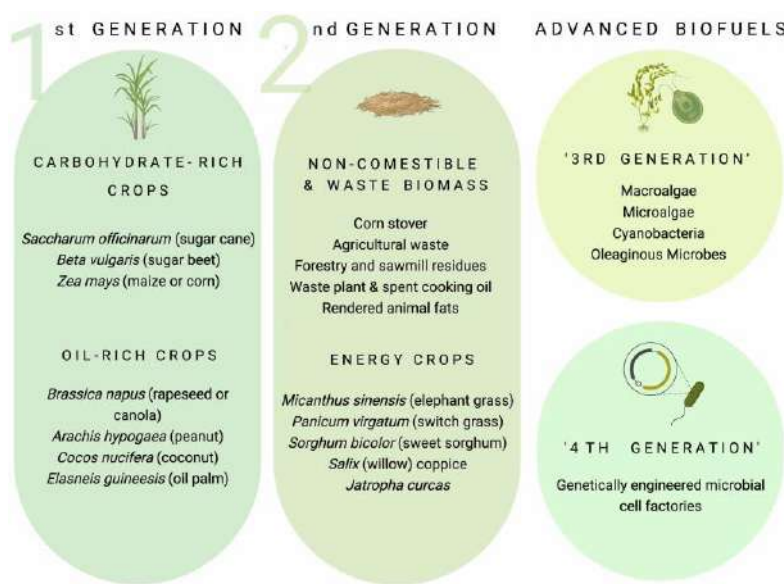
Metabolisme mikroba sudah menjadi bagian integral dari produksi bahan bakar terbarukan dan berkelanjutan yaitu dengan menghasilkan biofuel. Biofuel mencakup bahan mudah terbakar padat, cair atau gas yang proses produksinya melibatkan mikroorganisme hidup. Saat ini, biofuel komersial termasuk alkohol yang diproduksi dengan proses fermentasi oleh mikroba, terutama etanol (C_2H_5OH) dari fermentasi *Saccharomyces cerevisiae* dan n-butanol (C_4H_9OH) dari bakteri *Clostridium* atau konversi kimia etanol, yang dicampur dengan bensin.



Gambar 2.7. Rute dekarbonisasi
(Sumber : Love, 2022)

Perkembangan pemanfaatan biomassa dan rekayasa genetika mikroba untuk produksi biofuel menghasilkan beberapa pengelompokan atau klasifikasi biofuel (Gambar 2.8). Biofuel generasi pertama (1G) dan kedua (2G) menggambarkan asal usul biomassa yang digunakan untuk memproduksi bahan bakar. Biofuel 1G diproduksi dari tanaman pangan kaya karbohidrat atau minyak sedangkan biofuel 2G mengeksplorasi lebih banyak jenis makanan yang tidak dapat dimakan dan tanaman energi lignoselulosa, limbah biomassa lignoselulosa (residu pertanian, kehutanan atau penggergajian kayu) tanaman termakan atau limbah minyak, minyak goreng bekas atau lemak hewani yang diberikan. Biofuel canggih, kadang-kadang disebut sebagai generasi ketiga atau keempat (3G atau 4G) biofuel, mencakup berbagai sumber biomassa alternatif atau molekul mudah terbakar yang berasal dari mikroba,

terutama mikroalga atau ragi oleaginous, atau dari pabrik sel mikroba yang direkayasa secara metabolik.



Gambar 2.8. Kalsifikasi biofuel
(Sumber : Love, 2022)

Gas alam terbarukan dapat diproduksi dengan gasifikasi termokimia langsung dari bahan baku biomassa untuk menghasilkan *syngas*, campuran CO, CO₂ dan H₂, diikuti oleh metanasi kimia. Metanogenesis mikroba melibatkan 4 fase, yang masing-masing dilakukan oleh berbagai kelompok mikroba mesofilik (20-45 °C) atau termofilik (50-70 °C) yang semuanya ada dalam konsorsium reaktor (Enzmann *et al.*, 2018). Pada fase 1, disebut fase hidrolitik, bakteri anaerob fakultatif menurunkan polimer organik dari bahan baku, melepaskan substrat terlarut. Substrat ini kemudian dimetabolisme selama fase asidosis kedua untuk menghasilkan campuran senyawa termasuk asam lemak volatil rantai pendek, asam organik, alkohol, keton, dan gas yang berbeda (CO₂, NH₃, SH₂ dan H₂). Pada fase ketiga, asetogenesis, produk asidogenesis dimetabolisme oleh bakteri penghasil H₂, asetogenik dan homoasetogenik. Bakteri asetogenik, antara lain *Syntrophomonas*, *Syntrophospora*, *Syntrophobacter*, *Fusobacterium*

dan *Paleobacter*, memetabolisme $\geq$ asam organik C₃, etanol dan senyawa aromatik menjadi asetat (CH₃COO⁻), format (CH₂O₂), CO₂ dan H₂. Bakteri homoasetogenik memetabolisme substrat yang diproduksi dalam fase asidogenik atau dapat menggunakan H₂ dan CO₂ melalui jalur asetil-KoA untuk menghasilkan asetat (CH₃COO⁻). Akhirnya, metanogenesis dilakukan oleh tiga kelompok archaeobacteria metanogenik; hidrogenotrof, asetik dan metilotrof.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A., Irfan, M., Khan, S., Hassan, A., Khan, S., Javed, R., & Ali, S. 2021. Microbes: role in industries, medical field and impact on health. *Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences*, 7(6), 278-282.
- Antoszewski, M., Mierek-Adamska, A., & Dąbrowska, G. B. 2022. The importance of microorganisms for sustainable agriculture—A review. *Metabolites*, 12(11), 1100.
- Arshadi, M., & Yaghmaei, S. (2020). Advances in bioleaching of copper and nickel from electronic waste using *Acidithiobacillus ferrooxidans*: evaluating daily pH adjustment. *Chemical Papers*, 74, 2211-2227.
- Ayogu, C. V., Ifeanyi, V. O., Obasi, N. P., 2020. Monitoring of metabolic compounds from degradation of petrochemicals using indigenous consortium of *Pseudomonas* strains. *Nigerian Journal of Microbiology*, 34 (2), 5221-5238.
- Barka, E. A., Vatsa, P., Sanchez, L., Gaveau-Vaillant, N., Jacquard, C., Klenk, H. P., ... & van Wezel, G. P. 2016. Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(1), 1-43.
- Biswas, J. C., Ladha, J. K., & Dazzo, F. B. 2000. Rhizobia inoculation improves nutrient uptake and growth of lowland rice. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), 1644-1650.
- Chaudhary, T., Dixit, M., Gera, R., Shukla, A. K., Prakash, A., Gupta, G., & Shukla, P. 2020. Techniques for improving formulations of bioinoculants. *3 Biotech*, 10, 1-9.
- Enzmann, F., Mayer, F., Rother, M., & Holtmann, D. 2018. Methanogens: biochemical background and biotechnological applications. *Amb Express*, 8(1), 1-22.
- Gholami-Shabani, M., Shams-Ghahfarokhi, M., & Razzaghi-Abyaneh, M. 2023. Food Microbiology: Application of Microorganisms in Food Industry. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.109729

- Hutchings, M.I., Truman, A., & Wilkinson, B. 2019. Antibiotics: Past, present and future. *Current Opinion in Microbiology*, 51, 72-80.
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. 2020. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 366-381.
- Labeda, D. P., Goodfellow, M., Brown, R., Ward, A. C., Lanoot, B., Vannanneyt, M., ... & Hatano, K. 2012. Phylogenetic study of the species within the family Streptomycetaceae. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 101, 73-104.
- Love, J. 2022. Microbial pathways for advanced biofuel production. *Biochemical Society Transactions*, 50(2), 987-1001.
- Luo, S., Yin, J., Peng, Y., Xie, J., Wu, H., He, D., Li, X., & Cheng, G. 2020. Glutathione is involved in detoxification of peroxide and root nodule symbiosis of *Mesorhizobium huakuii*. *Current Microbiology*, 77, 1-10.
- Maitra, S., Brestic, M., Bhadra, P., Shankar, T., Praharaj, S., Palai, J. B., Shah, M. M. R., Barek, V., Ondrisik, P., Skalický, M., & Hossain, A. 2021. Bioinoculants—natural biological resources for sustainable plant production. *Microorganisms*, 10(1), 51.
- Newman, D. J., & Cragg, G. M. 2016. Natural products as sources of new drugs from 1981 to 2014. *Journal of Natural Products*, 79(3), 629-661.
- Rafeeq, H., Afsheen, N., Rafique, S., Arshad, A., Intisar, M., Hussain, A., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. 2023. Genetically engineered microorganisms for environmental remediation. *Chemosphere*, 310, 136751.
- Rojas-Tapias, D. F., Bonilla, R., & Dussán, J. 2014. Effect of inoculation and co-inoculation of *Acinetobacter* sp. RG30 and *Pseudomonas putida* GN04 on growth, fitness, and copper accumulation of maize (*Zea mays*). *Water Air Soil Pollut.*, 225, 2232.

- Santhanam, R., Luu, V. T., Weinhold, A., Goldberg, J., Oh, Y., & Baldwin, I. T. 2015. Native root-associated bacteria rescue a plant from a sudden-wilt disease that emerged during continuous cropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(36), E5013-E5020.
- Tanniche, I., & Behkam, B. 2023. Engineered live bacteria as disease detection and diagnosis tools. *Journal of Biological Engineering*, 17(1), 65.
- Traxler, M. F., & Kolter, R. 2015. Natural products in soil microbe interactions and evolution. *Natural Product Reports*, 32(7), 956-970.
- Tsyganov, V. E., Tsyganova, A. V., Gorshkov, A. P., Seliverstova, E. V., Kim, V. E., Chizhevskaya, E. P., Belimov, A. A., Serova, T. A., Ivanova, K. A., Kulaeva, O.A., Kusakin, P. G., Kitaeva, A.B.& Tikhonovich, I. A. 2020. Efficacy of a plant-microbe system: *Pisum sativum* (L.) cadmium-tolerant mutant and *Rhizobium leguminosarum* strains, expressing pea metallothionein genes PsMT1 and PsMT2, for cadmium phytoremediation. *Frontiers in Microbiology*, 11, 15.
- Turhan, E., Kiran, S., Ates, Ç., Ates, O., Kusvuran, S., & Ellialtioglu, S. S. 2020. Ameliorative effects of inoculation with *Serratia marcescens* and grafting on growth of eggplant seedlings under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(4), 594-603.
- Van der Meij, A., Worsley, S. F., Hutchings, M. I., & van Wezel, G. P. 2017. Chemical ecology of antibiotic production by actinomycetes. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(3), 392-416.
- Waksman, S. A., Schatz, A., & Reynolds, D. M. 2010. Production of antibiotic substances by actinomycetes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1213(1), 112-124.

BAB 3

SEJARAH PERKEMBANGAN MIKROBIOLOGI

3.1 Klasifikasi Mikroorganisme

Mikroorganisme ialah organisme (makhluk hidup) yang sangat kecil dan hanya dapat dilihat dengan bantuan mikroskop. Mereka termasuk dalam lima kerajaan besar, yaitu bakteri, protozoa, fungi, virus, dan protista (Fardiaz, 2014).

3.1.1 Klasifikasi Bakteri

Bakteri dapat bergabung menjadi empat kelompok besar berdasarkan kelengkapan selnya (Rini & Rohmah, 2020):

1. *Eubakteria* Gram-negatif yang memiliki dinding sel: Contohnya, bakteri bergenus *Streptomyces*, *Streptococcus*, dan *Mycobacterium tuberculosis*.
2. *Eubakteria* Gram-positif yang memiliki dinding sel: Contohnya, bakteri ungu, *Enterobacter*, *Vibrio*, dan lainnya.
3. *Eubakteria* tanpa dinding sel: Contohnya, bakteri *Mycoplasma*.
4. *Archaeobacteria*: Organisme yang tidak mempunyai dinding sel, tetapi memiliki karakteristik yang berbeda dari bakteri.

3.1.2 Klasifikasi Fungi

Dalam klasifikasi mikrobiologi, kerajaan fungi adalah salah satu dari lima kerajaan, yang terdiri dari organisme eukariotik seperti jamur, kapang, dan khamir. Klasifikasi mikrobiologi kerajaan fungi adalah sebagai berikut (Madigan et al., 2018):

1. Divisi *Zygomycota*: terdiri dari *Rhizopus*, *Mucor*, dan *Absidia*.
2. Divisi *Ascomycota*: Kelompok jamur memiliki struktur reproduksi yang disebut askus, yang menghasilkan askospora. Contoh jamur, kapang, dan ragi adalah bagian dari divisi ini.
3. Divisi *Basidiomycota*: Kelompok jamur ini memiliki struktur reproduksi yang disebut basidium, yang menghasilkan

basidiospora. Jamur yang menghasilkan kancing, seperti jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*) adalah contohnya.

4. Divisi *Deuteromycota*: Karena belum diketahui adanya fase reproduksi seksual, divisi ini juga disebut sebagai "*fungi imperfecti*". Contoh dari divisi ini termasuk jamur *Penicillium* dan *Aspergillus*, yang menyebabkan penyakit pada tanaman dan hewan.

3.1.3 Klasifikasi Protista

Dalam klasifikasi mikrobiologi, kerajaan protista mencakup organisme eukariotik yang tidak termasuk dalam kerajaan hewan, tumbuhan, atau fungi. Klasifikasi ini sering menjadi subjek penelitian dan perdebatan ilmiah. Namun, berikut adalah beberapa kelompok kerajaan protista yang umum (Madigan et al., 2018).

1. *Alveolata*: Kelompok ini terdiri dari protozoa seperti Plasmodium (penyebab malaria) dan Paramecium, yang memiliki alveolus di bawah membran sel.
2. *Rhizaria*: Protista dalam kelompok ini memiliki *pseudopodia*, yang digunakan untuk bergerak dan mengambil makanan. *Foraminifera* dan *radiolaria* adalah beberapa contoh.
3. *Stramenopila* (atau *Heterokonta*): Kelompok protista dengan flagela berbulu atau rambut termasuk diatom dan alga coklat.
4. *Excavata*: Kelompok ini terdiri dari protista dengan struktur sel yang dikelilingi oleh alur atau depresi. *Parabasalids* dan *diplomonads* adalah contohnya.

3.1.4 Klasifikasi Virus

Karena virus tidak dianggap sebagai organisme hidup, ada banyak metode yang digunakan dalam klasifikasi mikrobiologi kerajaan virus. Namun, virus dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis genom, struktur kapsid, atau jenis sel inang yang mereka infeksi (Liu, 2014).

1. Berdasarkan Jenis Genom:
Virus yang memiliki genom DNA, seperti Herpes Virus dan Adenovirus. Sedangkan virus yang memiliki genom RNA, seperti Influenza virus dan HIV.
2. Berdasarkan Struktur Kapsid:

- a. Virus Berbungkus (*enveloped*): Virus yang memiliki lapisan lipid berupa selubung luar, seperti virus Herpes dan virus Influenza.
 - b. Virus Tak Berbungkus (*non-enveloped*): Virus yang tidak memiliki selubung lipid, seperti virus Polio dan virus *Adenovirus*.
3. Berdasarkan Jenis Sel Inang:
Virus yang menginfeksi tumbuhan, seperti virus *Tobacco mosaic virus* (TMV); Virus yang menginfeksi hewan, seperti virus *Human immunodeficiency virus* (HIV); dan Virus yang menginfeksi bakteri, seperti *bakteriophage* T4.

3.2 Morfologi Mikroorganisme

Mikroorganisme memiliki ukuran yang dinyatakan dalam satuan mikron (μ), dimana 1 μ setara 0,001 mm, sehingga sangat sulit dilihat dengan mata telanjang. Para peneliti seperti Haeckel, Whittaker, dan Woese telah mengklasifikasikan mikroba kedalam beberapa kelompok. Haeckel mengelompokkan mikroorganisme berdasarkan perbedaan struktur selnya kedalam tiga kelompok: dunia tumbuhan (*plantae*), dunia hewan (*animalia*), dan dunia protista. Menurut Woese, penggolongan mikroba berdasarkan susunan kinetiknya adalah yang paling penting. Terdiri dari *Archaeobacteria*, *Eubacteria*, dan *Eukariota* (Protozoa, Fungi, Tumbuhan, dan Binatang) (Rini & Rohmah, 2020).

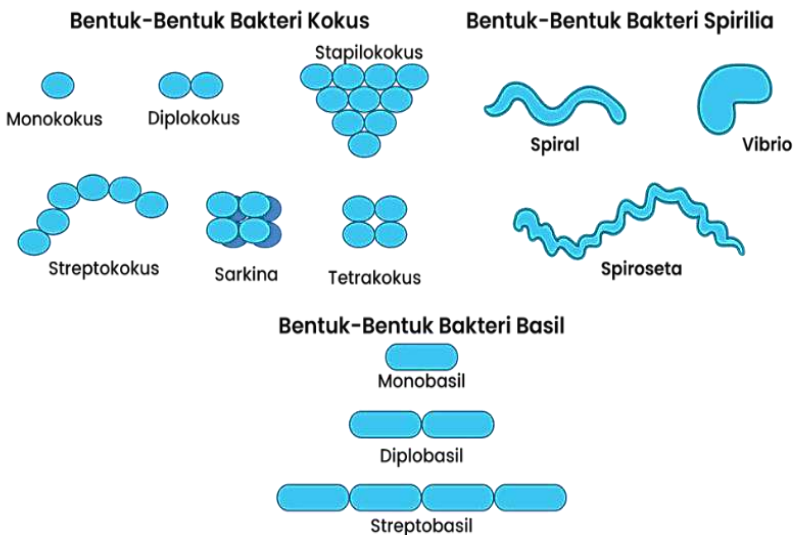
3.2.1 Bakteri

Bakteri ialah makhluk hidup yang paling umum dan tersebar di seluruh dunia. Bakteri berbeda dari organisme lain karena mereka merupakan organisme uniseluler, prokariotik (tanpa membran inti sel), tidak memiliki klorofil, dan memiliki rentang ukuran mulai dari sekitar 0,12 mikron hingga ratusan mikron. Mereka juga tidak memiliki klorofil dan memiliki berbagai bentuk tubuh, seperti basil (batang), kokus (bulat), spirillum (spiral), kokobasil (batang dan bulat), dan vibrio (tanda baca koma). Sifat lain dari bakteri, yaitu (Rini & Rohmah, 2020):

1. Mempunyai dinding sel
2. Hidup bebas atau sebagai parasit

3. Hidup pada lingkungan ekstrim
4. Bakteri memiliki endospora
5. Bakteri ada yang menggunakan flagela untuk bergerak, dan ada juga yang bergerak dengan cara berguling tanpa menggunakan flagela.

Terdapat bentuk-bentuk bakteri itu sendiri, yaitu: (Rini & Rohmah, 2020).



Gambar 3.1. Bentuk-bentuk bakteri
(Sumber: <https://www.roboguru.ruangguru.com>)

1. Bakteri Bentuk Batang
Basil, berasal dari kata *bacillus*, yang berarti batang. Terdapat beberapa jenis bakteri berbentuk batang: basil tunggal, yaitu bakteri dengan satu batang, seperti *Salmonella typhi*, yang menyebabkan penyakit tipus; *diplobasil*, yaitu bakteri berbentuk batang yang berpasangan; dan *streptobasil*, yaitu bakteri berbentuk batang yang bergandengan dan tersusun memanjang, seperti *Bacillus anthracis*.
2. Bakteri Bentuk Bulat
Bakteri berbentuk bulat disebut *Coccus*. Bakteri ini dibedakan menjadi:

- a. Monokokus, yaitu bakteri berbentuk bulat tunggal, seperti *Neisseria gonorrhoeae*, yang menyebabkan penyakit gonore (kencing nanah);
 - b. Diplokokus, yaitu bakteri berbentuk bulat yang bergandengan dua-dua, seperti *Diplococcus pneumonia*, yang menyebabkan *pneumonia* atau radang paru-paru;
 - c. *Sarcina*, yaitu bakteri berbentuk bulat yang berkumpul dalam kelompok empat, menyerupai kubus;
 - d. Streptokokus, adalah bakteri berbentuk bulat yang berkumpul dalam rantai panjang; dan
 - e. Stafilocokus adalah bakteri berbentuk bulat yang membentuk koloni dengan struktur sel tidak teratur sehingga mirip dengan kumpulan buah anggur.
3. Bakteri Bentuk Spiral
- Ada tiga jenis bakteri berbentuk spiral, yaitu bakteri dengan bentuk spiral, seperti *Spirillum*; *vibrio*, yaitu bakteri berbentuk spiral tak sempurna, seperti *Vibrio cholerae*, yang menyebabkan penyakit kolera; dan *spiroseta*, yaitu bakteri berbentuk spiral yang lentur. Tubuh dapat memanjang dan mengerut saat bergerak.

3.2.2 Alga

Alga memiliki morfologi yang hampir sama tetapi sebenarnya berbeda, maka dari itu mereka diklasifikasikan ke dalam *Thallophyta* (tumbuhan bertalus). *Thallophyta* adalah kelompok tumbuhan yang memiliki kerangka tubuh tanpa daun yang terdefinisi, dengan batang dan akar yang terdiri dari struktur batang talus. Bentuk talus bervariasi, dapat berupa tabung, pipih, gepeng, bulat seperti kantong, atau berbentuk rambut. Cabang talus juga memiliki beragam bentuk, yaitu (Mudrikah, 2021):

1. *Dichotomous* (dua terus menerus)
2. *Penicillate* (dua-dua berlawanan sepanjang talus utama)
3. *Intricate* (berpusat melingkari batang utama)
4. Tidak bercabang

Alga adalah mikroorganisme aerobik fotosintetik yang hidup di mana saja ada cahaya, air, dan nutrisi sederhana. Dengan bantuan

sinar matahari, alga tumbuh cepat di air yang diam. Spesies alga tertentu dapat hidup pada kondisi ekstrim seperti kondisi salju dan es di daerah-daerah kutub dan puncak gunung. Beberapa jenis ganggang mampu bertahan hidup di lingkungan ekstrem, seperti sumber air panas dengan suhu mencapai 70°C. Sejumlah alga juga dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan seperti tanah lembab, kulit kayu pohon, dan bahkan permukaan bebatuan (Mudrikah, 2021).

3.2.3 Fungi

Jamur merupakan parasit yang mengambil nutrisi dari organisme yang masih hidup, atau saprofit adalah organisme yang memperoleh nutrisi dari sisa-sisa organisme lain. Dinding selnya terdiri dari selulosa dan kitin. Jamur, yang juga dikenal sebagai cendawan, adalah hewan heterotrof karena tidak memiliki klorofil. Memiliki struktur tubuh yang multiseluler dan uniseluler. Strukturnya terbentuk oleh serangkaian benang yang disebut hifa, yang kemudian dapat berkembang menjadi jaringan beranak-cabang yang disebut miselium. Jamur bisa berkembang dengan cara generatif dan vegetatif. Agar bisa mendapatkan makanannya, jamur menyerap zat organik dari lingkungan dengan menggunakan hifa dan miseliumnya. Setelah itu, mencadangkannya sebagai glikogen. Jamur dapat menjadi saprofit, parasit obligat, atau parasit fakultatif karena mereka heterotrof (Susilo, 2023).

3.2.4 Virus

Morfologi virus memiliki variasi yang signifikan dalam bentuk dan jenisnya. Virus bervariasi dalam bentuk dan ukuran tergantung pada klasifikasi mereka. Secara umum, virus dapat dikelompokkan menjadi empat berdasarkan morfologinya, yaitu (Priastomo et al., 2021):

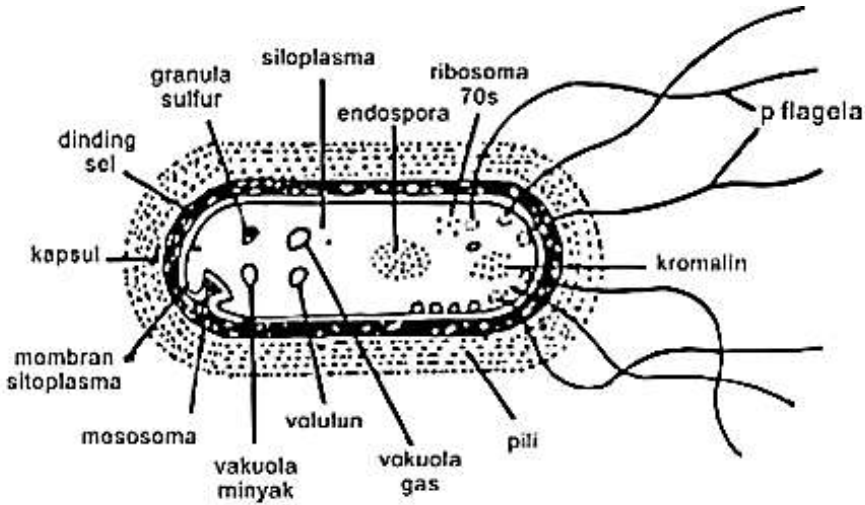
1. Berserabut/berserat (*filamentous*)
2. Isometrik/ikosahedral (*icosahedral*)
3. Berselubung (*enveloped*)
4. Berkepala dan berekor (*head and tail*)

Golongan virus berserabut umumnya virus yang menyerang tanaman misalnya TMV (*Tobacco Mosaic Virus*). Golongan virus isometrik berbentuk bulat kasar contohnya virus polio, virus herpes dan *adenovirus*. Golongan virus yang berselubung memiliki membran mengelilingi kapsid contohnya HIV, virus influenza dan virus SARS-CoV-2. Virus yang memiliki struktur berkepala dan berekor memiliki kepala yang menyerupai virus ikosahedral dan ekor yang menyerupai virus berserabut. Virus jenis ini biasanya menginfeksi bakteri dan dikenal sebagai bakteriofag (Priastomo et al., 2021).

3.3 Anatomi Mikroorganisme

Mikroorganisme dapat terbagi dua kelompok. Bakteri sel prokariotik, sementara kapang dan khamir masuk dalam kelompok sel eukariotik. Meskipun virus memiliki unsur genetik untuk berkembang biak, tetapi tidak dapat dimasukkan di dalam kategori tersebut karena tidak memiliki kemampuan untuk melakukan metabolisme (Suryani, 2021).

Sel prokariotik, yang berasal dari bahasa Yunani dengan "pro" yang berarti kuno dan "karyote" yang berarti dari inti, umumnya memiliki struktur yang lebih sederhana daripada sel eukariotik. Sel ini terdiri dari dinding sel, membran sitoplasma, sitoplasma dan kromatin yang mengandung materi genetika (asam deoksiribonukleat = ADN). Ilustrasi dari sel prokariotik dapat ditemukan pada Gambar 3.2 (Suryani, 2021).

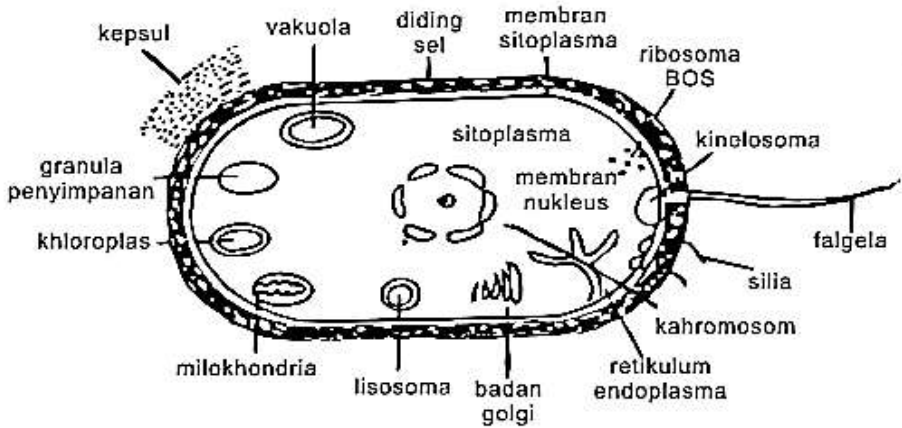


Gambar 3.2. Struktur Sel Prokariotik
(Sumber : Suryani, 2022)

Bagian-bagian sel prokariotik, antara lain (Suryani, 2021):

1. Kapsul
2. Flagella
3. Pili atau Fimbria
4. Dinding sel
5. Membran sitoplasma
6. Sitoplasma
7. Endospora

Sel eukariotik, yang dalam bahasa Yunani *eukaryote* bermakna memiliki inti yang sejati, memiliki DNA yang terstruktur dalam bentuk linear yang disebut kromosom. DNA ini berada di dalam inti sel yang terisolasi oleh membran inti dari sitoplasma. Pada sel eukariotik tidak memiliki beberapa organel yang dimiliki sel eukariotik, alat mitosis, mitokondria, retikulum endoplasma, dan kadang-kadang kloroplas (Gambar 3.3) (Suryani, 2021).



Gambar 3.3. Struktur Sel Eukariotik
(Sumber : Suryani, 2022)

Bagian-bagian sel eukariotik, antara lain (Suryani, 2021):

1. Dinding sel
2. Membran sitoplasma
3. Sitoplasma
4. Nukleus
5. Retikulum endoplasma
6. Kompleks golgi
7. Mitokondria

3.4 Sejarah Perkembangan Mikroorganisme: Era Perintisan

3.4.1 Penemuan Mikroba

1. Robert Hooke

Robert Hooke memulai sejarah mikrobiologi dengan penemuan mikroskop olehnya pada tahun 1664. Dengan mikroskop sederhana yang terdiri dari dua lensa, Hooke dapat mengamati struktur-struktur yang ia sebut sebagai sel. Penemuan ini menjadi fondasi bagi evolusi teori sel yang menyatakan bahwa semua organisme hidup terdiri dari sel. Meskipun Robert Hooke mampu mengamati sel menggunakan mikroskop buatannya, keterbatasan teknologi pada masa itu, seperti ketiadaan metode

pewarnaan yang memadai, mengakibatkan ia tidak dapat mengamati mikroorganisme dengan jelas (Hamzah et al., 2023).

2. Antony Van Leeuwenhoek

Kajian dalam bidang ilmu mikrobiologi dimulai seiring dengan penemuan mikroskop oleh Antony van Leeuwenhoek pada tahun 1676, yang dapat memfasilitasi pengamatan mikroorganisme seperti bakteri untuk pertama kalinya. Sebagai ilmuwan asal Belanda, Antony van Leeuwenhoek mungkin adalah orang pertama yang berhasil mengamati organisme hidup dengan mikroskop lensa tunggal yang mirip dengan kaca pembesar. Leeuwenhoek merujuk pada organisme hidup yang diamatinya sebagai *animalcules* (hewan kecil). *Animalcules* ini ditemukan pada sisa makanan yang menempel di giginya serta dari air hujan, yang kemudian dikenal sebagai bakteri dan protozoa (Hamzah et al., 2023).

3.4.2 Penemuan Animalculus

Dengan penemuan mikroskop Leeuwenhoek (1633-1723), dunia mikroba pertama kali terungkap. Mikroskop yang dia temui sangat sederhana, dengan menggunakan lensa tunggal yang memiliki jarak fokus sangat pendek, meskipun demikian, dapat menciptakan gambar yang jelas yang diperbesar hingga lima puluh hingga tiga ratus kali lipat. Leeuwenhoek mengamati tentang struktur mikroskopik biji, jaringan tumbuhan, dan invertebrata kecil, namun penemuan terbesarnya adalah dunia mikroba yang dikenal sebagai "*animalculus*", atau hewan kecil. *Animalculus* termasuk mikroba yang sekarang dikenal sebagai protozoa, algae, khamir, dan bakteri (Hidayati, 2016).

3.4.3 Teori Abiogenesis

Ahli mikrobiologi sangat memperdebatkan temuan Leeuwenhoek tentang hewan kecil tersebut. Dua silang pendapat muncul tentang temuan Leeuwenhoek. Yang pertama mengatakan bahwa proses pembusukan hewan atau tanaman atau proses fermentasi menyebabkan munculnya hewan kecil atau abiogenesis, teori yang disebut *generatio spontanea* (Widodo, 2014).

3.4.4 Persengketaan Teori Abiogenesis

Francesco Redi (1626-1697) menggunakan hasil eksperimen yang dilakukannya untuk membuktikan bahwa pada ulat yang ditemukan di bangkai adalah larva yang berasal dari telur lalat dan bukan berasal dari benda yang mati (*Teori Generatio Spontanea*). Selanjutnya John Needham (1713-1781) melakukan percobaan, dimana sepotong daging dimasak untuk menghilangkan spesies mikroorganisme yang ada dan kemudian menempatkannya ke dalam toples yang terbuka. Hasil dari pengamatan yang dilakukannya adalah ditemukannya koloni di permukaan daging yang mengarah pada kesimpulan bahwa mikroorganisme terbentuk secara spontan dari daging (Harahap et al., 2021).

Pada tahun 1769, Lazzaro Spallanzani (1729-1799) melakukan percobaan dengan memasak kaldu selama satu jam dan menyimpannya dalam toples tertutup. Hasil tersebut menunjukkan tidak ditemukan mikroorganisme dalam kaldu. Oleh karena itu, percobaan Lazzaro Spallanzani bertentangan dengan teori pembangkitan spontan. Di sisi lain, Needham mengatakan bahwa menurut eksperimennya, sumber jenis organisme berasal dari udara, sedangkan pada eksperimen Spallanzani tidak berinteraksi langsung dengan udara (Harahap et al., 2021).

Pada tahun 1836, Franz Schulze melakukan percobaan di mana larutan asam kuat dilewatkan ke dalam tabung tertutup yang berisi daging matang. Pada Tahun 1837, Theodore Schwann melakukan percobaan dimana udara dialirkan melalui pipa panas ke dalam tabung tertutup yang berisi kaldu. Tidak ada yang menemukan mikroorganisme karena mereka sudah mati akibat kandungan asam kuat dan panas. Namun, pendukung teori generasi spontan percaya bahwa kehadiran asam kuat dan panas mengubah sifat udara sehingga tidak mendukung pertumbuhan mikroorganisme (Harahap et al., 2021).

3.4.5 Pembuktian Ketidakbenaran Abiogenesis

Pada akhirnya muncullah penelitian pada tahun 1954, seorang peneliti melakukan percobaan untuk menyelesaikan masalah ini. Mereka memakai tabung tertutup diisi kaldu yang telah dipanaskan, lalu memasukkan pipa yang sebagian diisi dengan

kapas ke dalamnya. Ujung tabung dibiarkan terbuka, memungkinkan mikroorganisme tersaring dan udara tetap masuk. Hasil menunjukkan bahwa mikroorganisme tidak ada dalam kaldu daging, yang menunjukkan bahwa teori *Generatio Spontanea* tidak benar (Widodo, 2014).

3.4.6 Teori Biogenesis

Menurut pendapat lain, hewan kecil ini berasal dari hewan kecil sebelumnya, serta organisme tingkat tinggi. Biogenesis adalah istilah untuk teori ini. Tidak adanya kemajuan dalam mikrobiologi disebabkan oleh ketidaksepakatan pendapat, dan hal ini berlanjut hingga perdebatan selesai ketika teori biogenesis terbukti benar. Membuktikan ini membutuhkan berbagai eksperimen yang terlihat sederhana namun memakan waktu lebih dari 100 tahun (Widodo, 2014).

1. Fransisco Redi

Fransisco Redi, seorang ilmuwan asal Italia yang menjadi pendukung dari teori biogenesis yang menentang teori *Generatio Spontanea* atau teori abiogenesis. Redi melakukan penelitian menggunakan daging besar yang ditempatkan dalam tiga wadah. Wadah pertama ditutup rapat, wadah kedua ditutup dengan kain kasa, sementara wadah terakhir tidak ditutup (Hamzah et al., 2023).

Setelah beberapa hari, Fransisco Redi mendapatkan hasil eksperimennya. Pada tabung pertama, tidak ditemukan mikroba sama sekali. Kemudian pada tabung kedua terdapat sedikit mikroba yang hidup di dalam daging. Pada tabung ketiga terdapat banyaknya mikroba yang hidup. Kemudian Ia menarik Kesimpulannya adalah bahwa larva pada daging berasal dari telur lalat yang diletakkan ketika lalat mengerumuni daging yang mulai membusuk (Hamzah et al., 2023).

2. Lazzaro Spallanzani

Lazzaro Spallanzani adalah seorang tokoh pendukung teori biogenesis yang berasal dari Italia. Pada tahun 1765, ia melakukan penelitian untuk membantah teori Needham. Spallanzani menggunakan air kaldu yang ditempatkan di dalam 3 tabung yang berbeda. Hasil dari penelitiannya tersebut memiliki

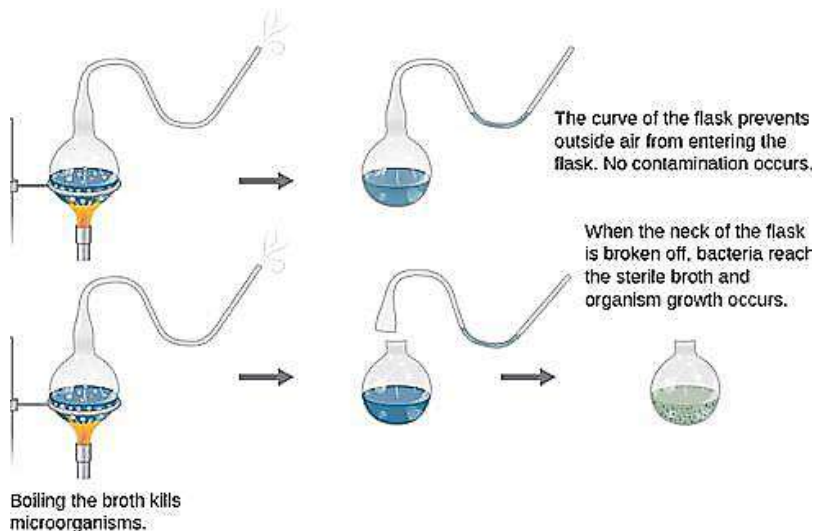
hasil yang sama dengan hasil yang diperoleh oleh penelitian Fransisco Redi, yaitu makhluk hidup berasal dari sesuatu yang hidup. Spallanzani menjelaskan bahwa kegagalan penelitian Needham disebabkan oleh dua hal: Needham tidak merebus tabung cukup lama untuk membunuh semua organisme dan tidak menutup bagian atas tabung dengan rapat, sehingga organisme lain masih bisa masuk dan berkembang di dalamnya (Hamzah et al., 2023).

3. Louis Pasteur

Louis Pasteur adalah seorang ilmuwan yang dianggap sebagai pendukung utama dari teori biogenesis. Pada tahun 1864, ia melakukan sebuah penelitian dengan tujuan untuk menguji dan menyempurnakan percobaan yang dilakukan oleh Redi dan Spallanzani. Pasteur menciptakan labu berleher angsa, yang sedikit tertutup tetapi masih bisa memungkinkan masuknya udara (Gambar 3.4). Prinsip dari labu ini adalah udara dapat masuk ke dalam tabung, namun debu akan terperangkap pada lengkungan leher tabung (Hamzah et al., 2023).

Pasteur melakukan percobaan dengan merebus kaldu hingga mendidih, dan membiarkannya dalam tabung leher angsa yang ia buat. Beberapa hari kemudian, tidak ada pertumbuhan bakteri yang terdeteksi dalam kaldu tersebut. Namun, beberapa hari setelahnya, bakteri mulai muncul di dalam kaldu. Dari penelitian ini, Pasteur berhasil membuktikan bahwa teori abiogenesis tidak valid. Sehingga disimpulkan makhluk hidup berasal dari makhluk hidup juga (Hamzah et al., 2023).

Eksperimen yang sama dilakukan oleh Pasteur. Dia membawa tabung ke pegunungan Pyrenia dan Alpen. Hasilnya menunjukkan bahwa udara membawa mikroorganisme ke dalam debu, dan Pasteur menyimpulkan bahwa udara yang lebih bersih dan murni masuk ke dalam bejana menghasilkan lebih sedikit kontaminasi (Widodo, 2014).

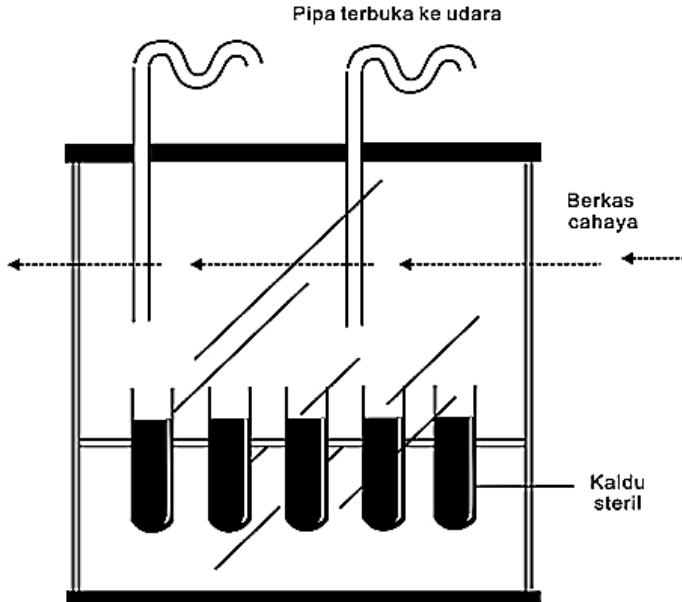


Gambar 3.4. Botol Pasteur Berleher Angsa tetap Steril karena Lengkung pada Leher

(Sumber: <https://www.kompas.com>)

4. John Tyndall

Salah satu argumen klasik yang menentang teori biogenesis adalah bahwa panas yang digunakan untuk membersihkan udara atau bahan dapat merusak energi vital. Tanpa energi vital ini, mikroorganisme tidak dapat muncul secara spontan. Dalam menanggapi argumen tersebut, John Tyndall menyatakan bahwa percobaan yang melibatkan tabung reaksi yang berisi kaldu steril dimasukkan ke dalam kotak tertutup dapat dengan mudah memastikan bahwa mikroorganisme tidak ada di udara. Udara dari luar masuk melewati pipa yang dibengkokkan membentuk dasar U yang menyerupai spiral (Gambar 3.5). Ini menunjukkan bahwa meskipun udara dari luar dapat masuk ke dalam tabung yang mengandung kaldu, mikroorganisme tidak ditemukan di dalamnya. Konsep biogenesis diterima berkat pekerjaan Pasteur dan Tyndall (Widodo, 2014).



Gambar 3.5. Air Kaldus tetap Steril dalam Ruangan Inkubasi Tyndall yang Bebas Debu
(Sumber: Widodo, 2014)

3.4.7 Teori Tentang Fermentasi

Pasteur menentang konsep *Generatio Spontanea* sebab ia yakin bahwa produk fermentasi anggur berasal dari mikroorganisme yang sudah ada, bukan dari fermentasi yang menghasilkan mikroorganisme seperti yang diyakini pada saat itu (Widodo, 2014).

Pasteur menyelesaikan masalah industri anggur pada tahun 1850-an dengan meneliti anggur yang baik dan buruk dan menemukan berbagai mikroorganisme. Ia menyimpulkan bahwa memilih mikroorganisme yang tepat dapat menghasilkan produk anggur yang berkualitas tinggi. Analisis tersebut menunjukkan bahwa Pasteur memanaskan sari buah anggur untuk membunuh mikroorganisme. Setelah dingin, anggur berkualitas tinggi dengan jumlah mikroorganisme yang diinginkan dimasukkan ke dalam sari buah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa anggur yang dihasilkan memiliki kualitas baik dan tidak mengalami perubahan aroma selama penyimpanan setelah dipanaskan selama beberapa menit

pada suhu 50-60 derajat Celcius. Saat ini, industri makanan menggunakan proses ini dengan nama "*pasteurisasi*" (Widodo, 2014).

3.4.8 Teori Terjadinya Infeksi atau Penyakit

1. Louis Pasteur

Bakteri berbahaya dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui makanan dan minuman. Peneliti bernama Louis Pasteur kemudian mengembangkan metode yang dikenal sebagai pasteurisasi untuk membunuh mikroorganisme dalam minuman. Metode ini, jika diterapkan, dapat memusnahkan bakteri dalam susu yang menyebabkan infeksi. Menjelang pertengahan tahun lima puluhan, Louis Pasteur kembali memusatkan perhatiannya pada penelitian baksil penyakit ternak, yang merupakan penyakit infeksi serius yang menyerang hewan ternak dan hewan-hewan lain, termasuk manusia. Louis Pasteur berhasil menunjukkan bahwa sejenis baksil menjadi penyebab suatu penyakit (Peni, 2020).

Salah satu karyanya yang paling penting adalah pengembangan teknik untuk memproduksi corak baksil penyakit ternak yang telah dilemahkan. Dengan menyuntikkan baksil yang telah dilemahkan ke tubuh ternak, mereka dapat menimbulkan penyakit ringan yang tidak mematikan sehingga memberikan kekebalan terhadap penyakit sebenarnya. Demonstrasi publik Louis Pasteur tentang efektivitas teknik ini dalam membuat hewan kebal dari baksil penyakit ternak menarik perhatian besar. Segera disadari bahwa metode ini bisa digunakan untuk mencegah berbagai penyakit pada manusia (Peni, 2020).

Penemuan yang paling terkenal dari Louis Pasteur adalah pengembangan teknik vaksinasi pada manusia untuk pencegahan penyakit Rabies yang sangat ditakuti. Sejak saat itu, banyak ilmuwan lain yang mencoba meniru konsep dasar Pasteur dan mengembangkan vaksin untuk mencegah berbagai penyakit serius seperti tifus dan polio. Salah satu penemuan penting lainnya adalah pengembangan vaksin untuk mencegah penyakit kolera pada ayam dan penyakit yang menyerang unggas (Peni, 2020).

2. Girolamo Fracastoro (1483-1553)

Pada abad ke-14 hingga ke-15 di Eropa, wabah penyakit seperti sampar/pes, cacar, dan demam tifus menyebar secara luas. Kondisi buruk tersebut mendorong munculnya teori bahwa kontak dengan makhluk hidup adalah penyebab penyakit menular. Konsep ini diperkenalkan oleh Girolamo Fracastoro (1483-1553). Teorinya menyatakan bahwa penyakit dapat ditularkan dari satu individu ke individu lain melalui zat penular yang disebut kontagion. Fracastoro mengklasifikasikan tiga jenis kontagion, yaitu (Irwan, 2017):

- a. Jenis kontagion yang tertular melalui kontak langsung, misalnya bersentuhan dan hubungan seksual.
- b. Jenis kontagion yang menyebar melalui benda-benda perantara, seperti pakaian, handuk, dan sapu tangan.
- c. Jenis kontagion yang dapat menular pada jarak jauh.

Awalnya, teori ini tidak diakui sebagai mikroorganisme baru karena pada saat itu teori tersebut tidak diterima dan tidak berkembang. Meskipun demikian, penemunya, Fracastoro, tetap dianggap sebagai salah satu pelopor dalam ilmu epidemiologi, meskipun baru beberapa abad kemudian terbukti bahwa teori kontagion melibatkan mikroorganisme (Irwan, 2017).

3. Anton Von Plenciz (1705-1786)

Von Plenciz dari Vienna (1762) berargumen bahwa tidak hanya makhluk hidup yang bisa menjadi penyebab penyakit, namun juga berbagai jasad renik dapat menyebabkan beragam penyakit. Konsep parasitisme, yaitu terdapatnya organisme yang hidup pada atau di dalam organisme lain dan mengambil nutrisi darinya, juga dikemukakan olehnya (Wahyuni & Ramadhani, 2020).

4. Richard Petri

Dalam penelitiannya mengenai mikroorganisme penyebab berbagai penyakit, Koch dan rekan-rekannya mengembangkan berbagai prosedur laboratorium yang sangat berpengaruh terhadap kemajuan mikrobiologi. Mereka menciptakan metode pewarnaan bakteri agar lebih mudah diperiksa dan teknik untuk menumbuhkan mikroba di laboratorium. Richard J. Petri (1852-1921) menciptakan piringan kaca dengan penutup untuk

meletakkan media, yang kemudian dikenal sebagai cawan Petri dan masih digunakan hingga sekarang (Napitupulu, 2019).

3.4.9 Mikroba Penyebab Penyakit

Penyakit bir adalah istilah khusus yang digunakan untuk memvisualkan kerusakan pada minuman anggur yang disebabkan oleh mikroba. Penemuan jamur yang menyebabkan penyakit pada tanaman gandum (1813), tanaman kentang (1845), serta penyakit pada ulat sutera dan kulit manusia merupakan bukti dari pernyataan tersebut (Apriyanto et al., 2022).

3.5 Periode keemasan (1850-1910)

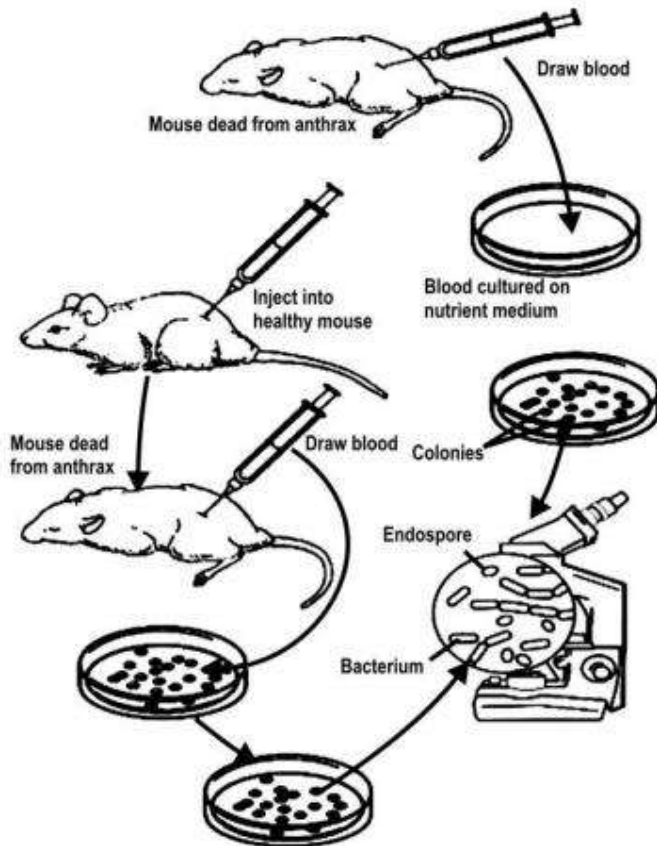
3.5.1 Piaraan Murni

Baru pada abad ke-19, orang mulai menyadari bahwa penyakit disebabkan oleh mikroorganisme. Kesadaran ini dimungkinkan oleh penggunaan mikroskop yang mampu memperlihatkan organisme mikroskopis tersebut. Pada tahun 1840, Henle, seorang ahli patologi dari Jerman, menyatakan bahwa penyakit tertentu disebabkan oleh jenis mikroorganisme tertentu; pandangan ini kemudian diperkuat oleh Robert Koch (1843-1910). Bahwa suatu penyakit disebabkan oleh faktor tertentu dibuktikan oleh Wollstein (Vienna, 1787) ketika ia mengambil sampel dari rongga hidung kuda yang menderita pilek dan mengoleskannya ke rongga hidung kuda yang sehat. Setelah beberapa waktu, kuda yang sehat tersebut juga menjadi sakit pilek (Apriyanto et al., 2022).

Ilmu bakteriologi kedokteran mengalami kemajuan pesat berkat penelitian Robert Koch. Koch merupakan orang pertama yang mengusulkan ide untuk membuat kultur murni. Pencegahan penyakit dengan vaksin (patogen yang telah dilemahkan) dan pengobatan dengan berbagai jenis serum (plasma darah yang mengandung zat penolak) merupakan upaya-upaya yang sangat erat kaitannya dengan bakteriologi kedokteran untuk mengurangi penderitaan dan meningkatkan kesejahteraan manusia (Apriyanto et al., 2022).

3.5.2 Postulat Koch (1882)

Pada tahun 1850, ditemukan bahwa bakteri berbentuk batang di darah hewan yang terkena antraks. Davaine (1863-1868) menunjukkan bahwa bakteri tersebut hanya ditemukan pada hewan yang sakit, dan bahwa mentransfer darah dari hewan yang sakit ke hewan yang sehat dapat menularkan penyakit yang sama. Robert Koch pada tahun 1876 membuktikan bahwa antraks disebabkan oleh bakteri, dan dari penelitian ini lahirlah "*postulat Koch*" ialah serangkaian proses untuk membuktikan bahwa suatu mikroba adalah penyebab penyakit (Suryani & Taupiqurrahman, 2021).



Gambar 3.6. Ilustrasi Langkah-langkah Postulat Koch
(Sumber: Widodo, 2014)

Isi Postulat Koch (Susilo, 2023):

1. Mikroorganisme harus terdapat dalam setiap kejadian penyakit, tetapi tidak hadir pada individu yang sehat.
2. Mikroorganisme yang diduga (*suspected*) harus bisa diisolasi dan dibiakkan dalam media kultur murni.
3. Jika mikroorganisme yang diisolasi diinokulasi pada individu yang sehat, penyakit yang sama harus muncul.

3.6 Ilmuwan-ilmuwan dalam perkembangan mikrobiologi

Berikut ilmuwan-ilmuwan yang memiliki peran dalam perkembangan mikrobiologi (Waluyo, 2022).

1. Hippocrates (460-370 SM). Sudah memakai cara observatif yaitu suatu cara untuk mendapatkan pengobatan secara ilmiah yang sampai sekarang masih dianut beberapa metodenya. Di samping itu, ia berpendapat bahwa proses penularan penyakit sangat erat dengan faktor lingkungan. Ia dikenal sebagai Bapak Ilmu Kedokteran.
2. Antony van Leeuwenhoek (1632-1723). Ia adalah penemu pertama mikroskop dan dengan alat ini terbukalah misteri dunia mikroorganisme sebagai penyebab penyakit.
3. John Snow (1813-1912). Telah mempelajari secara mendalam suatu istilah yang disebut dengan epidemiologi. Hal tersebut telah digunakan untuk membuktikan bahwa air berhubungan dengan wabah kolera.
4. Louis Pasteur (1827-1912). Sebagai salah seorang penganut paham abiogenesis telah menunjukkan pertama kali penggunaan antiseptik yang diterapkan di ilmu bedah.
5. Carlos Juan Finlay (1833-1915). Sebagai tokoh penemu yang berhasil menguak faktor yang menyebabkan demam kuning.
6. Robert Koch (1843-1930). Adalah orang Jerman yang berjasa dalam bidang berkaitan dengan bakteriologi modern, sehingga dikenal dengan Bapak Bakteriologi Kedokteran Modern. Dia juga menemukan beberapa bakteri yang menyebabkan penyakit kolera, TBC, dan anthrax.

7. Paul Ehrlich (1854-1915). Dikenal sebagai orang yang menemukan obat yang diaplikasikan bagi orang-orang yang menderita penyakit sifilis.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriyanto, M., Novitasari, R., Mardeci, H., & Yulianti. (2022). *Dasar Mikrobiologi Pangan*. CV. AA. RIZKY. Banten.
- Fardiaz, S. (2014). *Mikrobiologi Pangan* (1st ed.). Universitas Terbuka. Jakarta.
- Hamzah, H., Fauzi, A. Z., Prakaya, M. S., Hartati, Yulianti, E., Purnamasari, Y., Umar, A., Supriyanto, Fusvita, A., Rahayu, M., Yuniarty, T., Susilawati, Rahim, E., Mulyawati, S. A., Ihsan, B. M., & Yunus, R. Y. (2023). *Mikrobiologi Dasar*. Eureka Media Aksara. Purbalingga.
- Harahap, D. G. S., Noviantari, A., Hidana, R., Yanti, N. A., Nugroho, E. D., Nurdyansyah, F., Widyastuti, D. A., Pratiwi, R. H., Nendissa, D. M., Nendissa, S. J., Nurmalasari, A., Noer, S., Watuguly, T. W., Setyowati, E., & Estikomah, S. A. (2021). *Dasar-Dasar Mikrobiologi dan Penerapannya*. Penerbit Widina Bhakti Persada. Bandung.
- Hidayati, P. I. (2016). *Diktat Kuliah: Mikrobiologi Dasar*. Universitas PGRI Kanjuruhan. Malang.
- Irwan. (2017). *Epidemiologi Penyakit Menular*. Absolute Media. Yogyakarta.
- Liu, L. (2014). Fields Virology, 6th Edition. *Clinical Infectious Diseases*, 59(4), 613–613.
<https://doi.org/10.1093/cid/ciu346>.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock Biology of Microorganisms* (15th ed.). Pearson. London.
- Mudrikah, L. (2021). *Modul Pembelajaran Taksonomi Tumbuhan Rendah (Algae)* [Universitas Islam Negeri Raden Intan]. <http://repository.radenintan.ac.id/14975/1/PERPUS%20PUSAT%201%202.pdf>.
- Napitupulu, R. J. (2019). *Modul Pembelajaran Mikrobiologi Ikan*. Amafrad Press. Jakarta.
- Peni, R. (2020). *30 Ilmuwan Biologi Pengubah Jalannya Sejarah Dujnia*. Bornwin's Publishing. Sukoharjo.

- Priastomo, Y., Supyani, A'yun, Q., Lestari, W., Arsi, Rini, I. A., Kasasiah, A., Hutabarat, M., & Argaheni, N. B. (2021). *Virologi*. Kita Menulis. Yogyakarta.
- Rini, C. S., & Rohmah, J. (2020). *Buku Ajar Mata Kuliah Bakteriologi Dasar*. Umsida Press. <https://doi.org/10.21070/2020/978-623-6833-66-7>.
- Suryani, Y. (2021). *Fisiologi Mikroorganisme*. Gunung Djati Publishing. Bandung.
- Suryani, Y., & Taupiqurrahman, O. (2021). *Mikrobiologi Dasar*. LP2M UIN SGD. Bandung.
- Susilo. (2023). *Mikrobiologi Dasar*. Ahlimedia Press. Malang.
- Wahyuni, & Ramadhani, I. (2020). *Mikrobiologi dan Parasitologi*. CV Pena Persada. Purwokerto.
- Waluyo, L. (2022). *Mikrobiologi Pencegahan*. UMM press. Malang.
- Widodo, L. U. (2014). Sejarah, Ruang Lingkup, dan Perkembangan Mikrobiologi. In *Mikrobiologi* (pp. 1–55). Universitas Terbuka. Jakarta.

BAB 4

MIKROSKOP DAN PENGGUNAANNYA

4.1 Pendahuluan

Mikroskop sering digunakan oleh peneliti pada kegiatan laboratorium sains. Mikroskop berasal dari kata "mikro" yang berarti kecil dan "scopium" yaitu penglihatan (Suparti, 2010). Jadi mikroskop merupakan alat bantu yang digunakan untuk melihat benda/obyek yang berukuran kecil (mikroskopis) atau struktur dari material yang tidak dapat dilihat secara kasat mata (Respati, 2008). Hal ini membantu memecahkan persoalan manusia tentang organisme yang berukuran kecil. Di bidang *life science* atau penelitian, mikroskop diperlukan dalam mengklasifikasi makhluk hidup yang berukuran sel dan mempelajari kareakteristiknya. Di industri, mikroskop sangat diperlukan untuk mengetahui keberadaan kontaminan atau *defect sample* yang sangat kecil. Sedangkan di dunia edukasi atau sekolah, mikroskop diperlukan hanya untuk proses pembelajaran.

4.2 Sejarah

Mikroskop pertama kali dibuat oleh Zacharias Janssen dan Hans Janssen, seorang tukang kacamata dari Belanda, pada tahun 1590, yang mampu memperbesar objeknya 150 kali dari ukuran asli. Kemudian pada tahun 1610, ilmuwan asal Italia, seorang ahli fisika modern dan astronomi yaitu Galileo Galilei menggunakan mikroskop untuk mengamati gejala alam. Beberapa tahun kemudian, seorang berkebangsaan Belanda bernama Antony Van Leeuwenhoek (1632-1723) membuat mikroskop dengan kemampuan perbesaran objek 200-300 kali dari ukuran asli. Pada tahun 1663, Robert Hooke, ilmuwan Inggris, meneliti serangga dan tumbuhan menggunakan mikroskop. Ia menemukan sel gabus pada tumbuhan. Penemuan-penemuan Leeuwenhoek ini melahirkan ilmu baru yang sekarang dikenal dengan mikrobiologi. Akan tetapi perkembangan mikroskop tidak hanya sampai pada perkembangan

penemuan dan pembuatan mikroskop oleh Leewenhook. Perkembangan mikroskop masih terus berkembang sesuai dengan perkembangan zaman dan teknologi hingga sekarang ini maupun kedepannya yang menghasilkan berbagai jenis dan tipe mikroskop untuk digunakan dalam pengamatan objek mikroskopis (Suparti, 2010).

4.3 Bagian Mikroskop

Mikroskop pada umumnya terdiri dari bagian optik dan bagian mekanik (non optik). Bagian optik terdiri dari lensa okuler, lensa objektif , kondensor, diafragma dan cermin. Bagian mekanik (non optik) terdiri dari revolver, tabung mikroskop, lengan mikroskop, meja preparat, makrometer (pemutar kasar), mikrometer (pemutar halus) dan kaki mikroskop (Radhina et al, 2021)



Gambar 4.1. Bagian-bagian Mikroskop
(Sumber PT. Andaru Persada Mandiri 2020)

4.3.1 Lensa Okuler

Lensa okuler merupakan lensa yang terdapat di bagian ujung atas tabung mikroskop, letaknya berdekatan dengan mata pengamat. Lensa ini berfungsi untuk memperbesar bayangan yang dihasilkan oleh lensa obyektif. Lensa okuler biasanya memiliki perbesaran berkisar antara 4 - 25 x. Lensa okuler berfungsi sebagai kaca pembesar dan membentuk bayangan yang bersifat maya, tegak dan diperbesar.



Gambar 4.2. Lensa Okuler Mikroskop
(Sumber : microscopeworld.com)

4.3.2 Lensa Objektif

Lensa objektif merupakan lensa yang berdekatan dengan objek, bekerja dalam pembentukan bayangan pertama. Lensa ini menentukan struktur dan bagian renik yang akan terlihat pada bayangan akhir. Ciri penting lensa obyektif adalah memperbesar bayangan obyek dengan perbesaran beraneka macam sesuai dengan model dan pabrik pembuatnya, misalnya 10X, 40X, dan 100X dan mempunyai nilai aperture (NA). Nilai aperture adalah ukuran daya pisah suatu lensa obyektif yang akan menentukan daya pisah spesimen, sehingga mampu menunjukkan struktur renik yang berdekatan sebagai dua benda yang terpisah. Lensa objektif ini berfungsi membentuk bayangan cahaya ke dalam lubang diafragma.



Gambar 4.3. Lensa Objektif Mikroskop
(Sumber : microscopeworld.com)

4.3.3 Kondensor

Kondensor tersusun dari lensa gabungan, dapat diputar naik turun yang berfungsi mengumpulkan cahaya yang dipantulkan oleh cermin dan memusatkannya ke objek.

4.3.4 Diafragma

Diafragma berfungsi mengatur banyaknya sinar yang masuk dengan mengatur bukaan iris. Letak diafragma melekat pada diafragma di bagian bawah. Pada mikroskop sederhana hanya ada diafragma tanpa kondensor.



Gambar 4.4. Diafragma Mikroskop
(Sumber : microscopeworld.com)

4.3.5 Cermin

Cermin mempunyai dua sisi, sisi cermin datar dan sisi cermin cekung, berfungsi untuk memantulkan sinar dan sumber sinar. Cermin datar digunakan bila sumber sinar cukup terang, dan cermin cekung digunakan bila sumber sinar kurang. Cermin dapat lepas dan diganti dengan sumber sinar dari lampu. Pada mikroskop

model baru, sudah tidak lagi dipasang cermin, karena sudah ada sumber cahaya yang terpasang pada bagian bawah (kaki).

4.3.6 Revolver

Revolver yaitu bagian yang berfungsi untuk mengatur perbesaran lensa objektif yang diinginkan.

4.3.7 Tabung Mikroskop

Tabung mikroskop yaitu bagian yang berfungsi untuk menghubungkan lensa okuler dan lensa objektif mikroskop. Di bagian atas tabung melekat lensa okuler, dengan perbesaran tertentu (15X, 10X, dan 15 X). Di bagian bawah tabung terdapat alat yang disebut revolver. Pada revolver tersebut terdapat lensa objektif.

4.3.8 Lengan Mikroskop

Lengan mikroskop yaitu bagian yang berfungsi untuk tempat pengamat memegang mikroskop pada saat memindah mikroskop. Lengan mikroskop dapat ditegakkan atau direbahkan, dengan adanya engsel antara kaki dan lengan.

4.3.9 Meja Preparat

Meja preparat yaitu bagian yang berfungsi untuk tempat menempatkan objek yang akan diamati, pada meja benda terdapat penjepit objek, yang menjaga objek tetap ditempat yang diinginkan. Di bagian tengah meja terdapat lengan untuk dilewat sinar. Pada jenis mikroskop tertentu, kedudukan meja tidak dapat dinaik atau diturunkan. Pada beberapa mikroskop, terutama model terbaru, meja preparat dapat dinaik-turunkan.

4.3.10 Makrometer (Pengatur Kasar) dan Mikrometer (Pengatur Halus)

Komponen ini letaknya pada bagian lengan dan berfungsi untuk mengatur kedudukan lensa objektif terhadap objek yang akan dilihat. Pada mikroskop dengan tabung lurus/tegak, pengatur kasar dan halus untuk menaik-turunkan tabung sekaligus lensa objektif. Pada mikroskop dengan tabung miring, pengatur kasar dan halus untuk menaik-turunkan meja preparat. **Makrometer (pemutar**

kasar) berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tabung secara cepat untuk pengaturan mendapatkan kejelasan dari gambaran objek yang diinginkan, sedangkan **mikrometer (pemutar halus)** berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tabung secara lambat untuk pengaturan mendapatkan kejelasan dari gambaran objek yang diinginkan.

4.3.11 Kaki Mikroskop

Kaki mikroskop berfungsi menopang atau penyangga dan memperkokoh kedudukan mikroskop agar tetap pada tempat yang diinginkan dan juga untuk tempat memegang mikroskop saat mikroskop hendak dipindahkan. Pada kaki melekat lengan dengan semacam engsel, pada mikroskop sederhana (model student).

4.4 Macam-Macam Mikroskop

Ada dua jenis mikroskop berdasarkan pada kenampakan obyek yang diamati, yaitu mikroskop dua dimensi (mikroskop cahaya) dan mikroskop tiga dimensi (mikroskop stereo). Sedangkan berdasarkan sumber cahayanya, mikroskop dibedakan menjadi mikroskop cahaya dan mikroskop elektron (Bidlack dan Jansky, 2011).

4.4.1 Mikroskop Cahaya (Bidlack dan Jansky, 2011)

Mikroskop cahaya menggunakan cahaya sebagai media untuk mengirimkan gambar ke mata kita, yang berfungsi untuk mengamati bagian-bagian mikroskopis dan transparan. Sumber cahaya pada mikroskop cahaya bisa didapat dari berbagai sumber seperti cahaya matahari ataupun cahaya lampu penerang. Mikroskop cahaya memerlukan lensa untuk membantu menangkap dan memusatkan cahaya pada objek yang akan diamati. Biasanya mikroskop cahaya memiliki tiga lensa objektif dengan perbesaran lemah (4-10X), sedang (40 X), kuat (100X). Sedangkan untuk lensa okuler yang dimiliki oleh mikroskop cahaya memiliki perbesaran 10X. Jadi, perbesaran minimum yang dimiliki mikroskop cahaya sebesar 40-100 X dan perbesaran maksimumnya sebesar 1000 X. Mikroskop cahaya memiliki tiga sistem lensa, yaitu lensa obyektif, lensa okuler, dan kondensor. Lensa obyektif dan lensa okuler

terletak pada kedua ujung tabung mikroskop. Lensa okuler pada mikroskop bisa berbentuk lensa tunggal (monokuler) atau ganda (binokuler). Pada ujung bawah mikroskop terdapat tempat kedudukan lensa obyektif yang bisa dipasang tiga lensa atau lebih. Di bawah tabung mikroskop terdapat meja mikroskop yang merupakan tempat preparat. Sistem lensa yang ketiga adalah kondensor. Kondensor berperan untuk menerangi obyek dan lensa-lensa mikroskop yang lain.

Berdasarkan jumlah lensa okuler, mikroskop cahaya terdiri dari mikroskop monokuler, mikroskop binokuler dan mikroskop trinokuler. Sedangkan berdasarkan aplikasinya, mikroskop cahaya dapat dibedakan juga menjadi beberapa diantaranya yaitu:

1. Mikroskop Medan Terang (*Bright Field Microscope*)

a. Mikroskop Majemuk/ Compound (*Compound Microscope*)

Mikroskop compound memerlukan kualitas yang tinggi tidak hanya pada objektif dan okuler tapi juga pada kondensor. Mikroskop ini yang paling umum digunakan, objek yang digunakan harus tembus cahaya dan berbentuk 2D apabila pengamatan pada benda yang 3D maka akan ada *depth focus* dan ada bagian yang fokus dan ada bagian lain yang blur. Mikroskop compound dapat digunakan untuk mengamati spesimen yang lebih kecil seperti sel, jaringan, sampel darah, bakteri, virus, mikroorganisme kolam/air, dan benda kecil lainnya (World Health Organization, 1999). Mikroskop ini memiliki 3 sampai 5 lensa objektif dengan rentang pembesaran 4X hingga 100X. jika diasumsikan pembesaran lensa okuler 10X dan lensa objektif 100X, total pembesaran akan menjadi 1000X. Mikroskop majemuk adalah pilihan terbaik untuk digunakan pada laboratorium biologi atau forensik.



Gambar 4.5. Mikroskop Majemuk
(Sumber Bidlack dan Jansky, 2011, Alponsin, 2019)

b. Mikroskop Stereo (*Dissecting microscope*)

Suatu alat dengan lensa objektif. Lensanya harus berdiameter besar karena diatasnya akan dipasang sistem lensa lain yang terpisah dalam posisi parallel dan jalur sinar terpisah untuk mata kanan dan kiri. Mikroskop ini tidak memiliki kondensor, tapi memiliki ke dalaman bidang pandang dan jarak kerja yang panjang. Kekurangan utama dari tipe objek mikroskop stereo adalah bahwa aperture numerical dari sistem dibatasi oleh adanya jalur beam/cahaya ganda. Karenanya seseorang harus menggunakan mikroskop majemuk, yang memiliki objektif dengan diameter yang lebih besar dan karenanya meningkatkan aperture numerical. Mikroskop stereo dapat digunakan untuk mengamati spesiemen yang lebih besar, seperti serangga, daun, batu, permata, fosil, perangk, koin dan lainnya. Biasanya hanya pembesaran 6,5x hingga 45x yang dibutuhkan spesiemen untuk diamati.

Mikroskop stereo merupakan jenis mikroskop yang hanya bisa digunakan untuk benda yang berukuran relatif besar. Mikroskop stereo mempunyai perbesaran 7 hingga 30 kali. Benda yang diamati dengan mikroskop ini dapat terlihat

secara tiga dimensi. Komponen utama mikroskop stereo hampir sama dengan mikroskop cahaya. Lensa terdiri atas lensa okuler dan lensa obyektif. Beberapa perbedaan dengan mikroskop cahaya adalah: (1) ruang ketajaman lensa mikroskop stereo jauh lebih tinggi dibandingkan dengan mikroskop cahaya sehingga kita dapat melihat bentuk tiga dimensi benda yang diamati, (2) sumber cahaya berasal dari atas sehingga obyek yang tebal dapat diamati. Perbesaran lensa okuler biasanya 10 kali, sedangkan lensa obyektif menggunakan sistem zoom dengan perbesaran antara 0,7 hingga 3 kali, sehingga perbesaran total obyek maksimal 30 kali. Pada bagian bawah mikroskop terdapat meja preparat. Pada daerah dekat lensa obyektif terdapat lampu yang dihubungkan dengan transformator. Pengatur fokus obyek terletak disamping tangkai mikroskop, sedangkan pengatur perbesaran terletak diatas pengatur fokus.



Gambar 4.6. Mikroskop Stereo

(Sumber : Bidlack dan Jansky, 2011; Alponsin, 2019)

2. Mikroskop Fluorescence

Mikroskop fluorescence hampir sama dengan mikroskop cahaya biasa dengan tambahan fitur untuk meningkatkan kemampuannya. Pada mikroskop konvensional menggunakan cahaya tampak (400 - 700 nanometer) untuk iluminasi dan menghasilkan gambar sampel yang diperbesar. Sementara mikroskop fluorescence, sebaliknya,

menggunakan intensitas cahaya yang lebih tinggi, yang mengeksitasi bagian berpendar pada sampel (World Health Organization, 1999). Mikroskop fluorescence sering digunakan untuk menggambarkan fitur khusus dari spesimen kecil seperti mikroba. Juga digunakan untuk secara visual meningkatkan fitur 3-D pada skala kecil. Selain itu juga digunakan untuk studi viabilitas pada populasi sel, dan menampilkan materi genetik pada sel (DNA dan RNA).



Gambar 4.7. Mikroskop Fluorescence
(Sumber : Bidlack dan Jansky, 2011) Alponsin, 2019)

3. Mikroskop Fase Kontras

Mikroskop tersebut merupakan mikroskop cahaya, pada permukaan bawah meja objek dan lensa objektifnya dipasang sebuah perlengkapan pewarnaan fase kontras. Alat digunakan untuk melihat struktur sel dalam keadaan hidup secara teliti tanpa menggunakan bahan pewarna.



Gambar 4.8. Mikroskop Stereo
(Sumber (Bidlack dan Jansky, 2011; Alponsin, 2019))

4. Mikroskop Inverted (*Inverted Microscope*)/Mikroskop Terbalik

Mikroskop inverted adalah mikroskop cahaya dengan sumber cahaya dan kondensor terletak di atas meja objek (kebalikan dari mikroskop cahaya biasa), digunakan untuk pengamatan biakan jaringan (*tissue cultures*) dan sel hidup (*living cells*) yang ada di dasar wadah kaca seperti cawan Petri, labu kultur jaringan, dan lain-lain.

Kelebihan dari inverted microscope adalah kultur/sampel dapat ditempatkan dalam wadah yang relatif besar seperti cawan petri dan mengamatinya di bawah kondisi yang lebih alami tanpa batasan waktu, kondisi kerja lebih steril, dan sampel dapat tahan dalam periode yang lebih lama.

Sedangkan kekurangannya adalah harganya yang lebih mahal karena komponen yang lebih kompleks dan rumit, serta spesimen tidak dapat diamati melalui kaca yang tebal.



Gambar 4.9. Mikroskop Inverted
(Sumber PT LFC Teknologi Indonesia, 2022)

4.4.2 Mikroskop Elektron (Radhina et al, 2021)

Sebagai gambaran mengenai mikroskop elektron kita uraikan sedikit dalam buku ini. Mikroskop elektron mempunyai perbesaran sampai 100 ribu kali, elektron digunakan sebagai pengganti cahaya. Mikroskop elektron mempunyai dua tipe, yaitu mikroskop elektron scanning (SEM) dan mikroskop elektron transmisi (TEM). SEM digunakan untuk studi detil arsitektur permukaan sel (atau struktur renik lainnya), dan obyek diamati secara tiga dimensi. Sedangkan TEM digunakan untuk mengamati struktur detil internal sel.

Mikroskop ini memiliki daya pembesaran yang sangat tinggi (100.000 kali). Sumber cahaya berasal dari berkas-berkas elektron suatu lampu katoda. Fungsi mikroskop elektron untuk mikroorganisme yang sangat kecil seperti virus. Mikroskop ini dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Scannning electron microscope (SEM)* dan *Transmition electron microscope (TEM)*. Komponen utama yang sama antar SEM dan TEM adalah: Sumber elektron, Serangkaian lensa elektromagnetik dan elektrostatik untuk mengendalikan bentuk dan lintasan berkas elektron, Elektron Apertur. Semua komponen ini berada di dalam ruang yang berada di bawah vakum yang tinggi.



Gambar 4.10. Mikroskop Elektron; TEM (kiri) dan SEM (Kanan)
(Sumber Alponsin, 2019)

4.5 Penggunaan Mikroskop

Menurut (World Health Organization, 1999), berikut adalah tahapan cara menggunakan mikroskop secara umum pada mikroskop dengan jenis mikroskop cahaya (bukan mikroskop elektron):

1. Tempatkan mikroskop pada tempat datar kokoh, menghadap arah cahaya masuk ruangan (untuk mikroskop yang menggunakan cermin, bukan lampu), sedangkan mikroskop menggunakan sumber listrik letakkan dekat sumber listrik.
2. Periksa mikroskop, yakinkan bagian-bagiannya lengkap, bersih, dan berfungsi (tidak rusak/pecah), keadaan lensa bersih dan bila berdebu maka bersihkan dengan kertas pembersih khusus lensa, jangan menggunakan benda keras yang dapat menggores permukaan lensa.
3. Posisi cermin cekung mikroskop diatur sehingga cahaya direfleksikan melalui lubang pada meja (sambil diamati dari lensa okuler dengan lensa objektif/terkecil). Usahakan mendapat penyinaran menyeluruh, dan rata. Sumber cahaya paling sesuai adalah sinar matahari, dapat pula sinar yang berasal dari lampu ruangan. Cermin datar digunakan hanya bila pada siang hari dengan intensitas cahaya yang penuh. Pada mikroskop yang lebih bagus, dilengkapi lampu yang

terpasang, untuk mengatur penyinaran tinggal menyalakan lampu, dengan kombinasi kondensor pada posisi yang paling atas.

4. Diafragma diatur pada sumber sinar yang ada (jangan sampai terhalang yang menyebabkan berkurangnya cahaya masuk), untuk memperoleh penyinaran yang baik sehingga bayangan objek terlihat jelas. Untuk preparat transparan jangan terlalu banyak cahaya, sebab dapat menyebabkan bayangan menjadi kurang jelas, begitu juga preparat jaringan yang kurang tegas pewarnaannya. Kurangi luas diafragma $\pm$ setengahnya, dengan demikian akan dapat dirasakan (oleh mata pengamat), keadaan cahaya maksimum dan optimum. Untuk perbesaran kuat diperlukan lebih banyak cahaya.
5. Periksa preparat/slide dengan seksama agar dapat diketahui kedudukan objek yang akan diamati. Sebelum pengamatan, harus diperhatikan cara menjauhkan dan mendekatkan lensa objektif dengan objek pengamatan.
6. Letakkan slide/preparat pada meja/panggung mikroskop dan jepit sedemikian rupa sehingga objek selalu berada di tengah-tengah lubang pengatur cahaya (di tengah-tengah meja mikroskop). Harus selalu diperhatikan gelas penutup (*cover glass*) selalu di posisi atas.
7. Lensa objektif (gunakan perbesaran lemah dahulu) diturunkan sampai hampir menyentuh gelas penutup pada preparat sebelum diamati/dilihat melalui mikroskop.
8. Preparat diamati melalui lensa okuler, dengan hati-hati naikan tabung mikroskop (jauhkan lensa objektif perlahan-lahan dengan memutar pengatur kasar/makrometer) hingga bayangan objek terlihat jelas. Untuk menambah jelas bayangan objek, gunakan pengatur halus (mikrometer).
9. Preparat yang akan diamati diletakkan di tengah lubang lapang pandang panggung mikroskop dengan cara menggeser kaca benda. Sebagai ilustrasi: bayangan yang terbentuk oleh mikroskop adalah terbalik, dengan menggeser kaca benda ke kiri maka bayangan berpindah ke

- kanan. Menggeser kaca benda ke depan, bayangan bergeser ke belakang. Untuk tujuan mengamati struktur utama preparat, biasakan Anda memindahkan/menggeser objek yang diamati dengan cermat dan tepat.
10. Untuk mengganti ke perbesaran objek yang lebih kuat dilakukan dengan memutar revolver lensa objektif. Sebelum memutar revolver lensa objektif, terutama pada lensa yang lebih kuat perbesarannya, dekatkan bayangan objek yang diamati di tengah lapang pandang mikroskop. Angkat lensa objektif mikroskop kira-kira 0,5 inchi dengan memutar bonggol makrometer. Putar lensa objektif yang diinginkan ke sumbu optik hingga terdengar bunyi “klik”. Sebelum mengamati melalui lensa okuler, turunkan tabung mikroskop sehingga lensa objektif hampir menyentuh gelas penutup preparat. Atur kembali diafragma agar cahaya lebih banyak dan dilihat melalui lensa okuler, naikan tabung mikroskop perlahan-lahan (dengan uliran kasar/makrometer) sampai objek terlihat. Kembali pada perbesaran kuat. Perjelas dengan uliran halus (mikrometer).
 11. Mulai amati objek yang telah ditempatkan pada meja preparat, jika anda menggunakan mikroskop tipe monokuler, anda hanya bisa mengamati dengan salah satu mata. Jika anda menggunakan mikroskop tipe binokuler anda bisa mengamati dengan kedua mata. Dan jika anda menggunakan tipe mikroskop trinokuler dengan kamera yang sudah terpasang dengan baik, anda bisa melihat dalam monitor yang tersedia.
 12. Pengamatan objek dengan perbesaran kuat membutuhkan lebih banyak cahaya yang dibutuhkan. Cobalah Anda atur kembali diafragma atau keping pengatur cahaya sehingga diperoleh pencahayaan paling baik.
 13. Aturilah posisi preparat/slide menggunakan tangan kiri dan kontrol mikrometer (uliran halus) menggunakan tangan kanan untuk meningkatkan ketajaman objek pada posisi yang tepat untuk diamati. Untuk menghindari kelelahan akomodasi mata selama pengamatan, mata harus dibuat

rileks dan intensitas sinar yang digunakan diatur secukupnya. Kedua mata diusahakan selalu terbuka selama pengamatan (walaupun Anda menggunakan mikroskop monokuler). Usahakan Anda menggunakan mata kiri untuk pengamatan dan mata kanan untuk menggambar tanpa mengubah posisi kepala dari mikroskop. Ini sangat penting dalam mempelajari preparat histologi. istirahat/berhenti mengamati, praktikan harus mengubah posisi lensa objektif dengan mengangkat tabung mikroskop kira-kira satu inchi, lensa objektif digeser tidak ke arah preparat/slide. Sebelum mengambil preparat dari meja/panggung mikroskop, pindahkan dahulu lensa objektif perbesaran lemah ke sumbu optik di tengah-tengah penyinaran pada meja mikroskop.

DAFTAR PUSTAKA

- Alponsin, 2019, 'Pengenalan Jenis-Jenis mikroskop', gambar digital, Diakses 16 Juli 2024, <https://alponsin.wordpress.com/2019/06/12/pengenalan-jenis-jenis-mikroskop/>
- Bidlack, J. E and S. H. Jansky, 2011, '*STERN'S introductory plant biology*'. McGraw-Hill, New York, Hal 32 (1-622) <https://archive.org/details/sterns-introductory-plant-biology/page/30/mode/2up>
- Microscopeworld, 'How Do I Use a Microscope', <https://www.microscopeworld.com/p-3561-how-do-i-use-a-microscope.aspx>
- PT Andaru Persada Mandiri, 2020, 'Gambar Mikroskop Lengkap dengan Jenis dan Bagian ', Gambar digital, Diakses 16 Juli 2024, <https://andarupm.co.id/gambar-mikroskop/>
- PT LFC Teknologi Indonesia, 2022, 'Bagaimana Cara Kerja Inverted Microscope?', gambar digital, Diakses 16 Juli 2024, <https://www.lfc.co.id/blog/detail/cara-kerja-inverted-mikroskop>
- Radhina Afifa, Amalia Shari, Steven Arianto, 2021, *Modul Praktikum Instrumen Media Dan Reagensia*, Aceh, Yayasan Penerbit Muhammad Zaini.
- Respati, S. M. B., 2008, 'Macam-Macam Mikroskop Dan Cara Penggunaan', *Momentum*, 4 (2), 42-44. <https://publikasiilmiah.unwahas.ac.id/MOMENTUM/article/view/620>
- Suparti, 2010, *Mikroskop*, Semarang, ALPRIN, Diakses 17 Juli 2024. https://books.google.co.id/books?id=zZz-DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=id&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- World Health Organization, 1999, *The Microscope A Practical Guide. WHO Project: ICP TUB 001*. New Delhi, India.

BAB 5

METABOLISME BAKTERI

5.1 Pendahuluan

Semua organisme hidup, termasuk mikroba, memperoleh energi untuk mengembangkan molekul organik penyusun selnya untuk bertahan hidup. Mikroba memerlukan energi untuk:

1. Memperbaiki kerusakan sel dan memelihara struktur sel.
2. Sintesis komponen seluler seperti polisakarida, enzim dan asam nukleat.
3. Pengangkutan zat tertentu dari lingkungan ke dalam sel.
4. Tumbuh dan berkembang biak.
5. Pergerakan sel.

Metabolisme merupakan semua reaksi kimia yang terjadi dalam sel makhluk hidup (A'yun *et al.*, 2022). Reaksi kimia yang merubah senyawa komplek menjadi senyawa kimia sederhana disebut katabolisme. Sedangkan, reaksi kimia yang merubah senyawa kimia sederhana menjadi senyawa kimia kompleks disebut anabolisme (Hidayat *et al.*, 2020).

Mikroba yang menggunakan energi dari cahaya disebut fototrof, dan mikroba yang menggunakan energi dari bahan kimia disebut kemotrof. Mikroba yang hanya menggunakan senyawa anorganik seperti CO₂ sebagai sumber karbon disebut autotrof. Sebaliknya, heterotrof memerlukan setidaknya satu nutrisi organik, seperti glukosa, untuk menghasilkan senyawa organik lainnya.

Mikroba menggunakan berbagai proses kimia untuk menghasilkan energi biokimia dalam bentuk Adenosin Trifosfat (ATP). Sebaliknya, ATP akan dipecah menjadi Adenosin Difosfat (ADP) dan fosfat anorganik dan energi yang dilepaskan akan digunakan untuk pemeliharaan, reproduksi, dan kelangsungan hidup sel mikroba.

5.2 Glikolisis

Glikolisis merupakan pemecahan glukosa. Proses ini umum yang terjadi pada semua sel mikroba dan biasanya terjadi pada reaksi glukosa (karbon 6) membentuk dua molekul piruvat (karbon 3). Reaksi ini awalnya membutuhkan dua ATP, namun akhirnya menghasilkan empat molekul ATP. Hal ini disebabkan oleh fosforilasi jalur substrat. Beberapa Jalur yang digunakan dalam reaksi ini diantaranya adalah jalur *Embden-Meyerhof* (EMP), jalur *Entner-Dudoroff* (ED), dan jalur pentosa fosfat (PP).

5.2.1 Jalur Embden-Meyerhof (EMP)

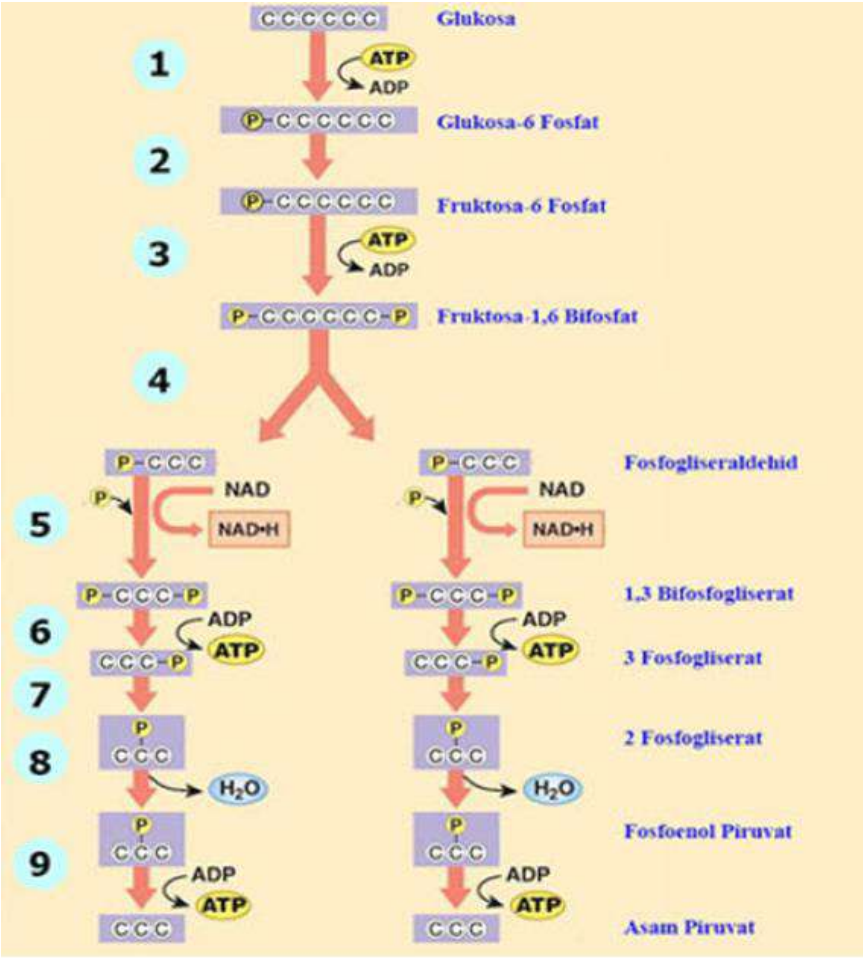
Glikolisis (jalur EMP) adalah jalur yang memecah glukosa menjadi asam piruvat dalam beberapa langkah. Tergantung pada mikroorganisme dan kondisinya, Reaksi glikolisi berfungsi sebagai langkah pertama dalam respirasi aerobik dengan oksigen atau Fermentasi. Glikolisis memiliki dampak yang signifikan terhadap Produksi sejumlah ATP, produksi asam piruvat dan suatu metabolit perantara yang penting.

Jalur EMP terdiri dari dua tahap: tahap persiapan (tahap 6 karbon) dan tahap konservasi energi (tahap 3 karbon). Pada langkah persiapan, glukosa difosforilasi oleh ATP untuk membentuk senyawa prekursor glukosa-6-fosfat dari jalur pentosa fosfat, yang kemudian diubah menjadi isomer fruktosa-6-fosfat dan ATP digunakan untuk memfosforilasi atom C1 fruktosa -6-fosfat membentuk senyawa fruktosa-1,6-. Bifosfat (A'yun *et al.*, 2022).

Fase Perubahan energi (fase 3-karbon) dimulai ketika fruktosa-1,6-bifosfat dipecah menjadi dua molekul dihidroksiaseton fosfat (DHAP) dan gliseraldehid-3-fosfat (G3P) yang masing-masing, mempunyai 3 molekul karbon. senyawa G3P pada fase ini akan menghasilkan NADH dan ATP. G3P diubah menjadi asam piruvat melalui langkah-langkah berikut: G3P dioksidasi dan secara bersamaan terfosforilasi untuk membentuk senyawa berenergi tinggi yang disebut 1,3-bifosfoglisarat, elektron yang dilepaskan mereduksi NAD⁺ menjadi NADH (A'yun *et al.*, 2022).

Fosfat pada C1 pada senyawa 1,3-bifosfoglisarat akan masuk ke ADP dan selanjutnya akan menghasilkan ATP dan senyawa 3 fosfoglisarat. Senyawa 3 fosfoglisarat akan melepaskan fosfat pada

atom C3 sehingga akan terbentuk ADP dan asam piruvat (A'yun *et al*, 2022).

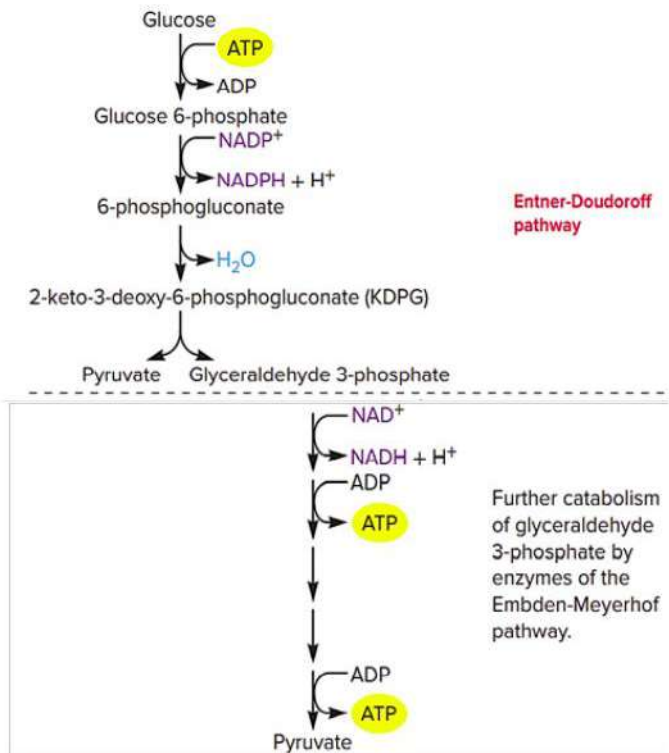


Entner-Doudoroff (ED).

Ditemukan pada beberapa kelompok fungi, dan beberapa jenis bakteri contohnya *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*. Bakteri gram positif tidak menggunakan Jalur Entner-Doudoroff untuk melakukan pemecahan glukosa (Dewi Rahmawati, 2019).

Pengujian kemampuan mengoksidasi glukosa melalui jalur ini kadang-kadang digunakan di laboratorium klinis untuk mengidentifikasi *Pseudomonas* (Tortora, Funke and Case, 2010).

Jalur ini menghasilkan asam piruvat dan G3P (Gliserldehid-3-Fosfat). Zat antara utama dalam jalur ini adalah 2-keto-3-deoksi-6-fosfoglukonat (KDPG), yang terbentuk dari glukosa dalam tiga reaksi yang menggunakan ATP untuk menghasilkan NADPH. KDPG terdegradasi menjadi piruvat dan G3P, dan G3P diubah menjadi asam piruvat lain dengan langkah yang sama seperti jalur EMP (A'yun *et al.*, 2022).



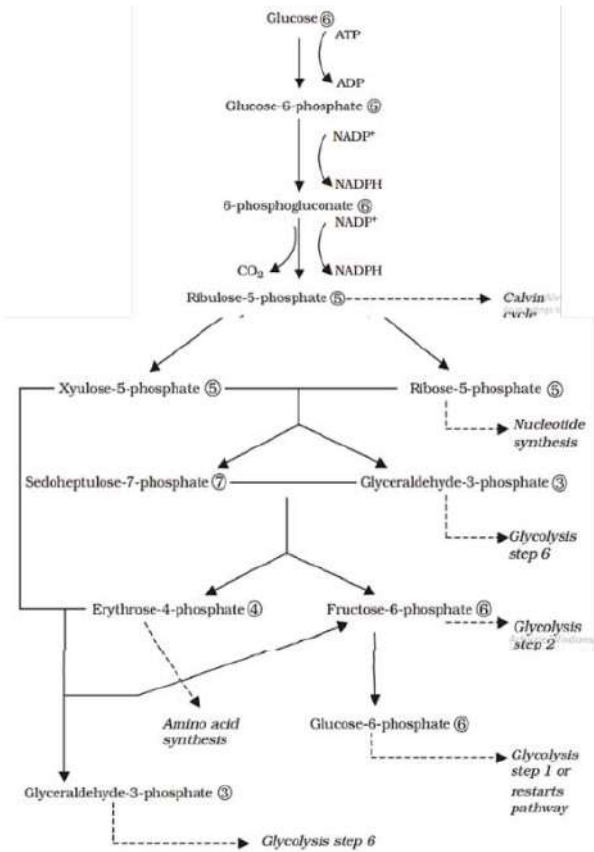
Gambar 5.1. Jalur Entner-Doudoroff
Sumber (A'yun *et al.*, 2022).

Dalam hal ini, dua ATP dan satu NADH terbentuk. Bakteri yang menggunakan jalur ED juga memiliki enzim yang bekerja pada fase tiga karbon dari jalur EMP. (A'yun *et al.*, 2022).

5.2.2 Jalur pentosa fosfat (PP)

Jalur Pentafosfat atau biasa disebut jalur Heksosa monfosfat (HMF) dapat ditemukan pada beberapa jenis mikroba, misalnya

Ciri utama jalur ini adalah produksi zat antara pentosa, yang digunakan sebagai prekursor dalam biosintesis molekul penting. Misalnya, ribosa-5-fosfat merupakan prekursor penting dalam sintesis nukleotida, sedangkan eritrosa-4-fosfat, yang memiliki empat karbon, merupakan prekursor penting dalam sintesis nukleotida. Sintesis asam amino tertentu dan ribosa-5 diperlukan. fosfat adalah produk antara dari siklus (A'yun *et al.*, 2022).



5.2.3 Derkaboksilasi Oksidasi asam piruvat

Dekaboksilasi asam Piruvat Merupakan reaksi kimia awal sebelum terjadinya siklus kreesb dan berlangsung di dalam organel mitokondia. Pada reaksi ini terjadi pengubahan asam piruvat menjadi menjadi molekul asetil-CoA yang merupakan jenis senyawa

berkarbon dua. Selain terjadi terbentuk NADH di setiap perubahan yang terjadi pada molekul asam piruvat menjadi asetil CoA.

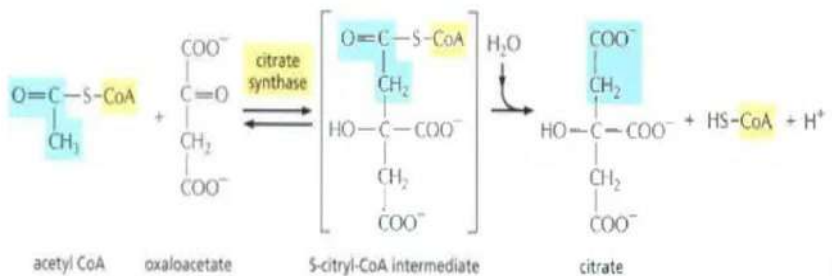
5.2.4 Siklus Krebs

Pada mikroorganisme aerobik, asam piruvat akan diubah menjadi Karbon dioksida (CO_2) dan Air (H_2O) dengan memasuki siklus krebs atau lebih dikenal dengan siklus asam sitrat karena pada siklus ini menghasilkan asam sitrat.

Pada sel prokariotik, proses ini terjadi di sitoplasma, sedangkan pada sel eukariotik terjadi di mitokondria. Asam Piruvat tidak langsung masuk ke siklus Krebs, tetapi harus diubah terlebih dahulu menjadi asetil koenzim A (asetil KoA). Asetil-KoA merupakan senyawa antara yang penting. Asetil CoA dapat berasal dari pemecahan Lipid dan asam amino. Asetil CoA yang terbentuk akan memasuki siklus Krebs. (A'yun *et al.*, 2022).

Tahap 1

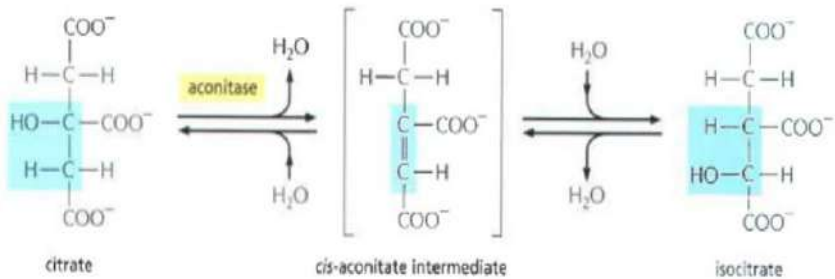
Asetil CoA yang memiliki 2 atom karbon akan berikatan dengan asam oksaloasetat yang memiliki 4 atom karbon sehingga terbentuk asam sitrat, yang dikatalisis oleh enzim sitrat sintase.



Gambar 5.3. Reaksi Tahap 1 pada Siklus Krebs

Tahap 2

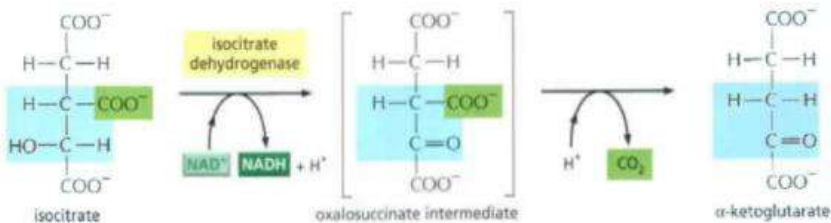
Asam sitrat dengan enzim Aconitase akan membentuk senyawa iso sitrat. Pada Reaksi terjadi 2 peristiwa Dehidrasi (Pelepasan Molekul air) dan Dehidrasi (Penambahan Molekul air).



Gambar 5.4. Reaksi Tahap 2 pada Siklus Krebs

Tahap 3

Asam isositrat yang memiliki karbon 6 dengan enzim Isositrat dehidrogenase akan dirubah menjadi α -ketoglutarat yang memiliki karbon 5. Pada reaksi ini terjadi pelepasan ikatan sehingga ada elektron yang dilepaskan. Elektron yang dilepaskan akan diterima oleh NAD⁺ sehingga akan terbentuk NADH dan pada reaksi terjadi proses derkaboksilasi.

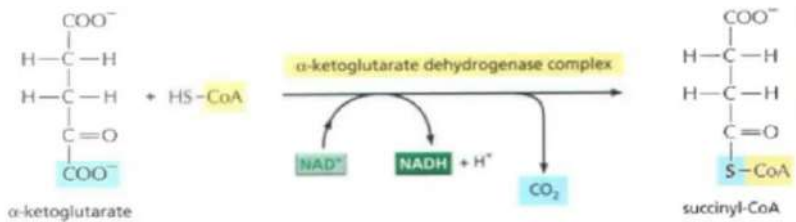


Tahap 3 Isositrat Dehidrogenase

Gambar 5.5. Reaksi Tahap 3 pada Siklus Krebs

Tahap 4

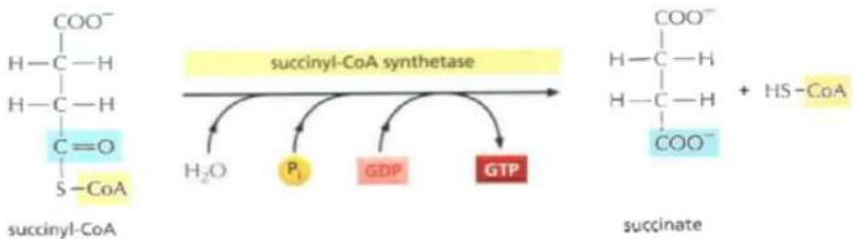
α -ketoglutarat yang memiliki 5 atom karbon akan diubah menjadi Suksinil-CoA yang memiliki 4 atom carbon dengan bantuan α -ketoglutarat dehydrogenase. Terjadi proses dekarboksilasi 1 atom karbon, atom karbon tersebut lepas membentuk CO₂. Terjadi reduksi NAD⁺ sehingga membentuk NADH. Suksinil akan berikatan dengan CoA menjadi Suksinil-CoA.



Gambar 5.6. Reaksi Tahap 4 pada Siklus Krebs

Tahap 5

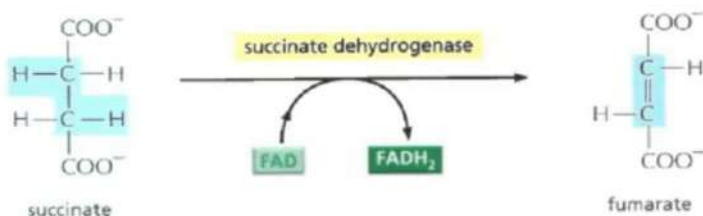
Suksinil CoA yaitu senyawa yang memiliki 4 karbon dengan bantuan enzim Suksinil CoA Sintase akan dirubah menjadi asam suksinat. Fosfat in (P_i) akan berperan sebagai pemutus ikatan CoA yang terdapat pada Suksinil sehingga CoA akan dilepaskan dan Fosfat in akan berikatan dengan GDP membentuk GTP. Fosfat yang terbentuk akan ditransferkan menjadi ADP sehingga terbentuk ATP.



Gambar 5.7. Reaksi Tahap 5 pada Siklus Krebs

Tahap 6

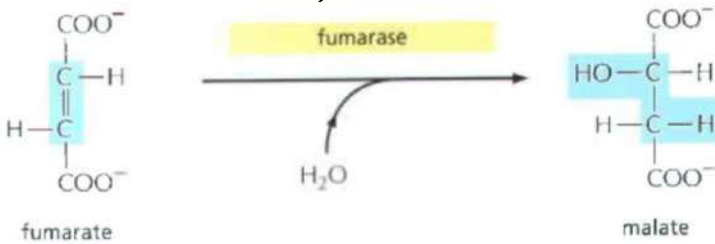
Suksinat akan dirubah menjadi fumarat dengan bantuan enzim Suksinat dehidrogenase . Pada reaksi ini terjadi pelepasan elektron yang akan di tangkap oleh FAD^+ untuk membentuk FADH_2 .



Gambar 5.8. Reaksi Tahap 6 pada Siklus Krebs

Tahap 7

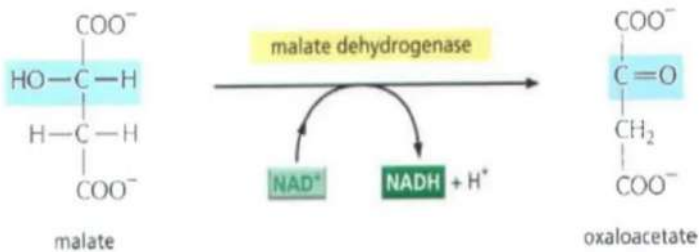
Fumarat dengan bantuan enzim Fumarase akan diubah menjadi Asam malat. Pada reaksi ini terjadi reaksi Hidrasi.



Gambar 5.9. Reaksi Tahap 7 pada Siklus Krebs

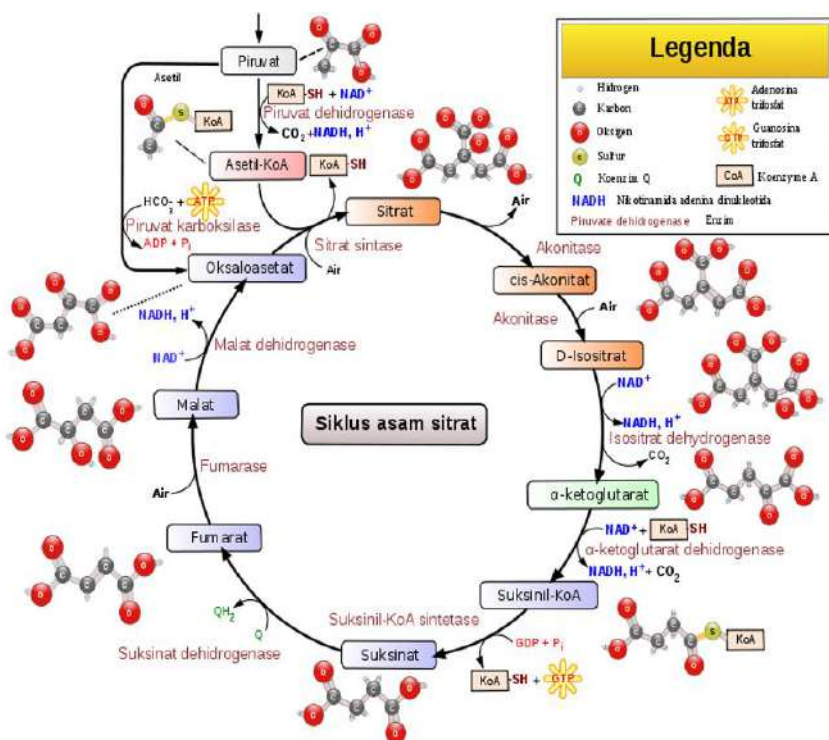
Tahap 8

Asam Malat dengan bantuan Enzim Malat dehidrogenase akan membentuk asam Oksaloasetat. Pada Reaksi ini Reduksi NAD^+ menjadi NADH .



Gambar 5.10. Reaksi Tahap 8 pada Siklus Krebs

Hasil akhir Pada Siklus Krebs adalah 6 Molekul NADH , 2 molekul FADH_2 , 4 Molekul CO_2 dan 2 molekul ATP .



Gambar 5.11. Siklus Krebs Secara lengkap sumber (Hogg S, 2013).

Transpor elektron

Transpor elektron adalah peristiwa pemindahan elektron yang disusun oleh senyawa NADH dan FADH dari satu substrat ke substrat yang lain secara berantai dengan diikuti oleh pembentukan ATP melalui Fosforilasi oksidatif yang merupakan proses penambahan sejumlah gugus fosfat kedalam molekul ADP. Selama transpor elektron, oksigen berperan sebagai penerima elektron, sehingga NADH dan FADH, yang bertindak sebagai senyawa pereduksi dan menghasilkan ion hidrogen, juga dihasilkan pada saat yang bersamaan. Setiap molekul NADH menghasilkan tiga molekul ATP, sedangkan setiap molekul FAD menghasilkan dua molekul ATP (Dewi Rahmawati, 2019).

5.3 Fermentasi

Fermentasi adalah Proses yang berlangsung dalam keadaan anaerob, dimana dalam proses ini tidak melibatkan transfer elektron yang dikatalis oleh enzim yang terdapat dalam membran sel (Fifendy, 2017).

Jika oksigen tidak tersedia untuk respirasi aerobik, mikroorganisme dapat mengoksidasi asam piruvat secara tidak sempurna melalui fermentasi untuk menghasilkan berbagai produk akhir. Fermentasi adalah proses di mana molekul organik berupa karbohidrat dipecah oleh mikroorganisme tanpa keterlibatan. Proses ini menghasilkan energi melalui fosforilasi pada tingkat substrat.

Dua jalur fermentasi utama adalah produksi etanol dan asam laktat. Fermentasi alkohol biasanya terjadi pada ragi, di mana dua molekul piruvat dalam jalur glikolitik diubah menjadi dua molekul asetaldehida dan dua molekul CO_2 , dan dua molekul asetaldehida direduksi menjadi dua molekul etanol oleh NADH. Reaksi ini tidak menghasilkan ATP. Fermentasi adalah proses yang sangat tidak efisien untuk produksi energi, karena ATP hanya diproduksi melalui glikolisis.

DAFTAR PUSTAKA

- A'yun, Q. *et al.* (2018) *Mikrobiologi Dasar*. 1st edn. Medan.
- A'yun, Q. *et al.* (2022) *Mikrobiologi Dasar*. 1st edn. Bogor: Yayasan kita menulis.
- Dewi Rahmwati (2019) *Mikrobiologi Farmasi*. Yogyakarta: Pustaka Baru Press.
- Fifendy, M. (2017) *Mikrobiologi*. 1st edn. jakarta: Kencana.
- Hidayat, N. *et al.* (2020) *Teknologi Fermentasi*. Bogor: Penerbit IPB press.
- Hogg S (2013) 'Essential Microbiology Second Edition'.
- Tortora, G.J., Funke, B.R. and Case, C.L. (2010) *Microbiology: An Introduction*. San Francisco: Benjamin Cummings.

BIODATA PENULIS



Anik Kusmiatun, S.Pd.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Budi Daya Ikan
Politeknik Kelautan dan Perikanan Jembrana

Penulis lahir di Grobogan, Jawa Tengah pada 26 Maret 1987. Penulis menempuh pendidikan dasar hingga menengah atas di Purwodadi, Kabupaten Grobogan, Jawa Tengah. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Pendidikan Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta. Penulis melanjutkan Pendidikan S2 pada Program Studi Mikrobiologi, Institut Pertanian Bogor, pada tahun 2012-2014. Penulis telah mengabdikan dirinya sebagai pendidik sejak tahun 2010 hingga sekarang.

Sejak tahun 2021, penulis bertugas sebagai dosen tetap pada Program Studi Budi Daya Ikan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Jembrana, Bali. Perguruan Tinggi Kedinasan tempat penulis bekerja menyelenggarakan pendidikan vokasi di bawah naungan Pusat Pendidikan, BPPSDM, Kementerian Kelautan dan Perikanan. Bidang ilmu yang diampu oleh penulis antara lain Mikrobiologi, Bioteknologi, serta Biologi Reproduksi Ikan. Selain aktif melaksanakan Tri Dharma Perguruan Tinggi, penulis juga aktif menulis artikel hasil penelitian yang telah dipublikasikan di beberapa jurnal ilmiah.

BIODATA PENULIS



Apt. Muhammad Subhan A. Sibadu, S.Farm., M.Si

Dosen Program Studi Farmasi

Fakultas Kedokteran Universitas Khairun Ternate

Penulis di lahirkan di Pinrang pada tanggal 15 November 1990. Setelah lulus dari SMA Negeri 6 Banjarmasin pada tahun 2009, Penulis memulai pendidikan jenjang Sarjana di UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN) ALAUDDIN MAKASSAR sejak tahun 2009 hingga selesai di tahun 2013 pada prodi Farmasi. Setelah menempuh jenjang Sarjana, penulis melanjutkan pendidikan PROGRAM PROFESI APOTEKER pada tahun 2014 di UNIVERSITAS HASANUDDIN MAKASSAR, kemudian melanjutkan pendidikan Magister pada tahun 2015 dengan konsentrasi FARMASI KLINIK di kampus yang sama yaitu di UNIVERSITAS HASANUDDIN MAKASSAR dan selesai pada tahun 2017. Riwayat pekerjaan yang dimiliki oleh penulis yaitu pernah bekerja di salah satu Apotek Swasta yang sekaligus merupakan klinik praktik dokter spesialis anak di Kota Makassar selama 4 tahun sebagai APJ (Apoteker Penanggung Jawab). Saat ini penulis bekerja sebagai dosen di Program Studi S1 Farmasi, Fakultas Kedokteran Universitas Khairun Ternate. Selain itu saat ini penulis juga aktif menjadi pengurus Ikatan Apoteker Indonesia (IAI) Cabang Kota Ternate. Sehari-harinya penulis bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Farmasi klinik, Farmakologi klinik, Manajemen Farmasi, Farmasi

Industri, Mikrobiologi dan Virologi dan Analisis Mikrobiologi, Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis *book chapter*.

BIODATA PENULIS



Nur Laili Dwi Hidayati, M.Si.

Dosen Program Studi S1 Farmasi

Fakultas Farmasi Universitas Bakti Tunas Husada Tasikmalaya

Penulis lahir di Banyumas, 19 Agustus 1981. Penulis merupakan dosen tetap di program studi S1 Farmasi, Fakultas Farmasi, Universitas Bakti Tunas Husada Tasikmalaya, bidang peminatan bahan alam farmasi. Penulis menamatkan pendidikan sarjana di Program Studi Biologi, Fakultas Biologi, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto pada tahun 2004. Kemudian menyelesaikan Magister Biologi di kampus yang sama pada tahun 2012. Memulai karir menjadi dosen tahun 2013 dan sekarang. Selain mengajar, penulis juga melakukan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat. Penulis telah menerbitkan buku dan juga mempublikasikan beberapa artikel di jurnal nasional terakreditasi SINTA. Penulis juga aktif mengikuti seminar nasional, pelatihan dan kegiatan ilmiah lainnya. Moto hidupnya adalah “Di dunia ini tidak ada penyesalan, yang ada hanyalah Cinta kepada Alloh SWT dan Rosul-Nya”. Penulis dapat dihubungi melalui email: nurlailidwi@universitas-bth.ac.i

BIODATA PENULIS



apt Hendri Satria kamal Uyun M.Farm

Dosen Program Studi S1 Farmasi

Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi Padang (STIFARM Padang)

Penulis lahir di Tanjung Pinang tanggal 9 Agustus 1993. Penulis adalah dosen tetap pada bidang Biologi Farmasi STIFARM Padang. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Farmasi Pada Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia Perintis Padang kemudian melanjutkan pendidikan Profesi Apoteker Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas dan melanjutkan Pendidikan S2 Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas. Mata kuliah yang diampu antara lain Botani Farmakognosi 1, Farmakognosi 2 dan Fitokimia. Penulis juga telah menerbit buku diantaranya adalah Farmakognosi, Ilmu bahan Makanan dan Ilmu pangan. Selama menjalankan tridarma perguruan tinggi dibidang penelitian, penulis berhasil mendapatkan hibah untuk Penelitian Dosen Pemula oleh Kemdikbudristek Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian Kepada Masyarakat sebagai pemberi dana penelitian tahun 2023 dan 2024. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada STIFARM Padang atas dukungannya dalam penulisan dan penerbitan buku ini.