

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Penulis:

Seftiwan Pratami Djasfar, M.Si.
Narwati, S.Si., M.Kes.
dr. Ronald Aprianto Parubak, Sp.MK.
apt. Muhammad Akmal A Sukara, S.Farm., M.Si.
drh. Dicky Andiarsa, M.Ked.
apt. Mitha Dwi Puspitasari, M.Farm.
apt. Wiwit Zuriati Uno, S.Farm., M.Si.
Siti Raudah, S.Si., M.Si.
Dr. Ir. Iva Rustanti Eri W, M.T.
Dr. Sulistiowati, S.Si., M.Si.
Bina Rachma Permatasari, S.KM., MKM.

Editor:

Dr. Ratna Umi Nurlila, M.Sc.
Dr. Nurhayu Malik, M.Sc.



PENERBIT CV.EUREKA MEDIA AKSARA

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Penulis : Seftiwan Pratami Djasfar, M.Si. | Narwati, S.Si.,
M.Kes. | dr. Ronald Aprianto Parubak, Sp.MK.
| apt. Muhammad Akmal A Sukara, S.Farm.,
M.Si. | drh. Dicky Andiarsa, M.Ked. |
apt. Mitha Dwi Puspitasari, M.Farm. |
apt. Wiwit Zuriati Uno, S.Farm., M.Si. | Siti
Raudah, S.Si., M.Si. | Dr. Ir. Iva Rustanti Eri W,
M.T. | Dr. Sulistiowati, S.Si., M.Si. | Bina
Rachma Permatasari, S.KM., MKM.

Editor : Dr. Ratna Umi Nurlila, M.Sc.
Dr. Nurhayu Malik, M.Sc.

Desain Sampul : Firman Isma'il

Tata Letak : Rizki Rose Mardiana

ISBN :

Diterbitkan oleh : **EUREKA MEDIA AKSARA, OKTOBER 2025**
ANGGOTA IKAPI JAWA TENGAH
NO. 225/JTE/2021

Redaksi:

Jalan Banjaran, Desa Banjaran RT 20 RW 10 Kecamatan Bojongsari
Kabupaten Purbalingga Telp. 0858-5343-1992

Surel : eurekamediaaksara@gmail.com

Cetakan Pertama : 2025

All right reserved

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh
isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun,
termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman
lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan buku ini. Penulisan buku merupakan buah karya dari pemikiran penulis yang diberi judul “Mikrobiologi Lingkungan”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan karya ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih pada semua pihak yang telah membantu penyusunan buku ini. Sehingga buku ini bisa hadir di hadapan pembaca.

Buku Mikrobiologi Lingkungan yang berada ditangan pembaca ini disusun dalam 11 Bab yaitu:

- Bab 1 Jenis-Jenis Mikroorganisme Lingkungan
- Bab 2 Fisiologi Mikroba
- Bab 3 Pertumbuhan Mikroba
- Bab 4 Habitat Mikroorganisme
- Bab 5 Interaksi Mikroba
- Bab 6 Siklus Nutrisi
- Bab 7 Inokulasi dan Isolasi Mikroorganisme
- Bab 8 Sterilisasi dan Desinfeksi
- Bab 9 Peran Mikroorganisme dalam Proses Pengolahan Air Limbah (Aerob dan Anaerob)
- Bab 10 Mikroorganisme untuk Membersihkan Polutan
- Bab 11 Mikroorganisme dalam Bioteknologi Lingkungan

Akhir kata penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga buku ini akan membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB 1 JENIS-JENIS MIKROORGANISME	
LINGKUNGAN	
Oleh: Seftiwan Pratami Djasfar, M.Si.....	1
A. Prokariotik.....	2
B. Eukariotik	9
C. Virus.....	15
DAFTAR PUSTAKA.....	18
BAB 2 FISILOGI MIKROBA	
Oleh: Narwati, S.Si., M.Kes.....	23
A. Pendahuluan	23
B. Sejarah Perkembangan Filogenetik Organisme	24
C. Sifat, Karakter Fisiologi Bakteri	25
D. Ruang Lingkup Fisiologi Mikroba	28
E. Konsep Fisiologis.....	29
DAFTAR PUSTAKA.....	46
BAB 3 PERTUMBUHAN MIKROBA	
Oleh: dr. Ronald Aprianto Parubak, Sp.MK.....	47
A. Pendahuluan	47
B. Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan	
Mikroba.....	48
C. Pertumbuhan Bakteri.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	57
BAB 4 HABITAT MIKROORGANISME	
Oleh: apt. Muhammad Akmal A Sukara, S.Farm.,	
M.Si.....	58
A. Pendahuluan	58
B. Pengertian Habitat dan Ekologi	
Mikroorganisme	59
C. Hubungan Mikroorganisme dengan	
Lingkungannya.....	62
D. Klasifikasi Habitat Mikroorganisme	65
E. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Habitat	
Mikroorganisme	68

	F. Peranan Habitat terhadap Keanekaragaman Mikroorganisme.....	71
	G. Peranan Mikroorganisme Tanah	73
	H. Mikroorganisme Aquatik Bersifat Patogen.....	75
	DAFTAR PUSTAKA	78
BAB 5	INTERAKSI MIKROBA	
	Oleh: drh. Dicky Andiarsa, M.Ked.	81
	A. Pendahuluan	81
	B. Konsep Dasar Interaksi Mikroba	81
	C. Klasifikasi Interaksi Mikroba	82
	D. Faktor yang Mempengaruhi Interaksi Mikroba	84
	E. Mekanisme Interaksi Mikroba	87
	F. Interaksi Mikroba di Berbagai Ekosistem.....	87
	G. Aplikasi dan Implikasi	88
	H. Studi Kasus	89
	I. Tantangan dan Arah Penelitian	90
	J. Kesimpulan.....	91
	DAFTAR PUSTAKA	92
BAB 6	SIKLUS NUTRISI	
	Oleh: apt. Mitha Dwi Puspitasari, M.Farm.....	95
	A. Siklus Karbon	96
	B. Siklus Nitrogen	98
	C. Siklus Sulfur	100
	D. Siklus Fosfor	102
	E. Siklus Besi dan Logam Lain	103
	F. Implikasi Lingkungan.....	103
	G. Kesimpulan.....	104
	DAFTAR PUSTAKA	105
BAB 7	INOKULASI DAN ISOLASI MIKROORGANISME	
	Oleh: apt. Wiwit Zuriati Uno, S.Farm., M.Si.	108
	A. Pendahuluan	108
	B. Konsep Dasar Inokulasi	110
	C. Metode dan Tahapan Inokulasi	111
	D. Tahapan Umum Inokulasi.....	113
	E. Konsep Dasar Isolasi	114
	F. Metode dan Teknik Isolasi.....	115

	G. Aplikasi dan Tantangan	118
	DAFTAR PUSTAKA.....	120
BAB 8	STERILISASI DAN DESINFEKSI	
	Oleh: Siti Raudah, S.Si., M.Si.....	122
	A. Pendahuluan	122
	B. Sterilisasi.....	125
	C. Desinfeksi	134
	DAFTAR PUSTAKA.....	144
BAB 9	PERAN MIKROORGANISME DALAM PROSES PENGOLAHAN AIR LIMBAH (AEROB DAN ANAEROB)	
	Oleh: Dr. Ir. Iva Rustanti Eri W, MT	146
	A. Mikroorganisme Hadir dalam Air dan Air Limbah	146
	B. Sumber Energi dan Karbon untuk Sel Mikroba	147
	C. Metabolisme Mikroorganisme.....	148
	D. Pembangkit Energi dalam Sel Mikroba.....	151
	E. Ekologi Pengolahan Air Limbah Biologis	155
	DAFTAR PUSTAKA.....	168
BAB 10	MIKROORGANISME UNTUK MEMBERSIHKAN POLUTAN	
	Oleh: Dr. Sulistiowati, S.Si., M.Si.....	170
	A. Mikroorganisme sebagai Agen Bioremediator.....	170
	B. Mekanisme Degradasi Polutan.....	172
	C. Teknik dan Strategi	173
	D. Jenis – Jenis Mikroorganisme dan Aplikasinya.....	174
	E. Tantangan.....	175
	F. Biodegradasi Kontaminan Baru	176
	DAFTAR PUSTAKA.....	177
BAB 11	MIKROORGANISME DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN	
	Oleh: Bina Rachma Permatasari, S.KM., MKM.....	180
	A. Pendahuluan	180
	B. Mekanisme Kerja Mikroorganisme.....	181
	C. Klasifikasi Mikroorganisme dalam Bioteknologi Lingkungan.....	183

D. Aplikasi Mikroorganisme dalam Bioteknologi	
Lingkungan.....	184
E. Teknologi dan Inovasi.....	185
F. Studi Kasus	187
DAFTAR PUSTAKA	189
TENTANG PENULIS	191



MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Penulis:

Seftiwan Pratami Djasfar, M.Si.

Narwati, S.Si., M.Kes.

dr. Ronald Aprianto Parubak, Sp.MK.

apt. Muhammad Akmal A Sukara, S.Farm., M.Si.

drh. Dicky Andiarsa, M.Ked.

apt. Mitha Dwi Puspitasari, M.Farm.

apt. Wiwit Zuriati Uno, S.Farm., M.Si.

Siti Raudah, S.Si., M.Si.

Dr. Ir. Iva Rustanti Eri W, M.T.

Dr. Sulistiowati, S.Si., M.Si.

Bina Rachma Permatasari, S.KM., MKM.

Editor:

Dr. Ratna Umi Nurlila, M.Sc.

Dr. Nurhayu Malik, M.Sc.



BAB

1

JENIS-JENIS MIKROORGANISME LINGKUNGAN

Seftiwan Pratami Djasfar, M.Si.

Mikrobiologi lingkungan merupakan salah satu cabang dari ilmu mikrobiologi yang mempelajari mikroorganisme dalam habitat alaminya, serta interaksi yang terjadi baik antar mikroorganisme maupun antara mikroorganisme dengan lingkungannya. Kajian ini berfokus pada ekologi mikroba, yaitu disiplin ilmu yang mengeksplorasi bagaimana mikroorganisme berperan dan beradaptasi dalam berbagai kompartemen lingkungan seperti tanah, air, dan udara. Interaksi ini memiliki dampak penting terhadap fungsi ekosistem dan keseimbangan lingkungan secara keseluruhan (Brock *et al.*, 2019). Selain itu, mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan siklus biogeokimia utama, seperti siklus nitrogen, karbon, dan sulfur. Mereka terlibat secara aktif dalam proses-proses vital seperti daur ulang nutrisi, dekomposisi bahan organik, serta transfer energi di dalam ekosistem. Kontribusi ini menjadikan mikroorganisme sebagai komponen kunci dalam menjaga stabilitas dan keberlanjutan lingkungan (Madigan *et al.*, 2020).

Mikroorganisme yang ada di lingkungan umumnya meliputi berbagai kelompok, seperti bakteri (termasuk aktinomisetes), archaea, jamur, protozoa, alga, dan virus. Mikroba-mikroba ini berasal dari habitat seperti tanah, air, dan udara, dan memiliki kemampuan luar biasa untuk menyesuaikan diri dengan berbagai kondisi lingkungan, mulai dari suhu, potensi redoks, pH,

kelembapan, hingga tekanan. Adaptasi ini membedakan mereka dari mikroba yang hidup di dalam tubuh manusia, yang cenderung hidup dalam kondisi lingkungan yang stabil dan biasanya sulit bertahan jika dilepaskan ke lingkungan luar. Selain itu, mikroorganisme lingkungan juga dapat bertahan dalam kondisi oligotrofik, yaitu lingkungan dengan ketersediaan nutrisi yang sangat rendah, hampir seperti “keadaan kelaparan.” Kemampuan adaptasi ini memungkinkan mikroba untuk hidup di hampir semua jenis habitat, termasuk area yang ekstrem seperti gurun, hutan, bahkan wilayah Arktik yang sangat dingin (Pepper *et. al.*, 2015).

Berikut ini berbagai jenis mikroba yang ditemukan di lingkungan, termasuk ciri-ciri strukturalnya, serta beberapa fungsi dan dampak utamanya, tidak hanya terhadap kesehatan dan kesejahteraan manusia, tetapi juga terhadap lingkungan:

A. Prokariotik

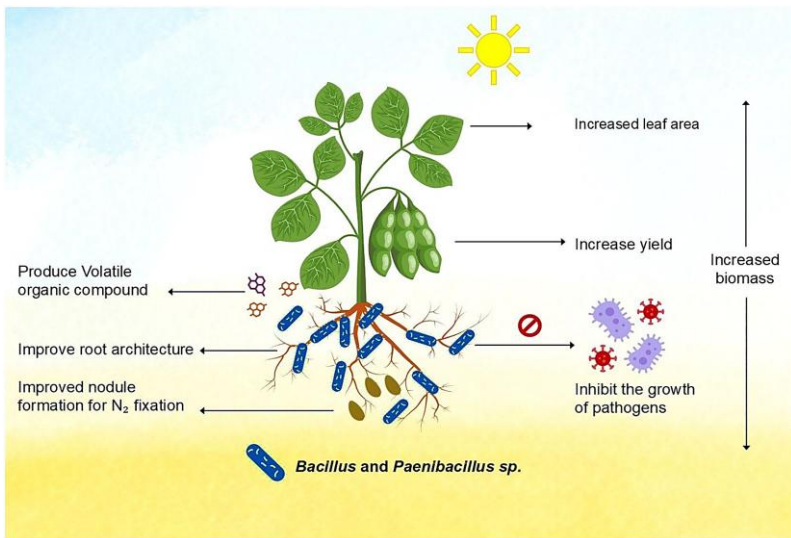
Sel prokariotik adalah sel yang tidak memiliki membran di dalamnya untuk membungkus inti atau organel. Materi genetiknya tersebar bebas di sitoplasma. Organelnya hanya ribosom, dan sel ini tidak punya organel kompleks seperti mitokondria (Rahmadina *et. al.*, 2024).

1. Bakteri

Bakteri adalah mikroorganisme hidup yang paling sederhana, namun mereka memiliki kemampuan metabolisme yang sangat beragam dan fleksibel. Keanekaragaman bakteri sangat luas, dan memainkan peran penting dalam berbagai proses lingkungan yang bermanfaat bagi manusia dan alam, seperti fiksasi nitrogen. Di sisi lain, beberapa bakteri juga menjadi penyebab penyakit pada manusia, hewan, dan tumbuhan. Berdasarkan analisis urutan gen 16S rRNA yang konservatif, diperkirakan terdapat lebih dari 50 filum bakteri yang berbeda (Schloss & Handelsman, 2004).

Bakteri diketahui memiliki selubung sel. Pada bakteri Gram positif, seperti pada *Bacillus* dan *Clostridium*, selubung sel membantu mereka bertahan terhadap kondisi

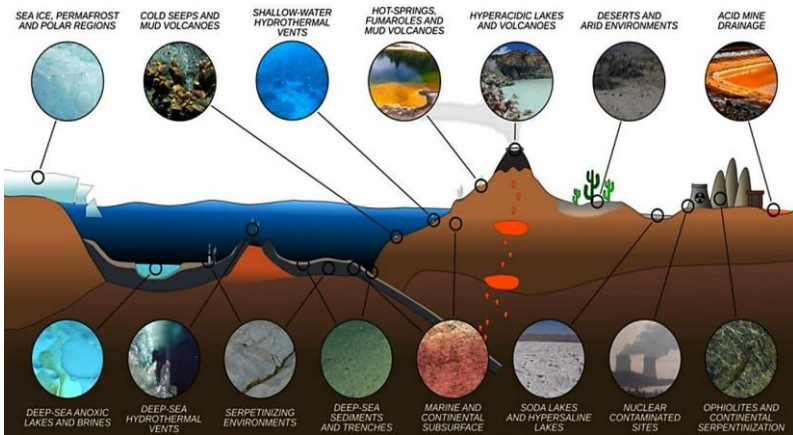
fisik yang keras di lingkungan tanah (Pepper *et. al.*, 2015). Bakteri pemacu pertumbuhan tanaman, seperti *Bacillus* dan *Paenibacillus*, berperan penting dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Mereka membantu meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi oleh tanaman, berfungsi sebagai agen pengendali hayati terhadap hama dan penyakit, serta menghasilkan enzim litik yang mampu merusak atau menghancurkan patogen penyebab penyakit tanaman (Tariq *et. al.*, 2025) (Gambar 1.1). Di sisi lain, arsitektur selubung sel yang lebih kompleks terdapat pada bakteri Gram negatif seperti *Pseudomonas* dan *Shewanella*. Selubung ini membantu mikroba berinteraksi dengan permukaan mineral dan zat terlarut di lingkungan untuk mendapatkan nutrisi yang dibutuhkan untuk metabolisme (Pepper *et. al.*, 2015).



Gambar 1.1 *Bacillus* dan *Paenibacillus* meningkatkan pertumbuhan tanaman
(Sumber: Tariq *et. al.*, 2025)

Actinomycetes merupakan bakteri Gram positif yang mampu membentuk spora dan umumnya hidup di lingkungan yang kaya oksigen (aerobik). Istilah *actinomycetes* berasal dari bahasa Yunani, yaitu “*aktis*” yang berarti sinar,

dan “*mykes*” yang berarti jamur, mencerminkan sifatnya yang menyerupai gabungan antara bakteri dan jamur. Kelompok ini termasuk salah satu takson paling penting di antara 18 filum utama dalam domain bakteri. Kelas *Actinobacteria* memegang peran sentral dalam komunitas mikroba tanah. Berkat kemampuan metabolisme yang beragam dan pola pertumbuhan yang khas, *Actinomycetes* sangat potensial digunakan dalam proses bioremediasi lingkungan (Albarracín *et. al.* 2010; Alvarez *et. al.*, 2012). *Actinomycetes* adalah mikroorganisme saprofit yang sangat melimpah di alam. Keberadaannya tersebar luas di berbagai habitat alami, termasuk tanah, laut, ekosistem mangrove, serta lingkungan seperti kompos dan vermikompos (Salim *et. al.*, 2017; Mohseni *et. al.*, 2013; Abidin *et. al.*, 2016; Gopalakrishnan *et. al.*, 2011) (Gambar 1.2). Berbagai penelitian juga telah berhasil mengisolasi *actinomycetes* dari lingkungan terestrial maupun akuatik, menegaskan peran pentingnya dalam ekosistem di seluruh dunia.



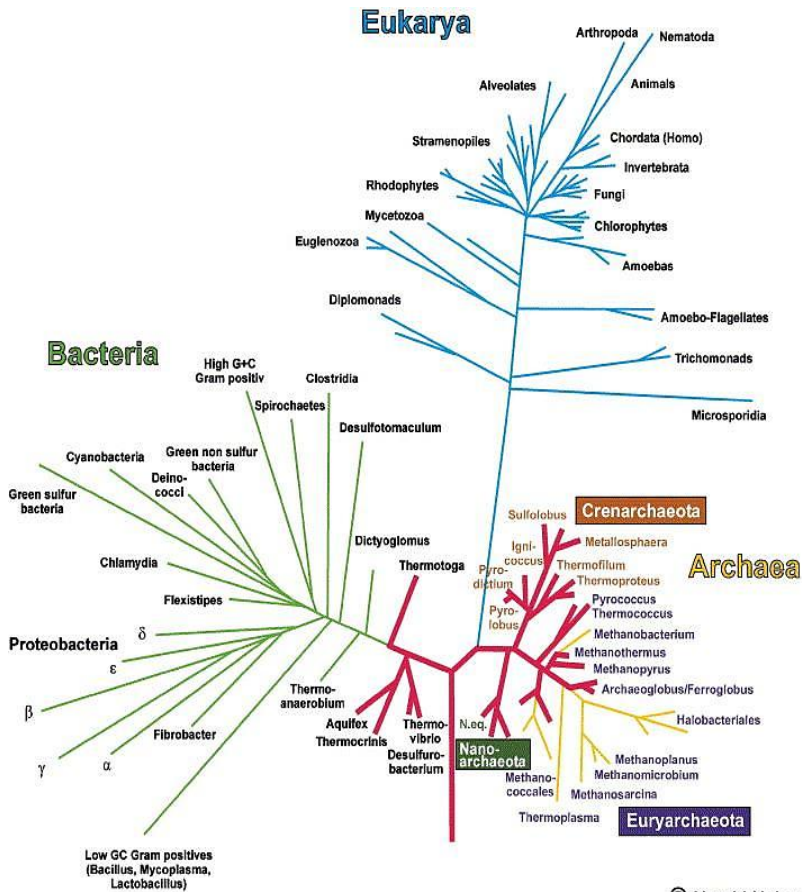
Gambar 1.2 Gambar penampang kerak bumi yang menunjukkan keberagaman jenis *actinomycetes* di dalamnya
(Sumber: Aly *et. al.*, 2020)

Beberapa genus *Actinomycetes* yang paling umum ditemukan di tanah antara lain *Streptomyces*, *Nocardia*, *Microbispora*, *Micromonospora*, *Actinomyces*, dan *Actinoplanes*.

Mikroorganisme ini sangat melimpah di lingkungan tanah yang bersifat alkali dan kaya bahan organik. Selain berperan penting dalam proses dekomposisi, aktinomisetes juga dikenal sebagai produsen berbagai senyawa bioaktif dengan struktur kimia yang kompleks, yang memiliki nilai tinggi dalam bidang farmasi dan pertanian. Melalui kemampuannya dalam menguraikan bahan organik, Actinomycetes turut berkontribusi dalam siklus daur ulang nutrisi, dan karena itu sering ditemukan dalam tumpukan kompos dan lingkungan kaya materi organik lainnya (Mobolaji & Olubukola, 2012).

2. Archaea

Archaea umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok berdasarkan habitat alaminya. Dua kelompok utama yang telah banyak diteliti adalah *Crenarchaeota*, yang sebagian besar terdiri dari organisme termofilik (menyukai suhu tinggi), dan *Euryarchaeota*, yang mencakup kelompok haloarchaea (organisme penyuka garam) dan metanogen (Gambar 1.3). Haloarchaea hidup di lingkungan dengan kadar garam tinggi, sedangkan metanogen berkembang di lingkungan anaerobik dan menghasilkan gas metana sebagai produk metabolisme. Berbeda dengan termofil yang hidup di lingkungan bersuhu tinggi seperti mata air panas di Taman Nasional Yellowstone, metanogen juga dapat ditemukan di habitat bersuhu rendah. Selain itu, populasi Archaea juga ditemukan dalam jumlah besar di perairan laut yang dingin, menunjukkan kemampuannya beradaptasi di berbagai kondisi ekstrem (Giovannoni & Stingl, 2005).



© Harald Huber

Gambar 1.3 Pohon filogenetik kehidupan

(Sumber: Dr. H. Huber, Regensburg dalam Lewalter, K., & Müller, 2006)

Archaea memiliki potensi besar dalam aplikasi bioremediasi lingkungan yang tercemar, terutama karena kemampuannya bertahan dan tumbuh di kondisi ekstrem. Faktor seperti suhu tinggi, pH ekstrem, dan kadar garam yang tinggi sering kali menghambat pertumbuhan sebagian besar mikroorganisme, sehingga membatasi efektivitas proses bioremediasi. Dalam konteks ini, Archaea menjadi kandidat yang sangat ideal karena mampu memanfaatkan polutan sebagai sumber karbon dan energi. Salah satu contoh

lingkungan ekstrem tersebut adalah air limbah dengan kadar salinitas tinggi yang dihasilkan oleh industri, seperti sektor minyak dan tekstil. Limbah ini sering mengandung senyawa beracun yang membahayakan kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan, sehingga perlu ditangani melalui proses degradasi sebelum dapat digunakan kembali atau dibuang ke alam.

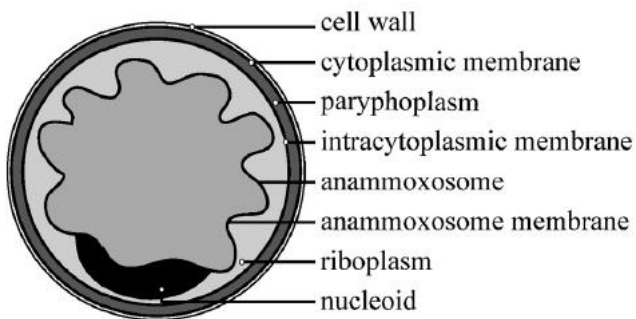
Dalam banyak kasus, remediasi lingkungan masih mengandalkan metode fisik dan elektrokimia, yang cenderung mahal, memerlukan konsumsi energi tinggi, dan kurang efisien saat diterapkan pada skala besar. Sebagai alternatif, pendekatan berbasis sistem biologis menawarkan solusi yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi lebih ekonomis untuk membersihkan ekosistem yang terkontaminasi. Meski demikian, penerapan teknologi bioremediasi biologis ini umumnya masih terbatas pada skala laboratorium atau uji coba kecil. Hal ini disebabkan oleh tantangan dalam pengembangan bioreaktor yang sesuai serta kebutuhan akan sistem pemantauan dan pengendalian proses yang efektif. Saat ini, penelitian terus dilakukan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan Archaea sebagai agen bioremediasi yang tangguh di lingkungan ekstrem. (Mainka *et. al.*, 2021).

3. Superphylum *Planctomycetes*, *Verrucomicrobia*, *Chlamydiae* (PVC)

Planctomycetes, *Verrucomicrobia*, dan *Chlamydiae* (dikenal sebagai kelompok PVC) merupakan filum tersendiri dalam domain Bakteri, yang memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari filum bakteri lainnya. Salah satu ciri khas utama mereka adalah tidak adanya peptidoglikan dalam struktur dinding sel, komponen yang umumnya ditemukan pada sebagian besar mikroorganisme prokariotik. Selain itu, anggota kelompok PVC menunjukkan kemampuan kompartementalisasi intraseluler, yaitu pemisahan struktur internal sel menggunakan sistem membran, termasuk keberadaan nukleoid yang terbungkus

membran, suatu fitur yang tidak lazim ditemukan pada bakteri (Fuerst & Sagulenko, 2011). Beberapa anggota kelompok ini merupakan patogen manusia yang paling berhasil, yang lain merupakan mikroba tanah yang melimpah, dan yang lain masih sangat penting bagi siklus nitrogen laut dan sangat menjanjikan untuk pengolahan air limbah berkelanjutan (Wagner & Horn, 2006). *Planctomycetes* telah diidentifikasi di seluruh penjuru dunia, tetapi khususnya tersebar luas di tanah, air tawar, dan lingkungan laut (Buckley *et al.*, 2006).

Beberapa spesies *Planctomycetes* diketahui mampu melakukan proses anammoks (anaerobic ammonium oxidation), yaitu reaksi biokimia dimana amonium dioksidasi secara anaerob menjadi gas dinitrogen (N_2), dengan menggunakan nitrit sebagai akseptor elektron dan karbon dioksida sebagai sumber karbon yang direduksi. Proses metabolik ini bersifat kemoautotrofik dan berlangsung di dalam struktur sel khusus yang dibatasi membran, disebut anammoksosom, yang dalam beberapa aspek menyerupai mitokondria pada sel eukariotik (Gambar 1.4). Oleh karena itu, keberadaan *Planctomycetes* dalam biofilm rumput laut berpotensi besar untuk mendukung penghilangan nitrogen dari air limbah, menjadikannya relevan dalam konteks bioremediasi (Kartal *et al.*, 2010).



Gambar 1.4 Gambaran sel anammox yang menunjukkan tiga kompartemen berbeda dan membran di sekitarnya (Sumber: van Teeseling *et. al.*, 2014)

Persentase *Planctomycetes* dalam biofilm yang tumbuh di permukaan rumput laut (*kelp*) bervariasi sepanjang tahun, dan pada waktu tertentu dapat mencapai 24 hingga 53% dari total komunitas bakteri. Dalam biofilm ini, *Planctomycetes* diperkirakan memainkan peran penting dalam siklus karbon (C) dan nitrogen (N). Gen-gen yang dimiliki oleh kelompok ini mencakup pengkode enzim untuk transfer senyawa karbon satu (C1), meskipun fungsi pasti dari gen-gen tersebut masih menjadi perdebatan (Chistoserdova *et al.*, 2004).

B. Eukariotik

Eukariota memiliki struktur yang lebih rumit dibandingkan dengan prokariota, karena mereka memiliki nukleus sejati serta organel-organel sel yang dikelilingi membran. Dalam dunia mikroorganisme lingkungan, kelompok eukariotik yang paling menonjol meliputi jamur (fungi), protozoa, dan alga.

1. Fungi

Jamur tersebar luas di berbagai lingkungan, terutama di tanah, di mana mereka mampu beradaptasi dengan beragam kondisi dan memainkan peran penting sebagai pengurai bahan organik. Mirip dengan bakteri, beberapa jamur juga dapat menjadi patogen bagi manusia maupun tanaman; bahkan secara ekonomi, jamur merupakan salah satu patogen tanaman yang paling signifikan. Selain itu, jamur memiliki peran penting dalam berbagai proses industri yang melibatkan fermentasi, serta dalam bioteknologi untuk produksi senyawa antimikroba (Tabel 1.1).

Dari segi metabolisme, jamur bersifat kemoheterotrof. Sebagian besar jamur adalah aerob obligat, tetapi ada juga jenis khamir yang bersifat anaerob fakultatif, serta jamur zoospora yang ditemukan pada ruminansia yang hidup secara anaerob obligat. Jamur anaerob ini biasanya memfermentasi gula dan menghasilkan berbagai produk sampingan yang bernilai, seperti etanol, asam asetat, dan asam laktat. Produk-produk ini menjadikan jamur berperan

penting secara komersial dalam produksi berbagai makanan pokok seperti yoghurt, keju, roti, dan acar, serta minuman beralkohol seperti bir dan anggur. Selain metabolisme primernya yang mendukung biosintesis dan produksi energi, jamur dikenal juga menghasilkan metabolit sekunder (senyawa yang dihasilkan selama fase stasioner pertumbuhan). Metabolit sekunder ini telah merevolusi dunia kedokteran, bioteknologi, dan pertanian (Pepper *et. al.*, 2015).

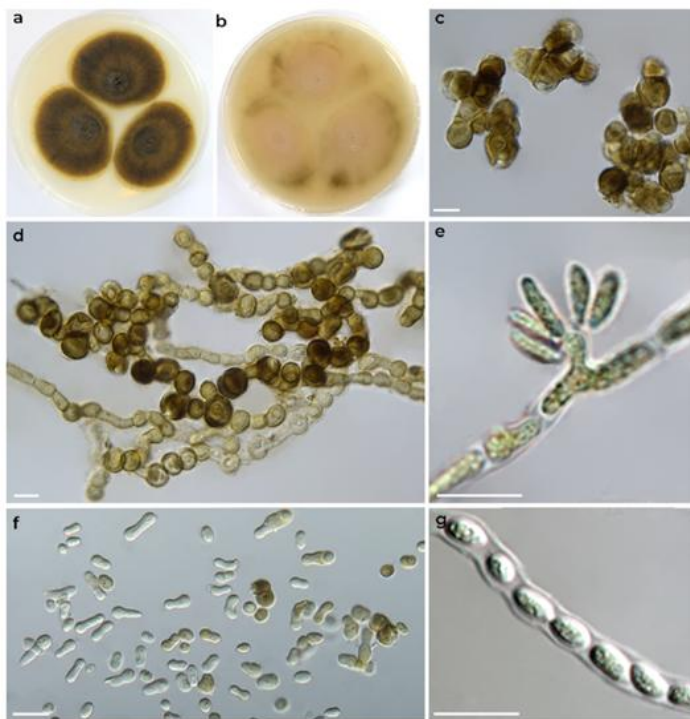
Tabel 1.1 Contoh Jamur dan Peran Mereka di Lingkungan

Fungus	Common Environments	Role
Molds		
<i>Rhizopus</i> spp.	Makanan busuk; tanah; tanaman	Degradasi; penyakit tanaman, misalnya penyakit busuk daun pada bibit padi
<i>Penicillium</i> spp.	Makanan busuk; tanah	Degradasi; produksi antibiotik (penisilin)
Mushrooms		
<i>Polyporus squamosus</i>	Pohon dan bagian tanaman yang mati	Dekomposisi
<i>Cryptococcus neoformans</i>	Tanah; bisa terbawa udara	Degradasi; menyebabkan <i>Cryptococcus</i> (infeksi paru-paru dan sistem saraf pusat pada manusia)
Yeasts		
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Buah-buahan; tanah; lingkungan perairan	Fermentasi; degradasi

Fungus	Common Environments	Role
<i>Candida albicans</i>	Mikrobiota normal hewan	Menyebabkan kandidiasis (infeksi jamur) pada kulit atau selaput lendir

Sumber: Pepper *et. al.*, 2015

Jamur, yang sering dikenal sebagai saprofit, memegang peranan penting dalam proses penguraian dan daur ulang bahan organik seperti tumbuhan, serangga, dan hewan yang telah mati. Mereka mampu menguraikan polimer kompleks yang terkandung dalam organisme tersebut, seperti selulosa dan lignin pada tumbuhan, serta kitin pada serangga. Struktur berfilamen jamur, yang membentuk hifa dengan permukaan luas, sangat mendukung gaya hidup saprofit mereka. Kemampuan unik jamur untuk menguraikan polimer kompleks membuatnya efektif dalam mendekomposisi berbagai jenis kontaminan lingkungan, sehingga berperan signifikan dalam penguraian dan daur ulang limbah. Sebagai contoh, jamur mirip ragi seperti *Aureobasidium pullulans* dapat mendegradasi plastik berbahan polivinil klorida (PVC) (Webb dkk., 2000) (Gambar 1.5). Sementara itu, jamur berfilamen seperti *Penicillium*, *Stachybotrys*, *Allescheriella*, dan *Phlebia* mampu menguraikan hidrokarbon aromatik yang sering ditemukan dalam produk minyak bumi dan pestisida pertanian (Boonchan dkk., 2000).



Gambar 1.5 Makromorfology dan mikromorfology
Aureobasidium pullulans CCF 5287
 (Sumber: Řehulka & Hubka, 2024)

Kelompok jamur yang juga sangat penting di lingkungan adalah mikoriza. Jamur ini membentuk hubungan simbiotik yang erat dengan banyak jenis tanaman. Dengan memperluas area permukaan akar tanaman secara signifikan hingga ratusan ribu kali lipat, mikoriza membantu akar agar tidak cepat kering dan meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap nutrisi, terutama fosfat. Sebagai balasannya, tanaman memberikan gula hasil fotosintesis kepada jamur sebagai sumber energi. Jamur mikoriza ditemukan pada sekitar 92% dari seluruh famili tanaman yang telah diteliti, dan mencakup dua tipe utama, yaitu jamur ektomikoriza dan endomikoriza (Wang & Qiu, 2006; Rinaldi dkk., 2008). Kedua jenis ini memiliki peran penting dalam menunjang kesehatan dan pertumbuhan tanaman.

2. Protozoa

Semua protozoa sangat bergantung pada keberadaan air, sehingga mereka paling sering ditemukan di habitat air tawar dan laut. Namun, beberapa jenis protozoa juga hidup di daratan, khususnya di tanah yang lembap, sementara yang lain hanya dapat ditemukan di saluran pencernaan hewan. Protozoa memiliki beragam cara hidup; ada yang bersifat saprofit, parasit, bahkan ada yang mampu melakukan fotosintesis. Secara ekologis, protozoa memiliki peran penting karena mereka menjadi dasar rantai makanan di banyak ekosistem perairan. Mereka juga menyusun sebagian besar plankton yang menjadi sumber makanan bagi berbagai hewan air (Pepper *et. al.*, 2015).

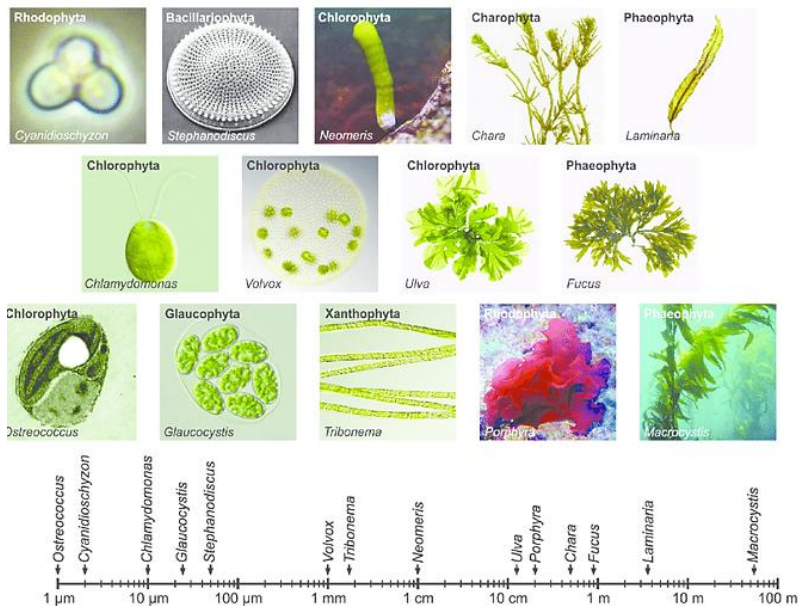
Protozoa memiliki peran krusial dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Mereka tidak hanya berfungsi sebagai produsen primer dan pengurai, tetapi juga menjadi bagian penting dalam rantai makanan. Beberapa spesies protozoa bersifat autotrof, yang berarti mereka dapat menghasilkan makanan sendiri melalui proses fotosintesis. Contohnya adalah organisme dalam filum Euglenozoa, yang dikenal sebagai Euglenoid; mereka memiliki kloroplas dan mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi sumber energi mereka. Selain itu, protozoa juga berperan sebagai pengurai utama dengan memecah bahan organik dan membantu mendaur ulang nutrisi di lingkungan. Dengan memangsa bakteri, alga, dan bahan organik lainnya, protozoa melepaskan nutrisi yang kemudian dapat digunakan oleh organisme lain, sehingga mendukung kelangsungan dan keseimbangan ekosistem secara keseluruhan (Weiss, 2023).

Kualitas air adalah salah satu bidang dimana protozoa memiliki pengaruh yang semakin besar. Beberapa wabah penyakit yang terkait dengan air minum dan tempat rekreasi ternyata disebabkan oleh protozoa. Tiga jenis protozoa yang paling sering dilaporkan berdampak pada kualitas air adalah *Giardia* (kelompok Mastigophora), *Cryptosporidium*, dan *Toxoplasma* (keduanya dari kelompok Apicomplexa). Kista

dan oosit yang berasal dari manusia maupun hewan yang terinfeksi mampu bertahan dalam lingkungan selama waktu yang cukup lama, sehingga meningkatkan risiko kontaminasi (Pepper *et. al.*, 2015). Beberapa protozoa lain yang juga sangat penting adalah amoeba pemakan otak, seperti *Naegleria fowleri* dan *Balamuthia mandrillaris*. Organisme ini biasanya ditemukan di air atau tanah, dan dapat menyebabkan ensefalitis otak, sebuah kondisi peradangan serius yang sering kali berakibat fatal bagi manusia (Niyyati *et al.*, 2009).

3. Algae

Algae adalah mikroorganisme eukariotik yang mampu melakukan fotosintesis menghasilkan oksigen, sama seperti tumbuhan, dengan klorofil a sebagai pigmen utama. Mereka hadir dalam berbagai bentuk, mulai dari yang berukuran satu sel hingga yang kompleks seperti rumput laut (Gambar 1.6).



Gambar 1.6 Spektrum fenotipe dan ukuran spesies algae. Algae sangat bervariasi bentuknya, dan ukuran algae terkecil dan terbesar berbeda sekitar $\sim 10^8$ (Sumber: Hallmann, 2015)

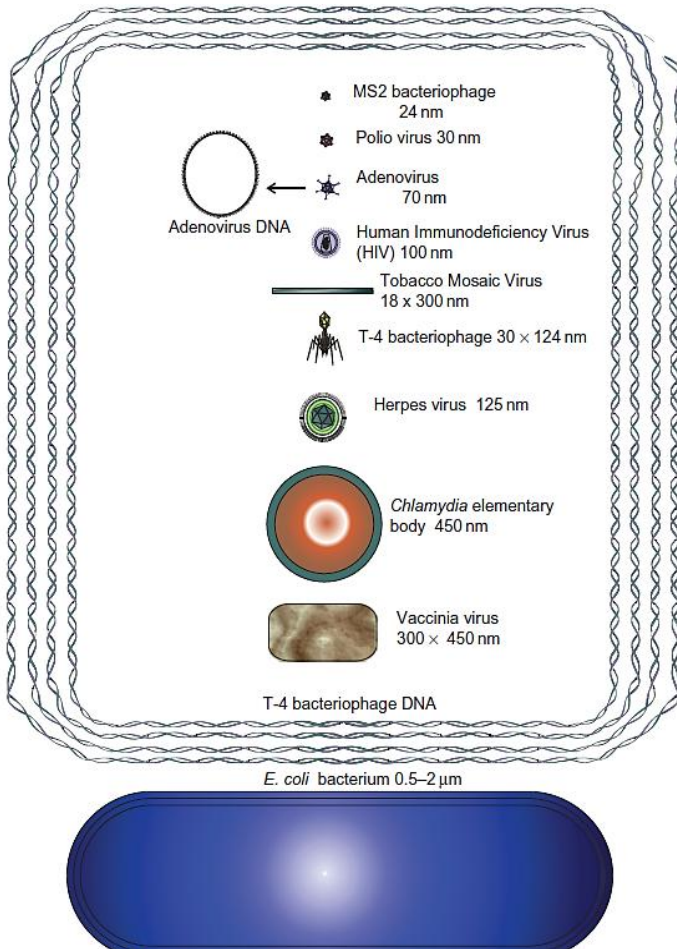
Algae hidup di banyak habitat, termasuk air tawar, laut, air payau, tanah, dan batuan, dengan ketersediaan cahaya dan air sebagai faktor pembatas utama. Algae biasanya ditemukan di lingkungan basah, baik mengapung, menempel pada permukaan, atau di batas antara udara dan air. Beberapa algae bahkan dapat tumbuh di batu berpori atau di tanah gurun yang keras. Alga juga dapat hidup di lingkungan yang sangat asam, dengan beberapa spesies mampu bertahan pada pH sangat rendah. Sebagian besar algae hidup mandiri, tapi ada juga yang menjalin hubungan simbiotik dengan organisme lain seperti jamur dan karang, bahkan ada yang parasitik. Klasifikasi alga cukup rumit karena didasarkan pada banyak karakteristik seluler dan molekuler. Algae terbagi menjadi beberapa kelompok besar seperti alga hijau, euglenoid, dinoflagellata, dan lain-lain. Namun, penelitian genetika menunjukkan bahwa kelompok algae sangat beragam secara evolusioner (Pepper *et al.*, 2015).

C. Virus

Virus adalah kelompok entitas biologis yang unik karena hanya dapat menginfeksi organisme eukariotik maupun prokariotik. Meskipun beberapa virus membawa enzim tertentu, mereka sepenuhnya bergantung pada sel inang karena tidak memiliki kemampuan metabolisme sendiri. Virus menggunakan mekanisme sel inang untuk mereplikasi dan merakit komponen-komponennya. Secara struktural, virus terdiri dari materi genetik berupa asam nukleat yang dilindungi oleh lapisan protein pelindung yang disebut kapsid, dengan ukuran yang beragam (Gambar 1.7).

Virus prokariotik memegang peranan penting dalam mengatur populasi sianobakteri di lautan. Virus-virus ini, yang disebut sianofag, secara khusus menginfeksi produsen primer yang paling banyak ditemukan, seperti sianobakteri laut *Prochlorococcus* dan *Synechococcus* (Sullivan *et al.*, 2006). Virus eukariotik dapat menyerang organisme, seperti manusia, hewan, tumbuhan, serta mikroorganisme eukariotik lainnya

seperti alga dan jamur, tersebar luas di alam. Virus ini juga sangat umum dijumpai di berbagai lingkungan, termasuk di lautan dan tanah (Pepper *et. al.*, 2015). Penelitian mengenai virus eukariotik yang menyerang alga umumnya fokus pada ekosistem laut. Di lingkungan ini, virus berperan penting dalam mengatur jumlah populasi fitoplankton, yang merupakan komponen utama dalam rantai makanan laut ((Brussard, 2004).



Gambar 1.7 Ukuran perbandingan beberapa virus terpilih dibandingkan dengan sel bakteri dan asam nukleat (Sumber: Pepper *et. al.*, 2015)

Virus eukariotik tidak hanya berperan dalam mengendalikan pertumbuhan berlebih alga, tetapi juga kini diakui sebagai faktor kunci yang memengaruhi pergerakan energi, nutrisi, dan bahan organik terlarut di ekosistem laut. Seperti halnya virus yang menyerang prokariota, perhatian terhadap virus eukariotik terus meningkat karena semakin jelas bahwa virus yang menginfeksi alga memiliki peran penting dalam siklus biogeokimia di lautan (Brussard, 2004). Diatom, sebagai salah satu kelompok fitoplankton terbesar, memegang peranan penting dalam menjaga keseimbangan oksigen di udara serta mendukung siklus karbon yang menjadi dasar bagi kehidupan di ekosistem perairan. Salah satu jenis diatom yang paling banyak ditemukan adalah *Chaetocerus* yang diketahui terinfeksi oleh sebuah virus baru yang sebelumnya belum pernah ditemukan dapat menambah wawasan kita tentang interaksi mikroorganisme di alam (Nagasaki et al., 2005).

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z.A.Z, Malek, N.H, Zainuddin, Z. and Chowdhury, A.J.K. (2016). Selective isolation and antagonistic activity of actinomycetes from mangrove forest of Pahang, Malaysia. *Frontiers in Life Science*, 9(1), 24-31.
- Albarracín, V.H., Amoroso, M.J. and Abate, C.M. (2010). Bioaugmentation of copper polluted soil microcosms with *Amycolatopsis tucumanensis* to diminish phytoavailable copper for *Zea mays* plants. *Chemosphere*, 79(2), 131-137.
- Alvarez, A., Benimeli, C.S., Saez, J.M., Fuentes, M.S., Cuozzo, S.A., Polti, M.A. and Amoroso, M.J., 2012a. Bacterial bio-resources for remediation of hexachlorocyclohexane. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(11), 15086-15106.
- Aly MM, Bahamdain LA, Aba SA. (2020). Unexplored Extreme Habitats as Sources of Novel and Rare Actinomycetes with Enzyme and Antimicrobial Activities. *IOSR J Pharm Biol Sci*, 14(6), 45-54.
- Boonchan, S., Britz, M. L., and Stanley, G. A. (2000) Degradation and mineralization of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by defined fungal-bacterial cocultures. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66, 1007-1019.
- Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2019). *Biology of Microorganisms* (14th ed.). Pearson. https://www.pearson.com/nl/en_NL/higher-education/subject-catalogue/biology/Brock-Biology-of-Microorganisms-Madigan.html
- Brussard, C. P. (2004) Viral control of phytoplankton populations – a review. *J. Eukaryot. Microbiol.*, 51, 125-138.
- Buckley, D. H., Huangyutitham, V., Nelson, T. A., Rumberger, A., and Thies, J. E. (2006) Diversity of planctomycetes in soil in relation to soil history and environmental heterogeneity. *Appl. Environ. Microbiol.*, 72, 6429.

- Chistoserdova, L., Jenkins, C., Kalyuzhnaya, M. G., Marx, C. J., Lapidus, A., Vorholt, J. A., *et al.* (2004) The enigmatic planctomycetes may hold a key to the origins of methanogenesis and methylotrophy. *Molec. Biol. Evol.*, 21, 1234-1241.
- Giovannoni, S. J., and Stingl, U. (2005). Molecular diversity and ecology of microbial plankton. *Nature*, 427, 343-348.
- Gopalakrishnan, S., Pande, S., Sharma, M., Humayun, P., Kiran, B.K., Sandeep, D., Vidya, M.S., Deepthi, K. and Rupela, O. (2011). Evaluation of actinomycete isolates obtained from herbal vermicompost for the biological control of fusarium wilt of chickpea. *Crop Protection*, 30(8), 1070-1078.
- Hallmann, A. (2015). Algae Biotechnology - Green Cell-Factories on the Rise. *Current Biotechnology*, 4(4), 389-415.
- Kartal, B., Kuenen, J. G., and van Loosdrecht, M. C. M. (2010) Engineering. Sewage treatment with anammox. *Science*, 328, 702-703.
- Lewalter, K., & Müller, V. (2006). Bioenergetics of archaea: Ancient energy conserving mechanisms developed in the early history of life. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1757(3), 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2006.02.012>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2020). *Brock Biology of Microorganisms* (17th ed.). Pearson. https://www.pearson.com/nl/en_NL/higher-education/subject-catalogue/biology/Brock-Biology-of-Microorganisms-Madigan.html
- Mainka T, Weirathmüller D, Herwig C, Pflügl S. (2021). Potential applications of halophilic microorganisms for biological treatment of industrial process brines contaminated with aromatics. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 48(1-2). <https://doi.org/10.1093/jimb/kuab015>

- Mobolaji F. A. & Olubukola O. B. (2012). Taxonomy and Ecology of Antibiotic Producing Actinomycetes. *African Journal of Agricultural Research.*, 7(15), 2255-2261.
- Mohseni, M., Norouzi, H., Hamed, J. and Roohi, A., 2013. Screening of antibacterial producing actinomycetes from sediments of the Caspian Sea. *International journal of molecular and cellular medicine*, 2(2), 64.
- Nagasaki, K., Tomaru, Y., Takao, J., Nishida, K., Shirai, Y., Suzuki, H., *et al.* (2005) Previously unknown virus infects marine diatom. *Appl. Environ. Microbiology* 71, 3528-3535.
- Niyyati, M., Lorenzo-Morales, J., Rezaeian, M., Martin-Navarro, C. M., Haghi, A. M., MacIver, S. K., *et al.* (2009) Isolation of Balamuthia mandrillaris from urban dust, free of known infectious involvement. *Parasitol. Res.* 106, 279-281.
- Pepper, I. L., Gerba C. P., Gentry T. J. (2015). Environmental Microbiology, Third edition. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00002-8>. Elsevier Inc.
- Rahmadina, Y. A., Saputra, M. A., Wardhani, D., & Fitriani. (2024). Perbedaan Teori Organisme Sel Prokariotik, Eukariotik Dan Virus. *Algoritma*, 2(5), 75-84. <https://doi.org/10.62383/algoritma.v2i5.125>
- Řehulka, Jiří & Hubka, Vit. (2024). A renal mycosis of roach (*Rutilus rutilus*) caused by the *Aureobasidium pullulans*. *Medical Mycology Case Reports.*, 44. 100652. 10.1016/j.mmcr.2024.100652.
- Rinaldi, A. C., Comandini, O., and Kuyper, T. W. (2008) Ectomycorrhizal fungal diversity: separating the wheat from the chaff. *Fung. Diver.*, 33, 1-45.
- Salim, F.M., Sharmili, S.A., Anbumalarmathi, J. and Umamaheswari, K., 2017. Isolation, molecular characterization and identification of antibiotic producing

- actinomycetes from soil samples. *J Appl Pharm Sci*, 7(9), pp.69-75.
- Schloss, P. D., and Handelsman, J. (2004) Status of the microbial census. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 68, 686-691.
- Sullivan, M. B., Lindell, D., Lee, J. A., Thompson, L. R., Bielawski, J. P., and Chisholm, S. W. (2006) Prevalence and evolution of core photosystem II genes in marine cyanobacterial viruses and their hosts. *PLoS Biol.* 4(8), e234.
- Tariq, H., Subramanian, S., Geitmann, A., & Smith, D. L. (2025). *Bacillus and Paenibacillus as plant growth-promoting bacteria in soybean and cannabis. Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1529859>
- van Teeseling, M. C. F., de Almeida, N. M., Klingl, A., Speth, D. R., Op den Camp, H. J. M., Rachel, R., Jetten, M. S. M., & van Niftrik, L. (2014). A new addition to the cell plan of anammox bacteria: “*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*” has a protein surface layer as the outermost layer of the cell. *Journal of Bacteriology*, 196(1), 80–89. <https://doi.org/10.1128/JB.01048-13>
- Wagner, M. & Horn, M., (2006). The Planctomycetes, Verrucomicrobia, Chlamydiae and sister phyla comprise a superphylum with biotechnological and medical relevance. *Current Opinion in Biotechnology*, 17(3), 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2006.05.005>
- Wang, B., and Qiu, Y. L. (2006) Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza* 16, 299-363.
- Webb, J. S., Nixon, M., Eastwood, I. M., Greenhalgh, M., Robson, G. D., and Handley, P. S. (2000) Fungal colonization and biodeterioration of plasticized polyvinyl chloride. *Appl. Environ. Microbiol.* 66, 3194-3200.

Weiss, L. (2023). Ecological roles of protozoa: Research and future perspective. *Advanced Journal of Microbiology Research*, 17(2), 001-002

BAB 2

FISIOLOGI MIKROBA

Narwati, S.Si., M.Kes.

A. Pendahuluan

Secara umum, fisiologi mikroba adalah cabang ilmu mikrobiologi yang mempelajari fungsi dan aktivitas hidup mikroorganisme, meliputi proses metabolisme, pertumbuhan, adaptasi, dan interaksinya dengan lingkungan. Fisiologi menggambarkan fungsi mikroorganisme uniseluler dalam hal korelasi antar sifat sistem, sedangkan aktivitas suatu organisme adalah suatu proses yang ditandai dengan berbagai fungsi. Interaksi dari fungsi-fungsi tersebut bergantung kepada kondisi eksternal maupun internal. Dasar dari fisiologi adalah mempelajari proses-proses perkembangan di dalam tubuh organisme yang sangat memerlukan pengenalan fisikokimia. Beberapa teori empiris dapat dirumuskan, seperti anggapan bahwa terdapat ketergantungan linier antara kedua fluks tersebut. (Brul and Westerhoff, 2007)

Cabang dari fisiologi yang mempelajari proses-proses Kimia dalam tubuh makhluk hidup menjadi suatu ilmu tersendiri yaitu biokimia. Konsep spesiasi memiliki 3 bagian, antara lain:

1. Morfologi, berdasarkan pada karakter morfologi (jamur – *Basidiomisetes*) dan tumbuhan.
2. Biologi, berdasarkan potensi-potensi individu dalam populasi yang sama (perkawinan pada hewan).

3. Filogenetik, berdasarkan kekerabatan genetik (arkhea, bakteri, dan fungi).

Adapun definisi menurut beberapa literasi diantaranya :

1. **Menurut Mardigan, Martinko, Bender, Buckley, & Stahl (2019).** Fisiologi mikroba adalah cabang ilmu mikrobiologi yang mempelajari fungsi dan aktivitas sel mikroba secara biokimia dan fisiologis, termasuk metabolisme energi, nutrisi, pertumbuhan, serta regulasi aktivitas seluler.
2. **Menurut Pelczar, Chan, & Krieg (2008).** Fisiologi mikroba berfokus pada fungsi dasar kehidupan sel mikroba, seperti transportasi zat gizi, kerja enzim, respirasi, fermentasi, fotosintesis, dan mekanisme pengendalian metabolisme.
3. **Menurut Prescott, Harley, & Klein (2017).** Fisiologi mikroba mempelajari mekanisme kehidupan mikroorganisme, mencakup kebutuhan nutrisi, jalur metabolisme energi, biosintesis makromolekul, hingga respons terhadap tekanan lingkungan.
4. **Menurut Tortora, Funke, & Case (2020).** Fisiologi mikroba adalah ilmu yang menelaah bagaimana mikroorganisme menggunakan energi dan bahan kimia untuk pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidupnya
5. **Menurut Purwoko,** fisiologi mikroba merupakan ilmu yang mempelajari fungsi kehidupan mikroba dengan menekankan pada proses metabolisme, pertumbuhan, serta respons mikroba terhadap lingkungannya.

B. Sejarah Perkembangan Filogenetik Organisme

Pada abad ke-18, Carolus Linnaeus mengemukakan sistem dua dunia yaitu bahwa makhluk hidup terbagi menjadi tumbuhan yang terdiri dari kloroplas dan hewan. Tahun 1866, Ernest Hackel mengemukakan sistem tiga dunia, bahwa makhluk hidup terbagi ke dalam hewan, tumbuhan, dan protista (termasuk bakteri, algae, fungi, dan protozoa). Pendapat Margulis dan Copeland sama dengan Ernest Hackel, tetapi bakteri dipisahkan dari protista karena tidak mempunyai selaput inti. Tahun 1969, Whittaker membagi makhluk hidup ke

dalam 5 dunia, yaitu hewan, tumbuhan, fungi, protista, dan monera (bakteri dan sianobakteri). Tahun 1990, Woese dkk menambahkan 3 kerajaan baru (domain) setelah ditemukannya prokariot arkhea (paling primitif), yaitu Arkhea, Bakteria, dan Eukarya. Arkhea merupakan prokariot kemoautotrof, artinya memerlukan senyawa kimia untuk menghasilkan energi dan merupakan kelompok yang tahan pada temperatur tinggi. Contohnya organisme dari domain Arkhae adalah sebagai berikut :

1. Crenarkhacum (Arkhea nontermofil laut dan termofil sulfur)
2. Euryarkhea (Arkhea metanogen dan halofil)

Bakteria seperti Thermotogales, bakteri hijau bersulfur, Flavobakteria, Sianobakteria, bakteri gram positif, dan bakteri ungu. Eukarya merupakan organisme yang memiliki organel bermembran yang independen dan memiliki flagella. Eukarya terdiri dari Eukarya primitif seperti *Diplomonad* dan Eukarya modern seperti Fungi.

C. Sifat, Karakter Fisiologi Bakteri

Di dalam buku Bakteriologi Apriani dkk dijelaskan bahwa untuk dapat bertahan hidup, terdapat beberapa sifat fisiologis yang diperlukan oleh bakteri, yaitu;

1. Air

Untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan, bakteri memerlukan air dalam konsentrasi tinggi di sekitarnya. Air merupakan penghantar semua bahan gizi yang diperlukan sel dan untuk membuang semua zat yang tidak diperlukan keluar sel.

2. Garam-garam organik

Diperlukan dalam upaya mempertahankan keadaan koloidal dan tekanan osmotik di dalam sel, untuk memelihara keseimbangan asam basa dan berfungsi sebagai bagian enzim atau sebagai aktivator reaksi enzim..

3. Mineral

Diperlukan karbon, nitrogen, belerang, fosfat, aktivator enzim (Mg, Fe, K dan Ca).

4. CO₂

Diperlukan dalam proses sintesa dengan timbulnya asimilasi CO₂ di dalam sel.

5. O₂

Berdasarkan kebutuhan terhadap oksigen, bakteri dikelompokkan dalam 5 golongan; (1) Anaerob obligat, hidup tanpa oksigen, oksigen menjadi toksik terhadap golongan bakteri jenis ini. Contoh *Clostridium tetani*, *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens*. (2) Anaerob aerotolerant, tidak mati dengan adanya oksigen. (3) Anaerob fakultatif, mampu tumbuh baik dalam suasana dengan atau tanpa oksigen. Contoh *Streptococcus*, *Aerobacter aerogenes*, *Escherichia coli*. (4) Aerob obligat, dapat tumbuh subur bila ada oksigen dalam jumlah besar. Contoh *Mycobacterium tuberculosis*. (5) Mikroaerofilik, hanya tumbuh baik dalam tekanan oksigen yang rendah.

6. Temperatur

Untuk hidup, bakteri mempunyai temperatur optimum yaitu kondisi dimana bakteri tersebut dapat tumbuh sebaik-baiknya dan batas-batas temperatur dimana pertumbuhan dapat terjadi. Berdasarkan temperatur, bakteri dikelompokkan menjadi 3 golongan; (1) Psikrofilik (temp -5 sampai +20°C dengan optimum 1-20°C). (2) Mesofilik (temp 10 - 45°C dengan optimum 20 - 40°C). (3) Termofilik (temp 25 - 80°C dengan optimum 50 - 60°C)

7. pH

Keberadaan pH sangat mempengaruhi pertumbuhan bakteri. Bakteri patogen Sebagian besar hidup pada pH optimum 7,2 - 7,6.

8. Sumber C

Berdasarkan sumber karbon (C), bakteri digolongkan kedalam 2 golongan ; (1) bakteri *autotrof (litotrof)*, yaitu bakteri yang hanya memerlukan air, garam anorganik dan CO₂ sebagai sumber C bagi pertumbuhannya, mensintesis sebagian besar metabolik organik CO₂. (2) bakteri *heterotrof (organotrof)*, yang terbagi menjadi bakteri heterotrof

fotosintetik (memperoleh energi dari cahaya) dan heterotrof kemototik (memperoleh energi dari oksidasi senyawa organik, memerlukan C dalam bentuk senyawa organik karbohidrat untuk pertumbuhannya).

Untuk dapat melihat sifat dan karakter fisiologi bakteri dapat dilakukan dengan pemeriksaan terhadap :

1. Kebutuhan makanan, yakni ditinjau dari apakah hanya membutuhkan makanan sederhana atau memerlukan zat-zat tambahan seperti darah.
2. Suhu, diperlukan informasi suhu tertentu yang optimal untuk pertumbuhan bakteri tersebut.
3. O₂ dan CO₂, dilakukan pemeriksaan sifat bakteri apakah golongan aerob, anaerob dan tekanan CO₂.
4. pH pembenihan, yakni pH maksimum-minimum bakteri.
5. Pigmen, apakah membentuk pigmen pada pembenihan tertentu.
6. Daya proteolitik, yakni apakah bakteri tersebut dapat mencairkan gelatin, mencernakan daging, serum dsb.
7. Peragian hidrat arang, yakni apakah bakteri tersebut dapat membentuk asam, gas, glukosa dan hidrat arang.
8. Pembentukan indol, apakah bakteri dapat membentuk indol.
9. Pembentukan H₂ S
10. Reduksi Nitrat, apakah bakteri dapat merubah nitrat menjadi nitrit.
11. Reduksi litmus dan indikator lain
12. Hidrolisa tepung kanji, apakah bakteri tersebut dapat membentuk glukosa
13. Pembentukan "acetyl metyl carbinol", diperiksa dengan menggunakan tes *Voges-Proskauer*.
14. Derajat keasaman akhir dalam kaldu glukosa. Ditentukan dengan tetesan merah metil. (Apriani *et al.*, 2023)

D. Ruang Lingkup Fisiologi Mikroba

Fisiologi mikroba mencakup berbagai aspek fungsi kehidupan mikroorganisme, meliputi:

1. Nutrisi mikroba

Aspek tentang kebutuhan zat gizi mikroba baik makroelemen maupun mikroelemen, sumber karbon, nitrogen, sulfur, fosfor, serta faktor pertumbuhan. Contoh pengaplikasiannya : media kultur laboratorium, formulasi pupuk hayati.

2. Metabolisme Energi

Meliputi jalur katabolisme (glikolisis/pemecahan energi; respirasi aerob, anaerob, fermentasi) & anabolisme (biosintesis asam amino, protein, lipid, nukleotida, dll.). Contoh pengaplikasiannya : Produksi etanol, asam laktat, enzim industri

3. Pertumbuhan & pembelahan sel/reproduksi

Proses pembelahan sel, kurva pertumbuhan mikroba, serta faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan (pH, suhu, oksigen, tekanan osmotik. Contoh pengaplikasiannya : pengendalian kontaminasi makanan, fermentasi pangan

4. Regulasi metabolisme

Pengaturan aktivitas enzim, kontrol ekspresi gen, serta mekanisme regulasi metabolik (feedback inhibition, operon model) Contoh pengaplikasiannya : Produksi antibiotik, rekayasa genetika, bioteknologi

5. Respon terhadap Lingkungan

Adaptasi mikroba terhadap stres lingkungan (suhu ekstrem, pH, osmolaritas, radiasi, bahan toksik). Contoh pengaplikasiannya : isolasi mikroba ekstremofil untuk enzim industri

6. Interaksi dengan lingkungan & organisme lain.

Mikroba dapat berinteraksi dengan organisme lain dalam bentuk simbiosis, komensalisme, mutualisme, atau parasitisme. Interaksi ini berperan besar dalam ekologi mikroba dan patogenitas (Fardiaz, 1992). Contoh pengaplikasiannya: Probiotik, pengendalian penyakit tanaman, infeksi klinis.

7. Aplikasi Fisiologi Mikroba

Pemanfaatan dalam bioteknologi, industri pangan, kesehatan, pertanian, serta pengelolaan lingkungan. Contoh pengaplikasiannya : Bioremediasi, produksi pangan fermentasi, vaksin, biofertilizer.

E. Konsep Fisiologis

Fisiologi mikroba adalah cabang mikrobiologi yang mempelajari fungsi-fungsi dasar kehidupan mikroorganisme pada tingkat seluler, biokimia, dan molekuler. Fokus utamanya adalah bagaimana mikroba memperoleh energi, menggunakan nutrisi, melakukan metabolisme, tumbuh, beradaptasi, dan berinteraksi dengan lingkungannya (Madigan et al., 2019).

Di dalam tulisannya, Ezemba menyatakan bahwa konsep fisiologi adalah studi dari proses-proses yang terjadi dalam organisme hidup. Di sisi lain, istilah Metabolisme merujuk pada keseluruhan reaksi kimia yang terjadi di dalam sel organisme hidup. Reaksi kimia dan proses yang melibatkan pembentukan yang disebut dengan *Anabolisme* serta pemecahan nutrisi di dalam sel disebut yang disebut *Katabolisme*. Metabolisme dapat dipandang sebagai keseimbangan energi, dan aliran kimia serta energi yang seimbang ini mempertahankan kehidupan sel. Reaksi kimia ini menyediakan energi dan menciptakan zat-zat yang mempertahankan kehidupan. Oleh karena itu, jalur metabolisme dapat dikategorikan menjadi dua jenis umum – katabolik dan anabolik. (Ezemba, 2022)

1. Metabolisme

Metabolisme dapat dikategorikan menjadi 2, yakni :

a. Reaksi Katabolisme

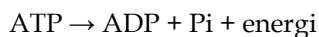
Dalam sel hidup, reaksi kimia yang diatur oleh enzim dan melepaskan energi umumnya terlibat dalam katabolisme, yaitu pemecahan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Reaksi-reaksi ini disebut reaksi katabolik atau reaksi degradatif. Reaksi katabolik umumnya merupakan reaksi hidrolisis yakni reaksi yang menggunakan air dan di mana ikatan kimia

terputus, dan bersifat exergonic yakni menghasilkan lebih banyak energi daripada yang dikonsumsi. Misalnya, ketika sel memecah gula menjadi karbon dioksida dan air.

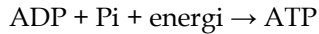
b. Reaksi Anabolisme

Reaksi-reaksi yang memerlukan energi dan diatur oleh enzim sebagian besar terlibat dalam anabolisme, yaitu pembentukan molekul organik kompleks dari molekul yang lebih sederhana. Reaksi-reaksi ini disebut reaksi anabolik atau biosintetik. Proses anabolik sering melibatkan reaksi sintesis dehidrasi (reaksi yang melepaskan air), dan bersifat endergonik (mengonsumsi lebih banyak energi daripada yang dihasilkan). Contoh proses anabolik meliputi pembentukan protein dari asam amino, asam nukleat dari nukleotida, dan polisakarida dari gula sederhana. Reaksi biosintetik ini menghasilkan bahan-bahan yang diperlukan untuk pertumbuhan sel.

Reaksi katabolik menyediakan bahan baku untuk reaksi anabolik dan menyediakan energi yang diperlukan untuk menggerakkan reaksi anabolik. Pengikatan antara reaksi yang memerlukan energi dan reaksi yang melepaskan energi ini dimungkinkan melalui molekul Adenosine Triphosphate (ATP). Jadi, ATP menyimpan energi yang berasal dari reaksi katabolik dan melepaskannya kemudian untuk menggerakkan reaksi anabolik dan melakukan pekerjaan seluler lainnya. Sebuah molekul ATP terdiri dari adenina, ribosa, dan tiga kelompok fosfat. Ketika kelompok fosfat terminal dipisahkan dari ATP, adenosine diphosphate (ADP) terbentuk, dan energi dilepaskan untuk menggerakkan reaksi anabolik. Menggunakan P_i untuk mewakili kelompok fosfat (P_i mewakili fosfat anorganik yang tidak terikat pada molekul lain), reaksi ini ditulis sebagai berikut:



Kemudian, energi dari reaksi katabolik digunakan untuk menggabungkan ADP dan mensintesis ulang ATP:



Oleh karena itu, reaksi anabolik dikaitkan dengan pemecahan ATP, sedangkan reaksi katabolik dikaitkan dengan sintesis ATP. Hanya sebagian dari energi yang dilepaskan dalam katabolisme yang sebenarnya tersedia untuk fungsi seluler, karena sebagian energi hilang ke lingkungan sebagai panas. Karena sel harus menggunakan energi untuk mempertahankan kehidupan, sel memiliki kebutuhan terus-menerus akan sumber energi eksternal baru.

Hal-hal yang menjadi point yang perlu ditekankan adalah:

- a. Kunci dalam metabolisme yakni enzim dan molekul adenosine triphosphate (ATP). Jalur metabolik sel (urutan reaksi kimia) ditentukan oleh enzimnya, yang pada gilirannya ditentukan oleh susunan genetik sel.
- b. Enzim mengkatalisis reaksi untuk molekul spesifik yang disebut substrat. Selama reaksi enzimatis, substrat diubah menjadi zat baru yang disebut produk.
- c. Enzim umumnya berupa protein, yang memungkinkan diperlukannya molekul non-protein lain yang disebut koenzim untuk berfungsi. Koenzim anorganik meliputi ion logam. Koenzim organik, atau koenzim, meliputi pembawa elektron FAD, NAD⁺, dan NADP⁺.
- d. Beberapa reaksi tidak akan terjadi tanpa energi, meskipun enzim hadir. Adenosin trifosfat (ATP) adalah molekul yang digunakan sel untuk mengelola kebutuhan energinya.
- e. Jika suatu reaksi menghasilkan energi berlebih, sebagian dapat disimpan dalam bentuk ikatan ATP. Sel kemudian dapat memecah ikatan tersebut dan menggunakan energi yang dilepaskan untuk menggerakkan reaksi lain.

Dengan kata lain, jalur Katabolik dan Anabolik saling terhubung melalui energi. Reaksi katabolik menyediakan energi yang diperlukan untuk reaksi anabolik. Meskipun metabolisme mikroba dapat menyebabkan penyakit dan kerusakan makanan, banyak jalur metabolisme yang bermanfaat, diantaranya :

- a. Siklus nitrogen: Nitrogen merupakan komponen kunci dalam protein, DNA, RNA, dan klorofil tumbuhan. Namun, tanpa mikroba, nitrogen yang tersedia untuk kebanyakan bentuk kehidupan akan sangat sedikit. Bakteri tertentu (seperti *Rhizobium* dalam nodul akar kedelai) di tanah mengubah nitrogen dari atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh organisme lain.
- b. Minuman dan makanan: Berbagai bakteri dan ragi (seperti *Saccharomyces cerevisiae*) melakukan reaksi katabolik yang disebut fermentasi. Bir, anggur, dan makanan seperti keju, yogurt, acar, sauerkraut, dan kecap memanfaatkan metabolisme mikroba sebagai bagian penting dari proses produksi.
- c. Pengolahan limbah: Air terkontaminasi menjalani berbagai proses biologis di fasilitas pengolahan limbah seperti pabrik ini. Banyak bakteri, termasuk beberapa spesies cyanobacteria, berperan dalam menghilangkan materi organik berbahaya.
- d. Obat-obatan: Industri farmasi menggunakan berbagai bakteri dan jamur dalam produksi antibiotik, seperti penisilin (diperoleh dari jamur *Penicillium*). Bacitracin, eritromisin, dan pengobatan lain seperti vaksin, vitamin, dan enzim juga diperoleh dari metabolisme mikroba.

2. *Collision Theory*

Reaksi kimia terjadi ketika ikatan kimia terbentuk atau terputus. Agar reaksi terjadi, atom, ion, atau molekul harus bertabrakan. *Collision Theory* menjelaskan bagaimana reaksi kimia terjadi dan bagaimana faktor-faktor tertentu memengaruhi laju reaksi tersebut. Dasar dari *Collision Theory*

adalah bahwa semua atom, ion, dan molekul terus bergerak dan bertabrakan satu sama lain. Energi yang ditransfer oleh partikel dalam tabrakan dapat mengganggu struktur elektron mereka cukup untuk memecah ikatan kimia atau membentuk ikatan baru. Beberapa faktor menentukan apakah tabrakan akan menyebabkan reaksi kimia: kecepatan partikel yang bertabrakan, energinya, dan konfigurasi kimia spesifiknya. Hingga batas tertentu, semakin tinggi kecepatan partikel, semakin besar kemungkinan tabrakan mereka akan menyebabkan reaksi. Selain itu, setiap reaksi kimia memerlukan tingkat energi tertentu. Namun, meskipun partikel yang bertabrakan memiliki energi minimum yang diperlukan untuk reaksi, reaksi tidak akan terjadi kecuali partikel-partikel tersebut berorientasi dengan benar satu sama lain.

Kecepatan reaksi—frekuensi tabrakan yang memiliki energi cukup untuk memicu reaksi—bergantung pada jumlah molekul reaktan yang berada pada atau di atas tingkat energi aktivasi. Salah satu cara untuk meningkatkan kecepatan reaksi suatu zat adalah dengan menaikkan suhunya. Dengan membuat molekul bergerak lebih cepat, panas meningkatkan baik frekuensi tabrakan maupun jumlah molekul yang mencapai energi aktivasi. Jumlah tabrakan juga meningkat ketika tekanan ditingkatkan atau ketika reaktan lebih terkonsentrasi (karena jarak antara molekul berkurang). Dalam sistem hidup, enzim meningkatkan laju reaksi tanpa meningkatkan suhu.

3. Reaksi Enzim dan Kimia

Zat yang dapat mempercepat reaksi kimia tanpa mengalami perubahan permanen disebut katalis. Dalam sel hidup, enzim berfungsi sebagai katalis biologis. Sebagai katalis, setiap enzim bekerja pada zat tertentu yang disebut substrat enzim (atau substrat-substrat, jika ada dua atau lebih reaktan), dan setiap enzim hanya mengkatalisis satu reaksi. Misalnya, sukrosa (gula meja) adalah substrat enzim sukrasa, yang mengkatalisis hidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan

fruktosa. Sebagai katalis, enzim umumnya mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi reaksi. Enzim memilih substrat dari antara molekul-molekul yang beragam dalam sel. Konfigurasi unik setiap enzim memungkinkan enzim tersebut “menemukan” substrat yang tepat dari antara molekul-molekul yang beragam dalam sel. Namun, situs aktif dan substrat bersifat fleksibel, dan keduanya berubah bentuk sedikit saat bertemu untuk saling menyesuaikan dengan lebih erat. Substrat biasanya jauh lebih kecil daripada enzim, dan relatif sedikit asam amino enzim yang membentuk situs aktif. Sebuah senyawa tertentu dapat menjadi substrat untuk beberapa enzim yang berbeda yang mengkatalisis reaksi yang berbeda, sehingga nasib senyawa tersebut bergantung pada enzim yang bertindak padanya. Setidaknya empat enzim yang berbeda dapat bertindak pada glukosa 6-fosfat, molekul yang penting dalam metabolisme sel, dan setiap reaksi akan menghasilkan produk yang berbeda.

Enzim sangat efisien. Dalam kondisi optimal, enzim dapat mengkatalisis reaksi dengan kecepatan 10^8 hingga 10^{10} kali (hingga 10 miliar kali) lebih tinggi daripada reaksi serupa tanpa enzim. Angka putaran (jumlah maksimum molekul substrat yang diubah enzim menjadi produk setiap detik) umumnya berkisar antara 1 hingga 10.000 dan dapat mencapai 500.000. Misalnya, enzim DNA polymerase I, yang berperan dalam sintesis DNA, memiliki angka perputaran 15, sedangkan enzim *lactate dehydrogenase*, yang menghilangkan atom hidrogen dari asam laktat, memiliki angka perputaran 1.000. Banyak enzim dalam sel terdapat dalam bentuk aktif dan tidak aktif. Kecepatan enzim beralih antara kedua bentuk ini ditentukan oleh lingkungan seluler.

a. Penamaan Enzim

Nama enzim biasanya berakhir dengan akhiran “ase”. Semua enzim dapat dikelompokkan ke dalam enam kelas, berdasarkan jenis reaksi kimia yang mereka katalisis. Enzim dalam setiap kelas utama diberi nama

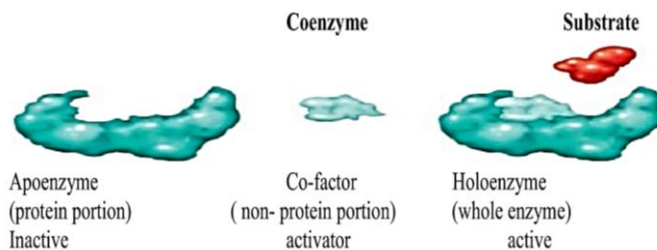
berdasarkan jenis reaksi yang lebih spesifik yang mereka bantu. Misalnya, kelas yang disebut *oxidoreductases* terlibat dalam reaksi oksidasi-reduksi (akan dijelaskan nanti). Enzim dalam kelas *oxidoreductase* yang menghilangkan hidrogen (H) dari substrat disebut *dehidrogenase*; yang menambahkan elektron ke oksigen molekuler (O₂) disebut *oksidase*. Seperti yang akan Anda lihat nanti, enzim *dehidrogenase* dan *oksidase* memiliki nama yang lebih spesifik, seperti *laktat dehidrogenase* dan *sitokrom oksidase*, tergantung pada substrat spesifik yang mereka katalisis.

b. Komponen Enzim

Meskipun beberapa enzim terdiri sepenuhnya dari protein, kebanyakan enzim terdiri dari bagian protein yang disebut *apoenzim* dan komponen nonprotein yang disebut *kofaktor*. Ion besi, seng, magnesium, atau kalsium adalah contoh *kofaktor*. Jika *kofaktor* berupa molekul organik, maka disebut *koenzim*. *Apoenzim* tidak aktif secara mandiri; mereka harus diaktifkan oleh *kofaktor*. Bersama-sama, *apoenzim* dan *kofaktor* membentuk *holoenzim*, atau enzim utuh yang aktif. Jika *kofaktor* dihilangkan, *apoenzim* tidak akan berfungsi. *Kofaktor* dapat membantu mengkatalisis reaksi dengan membentuk jembatan antara enzim dan substratnya. Misalnya, magnesium (Mg²⁺) diperlukan oleh banyak enzim *fosforilasi* (enzim yang mentransfer kelompok fosfat dari ATP ke substrat lain). Mg²⁺ dapat membentuk ikatan antara enzim dan molekul ATP. Sebagian besar unsur *trace* yang dibutuhkan oleh sel hidup kemungkinan digunakan dengan cara serupa untuk mengaktifkan enzim seluler.

Koenzim dapat membantu enzim dengan menerima atom yang dihilangkan dari substrat atau dengan menyumbangkan atom yang dibutuhkan oleh substrat. Beberapa *koenzim* bertindak sebagai pembawa elektron, menghilangkan elektron dari substrat dan

menyumbangkannya ke molekul lain dalam reaksi selanjutnya. Banyak koenzim berasal dari vitamin. Dua koenzim paling penting dalam metabolisme seluler adalah nikotinamida adenin dinukleotida (NAD^{+}) dan nikotinamida adenin dinukleotida fosfat (NADP^{+}). Kedua senyawa ini mengandung turunan dari vitamin B niacin (asam nikotinat) dan keduanya berfungsi sebagai pembawa elektron. Sementara NAD^{+} terutama terlibat dalam reaksi katabolik (yang menghasilkan energi), NADP^{+} terutama terlibat dalam reaksi anabolik (yang memerlukan energi). Koenzim flavin, seperti flavin mononukleotida (FMN) dan flavin adenina dinukleotida (FAD), mengandung turunan vitamin B riboflavin dan juga bertindak sebagai pembawa elektron. Koenzim penting lainnya, koenzim A (CoA), mengandung turunan asam pantotenat, vitamin B lainnya. Koenzim ini memainkan peran penting dalam sintesis dan pemecahan lemak serta dalam serangkaian reaksi oksidasi yang disebut siklus Krebs.



Gambar 2.1 Komponen Enzim
(Ezemba, 2022)

c. Faktor Yang Mempengaruhi Aktivitas Enzimatik

Enzim merupakan subyek untuk kontrol berbagai seluler. Dua jenis utamanya adalah kontrol sintesis enzim dan kontrol aktivitas enzim (seberapa banyak enzim yang ada dibandingkan seberapa aktifnya). Beberapa faktor mempengaruhi aktivitas enzim. Di antara yang lebih penting adalah: suhu, pH, konsentrasi substrat, dan adanya atau ketiadaan inhibitor.

1) Temperatur

Kecepatan reaksi kimia umumnya meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Molekul bergerak lebih lambat pada suhu rendah dibandingkan pada suhu tinggi, sehingga mungkin tidak memiliki energi yang cukup untuk memicu reaksi kimia. Namun, pada reaksi enzimatik, peningkatan suhu melebihi suhu optimal (suhu optimal) secara drastis mengurangi kecepatan reaksi. Suhu optimal untuk sebagian besar bakteri penyebab penyakit dalam tubuh manusia berkisar antara 35°C dan 40°C. Kecepatan reaksi menurun di atas suhu optimal karena denaturasi enzim, yaitu hilangnya struktur tiga dimensi khasnya (konfigurasi tersier). Denaturasi protein melibatkan pemutusan ikatan hidrogen dan ikatan non-kovalen lainnya; contoh umum adalah perubahan putih telur mentah (protein bernama albumin) menjadi keadaan yang mengeras akibat panas. Denaturasi enzim mengubah susunan asam amino di situs aktif, mengubah bentuknya, dan menyebabkan enzim kehilangan kemampuan katalitiknya. Dalam beberapa kasus, denaturasi dapat sebagian atau sepenuhnya reversibel. Namun, jika denaturasi berlanjut hingga enzim kehilangan kelarutannya dan menggumpal, enzim tidak dapat kembali ke sifat aslinya. Enzim juga dapat mengalami denaturasi akibat asam pekat, basa, ion logam berat (seperti timbal, arsenik, atau merkuri), alkohol, dan radiasi ultraviolet.

2) pH

Secara umum, enzim memiliki pH optimum di mana aktivitasnya paling tinggi, yaitu sekitar pH 5,0. Di atas atau di bawah nilai pH ini, aktivitas enzim, dan oleh karena itu laju reaksi, menurun. Ketika konsentrasi H^+ (pH) dalam medium berubah secara drastis, struktur tiga dimensi protein mengalami perubahan. Perubahan pH yang ekstrem dapat

menyebabkan denaturasi. Asam (dan basa) mengubah struktur tiga dimensi protein karena ion H^+ (dan OH^-) bersaing dengan ikatan hidrogen dan ikatan ionik dalam enzim, yang mengakibatkan denaturasi enzim.

3) Konsentrasi Substrat

Dalam kondisi konsentrasi substrat yang tinggi, enzim dikatakan berada dalam keadaan saturasi; artinya, situs aktifnya selalu terisi oleh molekul substrat atau produk, dan enzim tersebut mengkatalisis reaksi spesifik pada laju maksimumnya. Laju maksimum ini hanya dapat dicapai ketika konsentrasi substrat sangat tinggi. Dalam kondisi ini, peningkatan lebih lanjut dalam konsentrasi substrat tidak akan mempengaruhi laju reaksi karena semua situs aktif sudah terpakai. Dalam kondisi seluler normal, enzim tidak dalam keadaan jenuh dengan substrat. Pada setiap waktu tertentu, banyak molekul enzim tidak aktif karena kekurangan substrat; oleh karena itu, konsentrasi substrat kemungkinan besar mempengaruhi laju reaksi.

4) Inhibitor

Cara yang efektif untuk mengendalikan pertumbuhan bakteri adalah dengan mengendalikan atau menghambat enzim mereka. Beberapa racun, seperti sianida, arsenik, dan merkuri, berikatan dengan enzim dan mencegah bakteri berfungsi. Akibatnya, sel-sel berhenti berfungsi dan mati. Penghambat enzim diklasifikasikan menjadi penghambat kompetitif atau nonkompetitif. Penghambat kompetitif mengisi situs aktif enzim dan bersaing dengan substrat normal untuk situs aktif tersebut. Inhibitor kompetitif dapat melakukan hal ini karena bentuk dan struktur kimianya mirip dengan substrat normal. Namun, berbeda dengan substrat, inhibitor ini tidak mengalami reaksi untuk membentuk produk. Beberapa inhibitor kompetitif terikat secara irreversibel pada asam amino

di situs aktif, mencegah interaksi lebih lanjut dengan substrat. Yang lain terikat secara reversibel, bergantian menempati dan meninggalkan situs aktif; ini memperlambat interaksi enzim dengan substrat. Meningkatkan konsentrasi substrat dapat mengatasi inhibisi kompetitif reversibel. Saat situs aktif tersedia, lebih banyak molekul substrat daripada molekul inhibitor kompetitif tersedia untuk terikat pada situs aktif enzim. Misalnya, sulfanilamide (obat antibakteri yang kuat), yang menghambat enzim yang substrat normalnya adalah asam para-aminobenzoat (PABA): PABA adalah nutrisi esensial yang digunakan oleh banyak bakteri dalam sintesis asam folat, vitamin yang berfungsi sebagai koenzim. Ketika sulfanilamide diberikan kepada bakteri, enzim yang biasanya mengubah PABA menjadi asam folat justru berikatan dengan sulfanilamide. Asam folat tidak disintesis, dan bakteri tidak dapat tumbuh. Karena sel manusia tidak menggunakan PABA untuk membuat asam folat mereka, sulfanilamide dapat membunuh bakteri tetapi tidak merusak sel manusia.

5) Inhibitor Nonkompetitif

Inhibitor nonkompetitif tidak bersaing dengan substrat untuk situs aktif enzim; sebaliknya, mereka berinteraksi dengan bagian lain dari enzim. Dalam proses ini, yang disebut inhibisi alosterik ("ruang lain"), inhibitor mengikat ke situs pada enzim selain situs pengikatan substrat, yang disebut situs alosterik. Pengikatan ini menyebabkan situs aktif berubah bentuk, sehingga menjadi tidak berfungsi. Akibatnya, aktivitas enzim berkurang. Efek ini dapat bersifat reversibel atau irreversibel, tergantung pada apakah *active site* dapat kembali ke bentuk aslinya. Dalam beberapa kasus, interaksi allosterik dapat mengaktifkan enzim daripada menghambatnya. Jenis lain dari inhibisi nonkompetitif dapat terjadi pada

enzim yang memerlukan ion logam untuk aktivitasnya. Beberapa senyawa kimia dapat mengikat atau mengikat ion logam aktivator dan sehingga mencegah reaksi enzimatik. Sianida dapat mengikat besi pada enzim yang mengandung besi, dan fluorida dapat mengikat kalsium atau magnesium. Senyawa seperti sianida dan fluorida kadang-kadang disebut racun enzim karena mereka secara permanen menonaktifkan enzim.

d. Penghambatan Umpan balik (*Feedback Inhibition*)

Nonkompetitif, atau alosterik, inhibitor yang berperan dalam mekanisme pengendalian biokimia yang disebut inhibisi umpan balik (*Feedback Inhibition*) atau inhibisi produk akhir (*end-product inhibition*). Mekanisme pengendalian ini mencegah sel memproduksi lebih banyak zat daripada yang dibutuhkan, sehingga menghindari pemborosan sumber daya kimia. Dalam beberapa reaksi metabolik, beberapa langkah diperlukan untuk sintesis senyawa kimia tertentu, yang disebut produk akhir. Proses ini mirip dengan jalur perakitan, di mana setiap langkah dikatalisis oleh enzim yang berbeda. Dalam banyak jalur metabolik, produk akhir dapat menghambat secara alosterik aktivitas salah satu enzim yang berada di tahap awal jalur tersebut.

Inhibisi umpan balik umumnya bekerja pada enzim pertama dalam jalur metabolik (seperti menghentikan jalur produksi dengan menghentikan pekerja pertama). Karena enzim tersebut dihambat, produk reaksi enzimatik pertama dalam jalur tersebut tidak disintesis. Karena produk yang tidak disintesis tersebut biasanya menjadi substrat untuk enzim kedua dalam jalur tersebut, reaksi kedua juga berhenti secara instan. Dengan demikian, meskipun hanya enzim pertama dalam jalur yang dihambat, seluruh jalur berhenti beroperasi, dan tidak ada produk akhir baru yang terbentuk. Dengan menghambat enzim pertama dalam jalur, sel juga mencegah

penumpukan intermediat metabolik. Saat sel menghabiskan produk akhir yang sudah ada, situs alosterik enzim pertama tetap tidak terikat lebih sering, dan jalur kembali aktif.

Bakteri *E. coli* dapat digunakan untuk mendemonstrasikan inhibisi umpan balik dalam sintesis asam amino isoleusin, yang diperlukan untuk pertumbuhan sel. Dalam jalur metabolik ini, asam amino treonin diubah secara enzimatis menjadi isoleusin melalui lima langkah. Jika isoleusin ditambahkan ke medium pertumbuhan *E. coli*, hal ini menghambat enzim pertama dalam jalur tersebut, dan bakteri berhenti mensintesis isoleusin. Kondisi ini dipertahankan hingga pasokan isoleusin habis. Jenis inhibisi umpan balik ini juga terlibat dalam mengatur produksi asam amino lain oleh sel, serta vitamin, purin, dan pirimidin.

e. Ribozim

Sebelum tahun 1982, diyakini bahwa hanya molekul protein yang memiliki aktivitas enzim. Kemudian, para peneliti yang bekerja pada mikroba menemukan jenis RNA unik yang disebut ribozim. Seperti enzim protein, ribozim berfungsi sebagai katalis, memiliki situs aktif yang mengikat substrat, dan tidak habis dalam reaksi kimia. Ribozim memotong dan menyambung RNA serta terlibat dalam sintesis protein di ribosom.

f. Produksi Energi

Molekul nutrisi, seperti semua molekul, memiliki energi yang terkait dengan elektron yang membentuk ikatan antara atom-atomnya. Ketika energi ini tersebar di seluruh molekul, sel sulit untuk menggunakannya. Berbagai reaksi dalam jalur katabolik, bagaimanapun, mengkonsentrasikan energi tersebut ke dalam ikatan ATP, yang berfungsi sebagai pembawa energi yang praktis. ATP umumnya disebut memiliki “ikatan berenergi tinggi”. Sebenarnya, istilah yang lebih tepat mungkin adalah ikatan yang tidak stabil. Meskipun

jumlah energi dalam ikatan ini tidak terlalu besar, energi tersebut dapat dilepaskan dengan cepat dan mudah. Dalam arti tertentu, ATP mirip dengan cairan yang sangat mudah terbakar seperti kerosene. Meskipun sebatang kayu besar mungkin akhirnya terbakar untuk menghasilkan lebih banyak panas daripada secangkir kerosene, kerosene lebih mudah dinyalakan dan memberikan panas lebih cepat dan praktis. Dengan cara yang serupa, ikatan “berenergi tinggi” yang tidak stabil pada ATP menyediakan energi yang siap digunakan untuk reaksi anabolik. Ada dua aspek umum dalam produksi energi: konsep oksidasi-reduksi dan mekanisme pembentukan ATP.

g. Reaksi Oksidasi-Reduksi

Oksidasi adalah proses penghilangan elektron (e^-) dari atom atau molekul, suatu reaksi yang sering menghasilkan energi. Contoh reaksi oksidasi di mana molekul A kehilangan elektron ke molekul B. Molekul A telah mengalami oksidasi (artinya telah kehilangan satu atau lebih elektron), sedangkan molekul B telah mengalami reduksi (artinya telah memperoleh satu atau lebih elektron).^{*} Reaksi oksidasi dan reduksi selalu berpasangan: setiap kali suatu zat mengalami oksidasi, zat lain secara bersamaan mengalami reduksi. Pasangan reaksi ini disebut reaksi oksidasi-reduksi atau reaksi redoks. Dalam banyak reaksi oksidasi seluler, elektron dan proton (ion hidrogen, H^+) dihilangkan secara bersamaan; ini setara dengan penghilangan atom hidrogen, karena atom hidrogen terdiri dari satu proton dan satu elektron. Karena sebagian besar reaksi oksidasi biologis melibatkan kehilangan atom hidrogen, reaksi ini juga disebut reaksi dehidrogenasi. Sebuah molekul organik teroksidasi dengan kehilangan dua atom hidrogen, dan molekul NAD^+ tereduksi. Ingat bahwa NAD^+ membantu enzim dengan menerima atom hidrogen yang telah dihilangkan dari substrat, dalam hal

ini molekul organik. Misalnya, NAD^+ menerima dua elektron dan satu proton. Satu proton (H^+) tersisa dan dilepaskan ke medium sekitar. Koenzim yang direduksi, NADH , mengandung lebih banyak energi daripada NAD^+ . Energi ini dapat digunakan untuk menghasilkan ATP dalam reaksi selanjutnya.

Penting untuk diingat bahwa sel menggunakan reaksi oksidasi-reduksi biologis dalam katabolisme untuk mengekstrak energi dari molekul nutrisi. Sel mengambil nutrisi, sebagian diantaranya berfungsi sebagai sumber energi, dan mendegradasi molekul-molekul tersebut dari senyawa yang sangat tereduksi (dengan banyak atom hidrogen) menjadi senyawa yang sangat teroksidasi. Misalnya, ketika sel mengoksidasi molekul glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) menjadi CO_2 dan H_2O , energi dalam molekul glukosa dilepaskan secara bertahap dan akhirnya disimpan oleh ATP, yang kemudian dapat berfungsi sebagai sumber energi untuk reaksi yang membutuhkan energi. Senyawa seperti glukosa yang memiliki banyak atom hidrogen merupakan senyawa yang sangat tereduksi, mengandung jumlah energi potensial yang besar. Oleh karena itu, glukosa merupakan nutrisi yang berharga bagi organisme.

h. Pembentukan ATP

Sebagian besar energi yang dilepaskan selama reaksi oksidasi-reduksi disimpan dalam sel melalui pembentukan ATP. Secara spesifik, kelompok fosfat anorganik, P_i , ditambahkan ke ADP dengan masukan energi untuk membentuk ATP. Penambahan P_i ke senyawa kimia disebut fosforilasi. Organisme menggunakan tiga mekanisme fosforilasi untuk menghasilkan ATP dari ADP.

1) Fosforilasi Tingkat Substrat

Dalam fosforilasi tingkat substrat, ATP biasanya dihasilkan ketika P_i berenergi tinggi secara langsung ditransfer dari senyawa yang difosforilasi (substrat) ke

ADP. Secara umum, Pi telah memperoleh energinya selama reaksi sebelumnya di mana substrat itu sendiri mengalami oksidasi.

2) Fosforilasi Oksidatif

Dalam fosforilasi oksidatif, elektron ditransfer dari senyawa organik ke sekelompok pembawa elektron (biasanya NAD^+ dan FAD). Kemudian, elektron tersebut diteruskan melalui serangkaian pembawa elektron yang berbeda ke molekul oksigen (O_2) atau molekul anorganik dan organik yang teroksidasi lainnya. Proses ini terjadi di membran plasma prokariota dan di membran mitokondria dalam eukariota. Urutan pembawa elektron yang digunakan dalam fosforilasi oksidatif disebut rantai transportasi elektron (sistem). Transfer elektron dari satu pembawa elektron ke pembawa berikutnya melepaskan energi, sebagian dari energi tersebut digunakan untuk menghasilkan ATP dari ADP melalui proses yang disebut chemiosmosis.

3) Fotofosforilasi

Mekanisme ketiga fosforilasi, fotofosforilasi, hanya terjadi pada sel fotosintetik yang mengandung pigmen penangkap cahaya seperti klorofil. Dalam fotosintesis, molekul organik, terutama gula, disintesis menggunakan energi cahaya dari bahan baku yang rendah energi, yaitu karbon dioksida dan air. Fotofosforilasi memulai proses ini dengan mengubah energi cahaya menjadi energi kimia ATP dan NADPH, yang kemudian digunakan untuk mensintesis molekul organik. Seperti pada fosforilasi oksidatif, rantai transportasi elektron terlibat dalam proses ini.

i. Jalur Metabolik Penghasil Energi

Organisme melepaskan dan menyimpan energi dari molekul organik melalui serangkaian reaksi terkontrol daripada dalam satu ledakan besar. Jika energi dilepaskan sekaligus sebagai jumlah panas yang besar,

energi tersebut tidak dapat digunakan dengan mudah untuk menggerakkan reaksi kimia dan bahkan dapat merusak sel. Untuk mengekstrak energi dari senyawa organik dan menyimpannya dalam bentuk kimia, organisme mentransfer elektron dari satu senyawa ke senyawa lain melalui serangkaian reaksi oksidasi-reduksi. Serangkaian reaksi kimia yang dikatalisis oleh enzim yang terjadi dalam sel disebut jalur metabolik. Produk sekunder, seperti CO_2 dan H_2O , kadang-kadang disebut produk sampingan atau limbah. Perlu diingat bahwa hampir setiap reaksi dalam jalur metabolik dikatalisis oleh enzim spesifik; terkadang nama enzim dicantumkan di dekat panah.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriani *et al.* (2023) *Bakteriologi (untuk Mahasiswa Kesehatan)*. Edited by Apriani. Makasar: PT. Masagena Mandiri Medica.
- Brul, S. and Westerhoff, H. V. (2007) *Systems biology and food microbiology, Modelling Microorganisms in Food*. Amsterdam: Woodhead Publishing Limited. Available at: <https://doi.org/10.1533/9781845692940.2.250>.
- Ezemba, C.C. (2022) '(Mcb 303) Microbial Physiology and Metabolism', (March).
- Fardiaz, S. (1992) *Mikrobiologi pangan 1*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2019). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Pelczar, M. J., Chan, E. C. S., & Krieg, N. R. (2008). *Microbiology: An Application Based Approach*. Tata McGraw-Hill.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2017). *Microbiology* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Purwoko, T. (2009). *Fisiologi Mikroba*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Rini, C.S., & Rochman, J. (2020). *Bakteriologi Dasar*. Sidoarjo: UMSIDA Press.
- Suryani, Y. (2022). *Fisiologi Mikroorganisme*. Bandung: Gunung Djati Publishing.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2020). *Microbiology: An introduction* (13th ed.). Pearson
- Tortora, G.J., Funke, B.R., & Case, C.L. (2010). *Microbiology: An Introduction*. 10th Edition. San Francisco: Benjamin Cummings.

BAB 3

PERTUMBUHAN MIKROBA

dr. Ronald Aprianto Parubak, Sp.MK.

A. Pendahuluan

Pertumbuhan mikroba merupakan suatu proses yang sangat kompleks dan membutuhkan beberapa faktor yang mendukung proses metabolisme dari mikroba. Proses ini merupakan sifat asli dari makhluk hidup dan terus menerus berkembang dan berubah menurut waktu. Pertumbuhan mikroba adalah sebuah proses pertambahan jumlah selnya bukan pertambahan ukuran dari mikroba itu sendiri, hal ini menyebabkan populasi mikroba di lingkungan cenderung seimbang antara pertumbuhan dan kematian mikroba itu sendiri. Mikroba sendiri mampu melakukan semua proses metabolisme ini dengan memanfaatkan segala macam nutrisi atau sumber bahan makanan baik dari substrat organik maupun substrat anorganik. Kemampuan mikroba dalam melakukan semua proses kompleks ini merupakan suatu kondisi alamiah yang dilakukan mikroba dalam beradaptasi untuk mempertahankan kelangsungan hidup mikroba itu sendiri. Kemampuan mikroba dalam melakukan proses pertumbuhan ini berbeda satu dengan yang lainnya, sebagai contoh kebutuhan substrat yang dibutuhkan oleh virus berbeda dengan kebutuhan atau jenis substrat yang dibutuhkan oleh bakteri, jamur maupun protozoa. Sebagai contoh lain proses replikasi virus hanya dapat terjadi pada sel hidup sebagai inang dari virus itu sendiri yang dapat menyebabkan kematian dari sel inang akibat proses

penyisipan bahan protein (glikoprotein) dari virus itu sendiri atau replikasi ini tidak sampai mengakibatkan kerusakan pada sel inang. Waktu yang diperlukan dalam melakukan proses pertumbuhan antara beberapa mikroba ini pun berbeda satu dengan yang lainnya. Kunci dalam pertumbuhan mikroba ini adalah keseimbangan antara ketersediaan sumber bahan makanan dengan kondisi fisiologis mikroba itu sendiri.

Dalam praktik sehari-hari sebagai seorang mikrobiologi klinik, pemahaman terhadap proses pertumbuhan mikroba ini sangat menentukan proses terjadinya infeksi dalam tubuh seseorang. Pada ilmu mikrobiologi lingkungan, pertumbuhan mikroba ini sangat menentukan bagaimana mikroorganisme memberikan respon terhadap lingkungannya dan hal ini dapat digunakan oleh ahli teknik lingkungan untuk mengaplikasi teknologi untuk pemanfaatan, pengendalian dan pemantauan mikroorganisme yang menunjang program sanitasi lingkungan (Trihadiningrum 2021).

B. Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroba

Pertumbuhan mikroba mempunyai beberapa karakteristik yang khas yang harus dipahami yaitu pertumbuhan mikroba merupakan suatu peningkatan jumlah sel mikroba sebagai hasil dari reproduksi mikroba melalui pembelahan biner dan terjadi secara asinkron dimana tidak semua sel membelah pada saat yang sama secara tepat dan pertumbuhan sel ini dapat diukur dari konsentrasi sel (pengukuran kekeruhan atau penghitungan sel) atau melalui densitas biomassa.

Pertumbuhan mikroba juga dipengaruhi oleh 3 faktor utama yaitu faktor lingkungan dan faktor nutrisi.

1. Faktor Lingkungan

Faktor lingkungan memiliki peran penting dalam mempengaruhi laju pertumbuhan bakteri dan faktor lingkungan ini dapat dipertimbangkan saat melakukan kultur bakteri di laboratorium. 3 faktor lingkungan yang mempengaruhi laju pertumbuhan yaitu:

a. Suhu

Setiap makhluk hidup di muka bumi dalam mempunyai ketergantungan terhadap suhu lingkungan dalam mempertahankan kehidupannya, hal ini juga berpengaruh pada pertumbuhan mikroba yang memerlukan kondisi suhu tertentu untuk melakukan prosesnya. Suhu terendah dimana mikroba dapat tumbuh disebut *minimum growth temperature* dan suhu tertinggi dimana mikroba dapat tumbuh disebut *maximum growth temperature* (Noorhamdani *et al.* 2017).

Atas dasar faktor suhu yang diperlukan untuk pertumbuhan ini maka mikroba diklasifikasi berdasarkan suhu optimal untuk pertumbuhannya.

- 1) Psikrofil (*cold loving bacteria*) yaitu bakteri yang tumbuh pada suhu (0-20)⁰C dan memiliki kemampuan untuk tumbuh optimal pada suhu 25⁰C. Contoh mikroba yang tumbuh pada suhu ini adalah mikroba laut.
- 2) Mesofil (*moderate temperature loving bacteria*) yaitu bakteri yang tumbuh pada suhu (25-40)⁰C dan memiliki suhu tubuh yang optimal pada suhu 37⁰C, bakteri ini patogen pada manusia yang berarti dapat menyebabkan penyakit infeksi pada tubuh manusia.
- 3) Termofil (*heat loving bacteria*) yaitu bakteri yang tumbuh pada suhu (50-60)⁰C.

b. pH

Pertumbuhan mikroba sangat dipengaruhi tingkat keasam-basa dari media pertumbuhannya. Hampir sebagian besar mikroba - mikroba yang patogen pada tubuh manusia mempunyai pH optimum 6,5 - 7,5 kelompok bakteri ini disebut *Neutrofil*. Sedangkan mikroba yang dapat tumbuh pada pH 1-5 disebut *Asidofil*, contoh : *Lactobacillus*, *Acetobacter*. Mikroba yang dapat tumbuh pada pH 8-11 disebut *Alkalifil*, contoh : *Vibrio cholerae*.

c. Tekanan osmosis

Bakteri tersusun dari 80%-90% air atau H₂O sehingga dalam hal ini air atau H₂O berperan sangat penting dalam proses pertumbuhan mikroba dan untuk menjaga keseimbangan konsentrasi di dalam sel bakteri maka diperlukan tekanan osmosis untuk menjaga keseimbangan tersebut. Tekanan osmosis berperan penting menjaga atau mempertahankan bakteri tetap hidup, sebagai contoh apabila mikroba berada pada larutan dengan konsentrasi yang lebih tinggi dari konsentrasi yang ada di dalam sel bakteri maka terjadi pengeluaran cairan melalui membran sitoplasma yang disebut *plasmolysis*. Selain tekanan osmosis, konsentrasi garam juga mempengaruhi pertumbuhan mikroba, mikroba yang memerlukan kadar garam yang tinggi hingga mencapai 30% disebut *extreme halophiles*, sebagai contoh mikroba yang berada pada laut mati, sedangkan mikroba yang dapat tumbuh pada kadar garam 10%-15% disebut *facultative halophiles* misal bakteri *Vibrio parahaemolyticus*.

2. Faktor Nutrisi

Beberapa sumber nutrisi mayor yang sangat penting dibutuhkan oleh mikroba untuk pertumbuhannya, hal ini menjadi penting karena tidak semua bakteri membutuhkan sumber nutrisi yang sama, terkadang beberapa sumber nutrisi justru menjadi faktor yang menghambat pertumbuhan beberapa bakteri.

a. Karbon

Kebutuhan sumber karbon sebagai nutrisi dalam pertumbuhan mikroba menjadi sangat penting karena berat unsur karbon merupakan setengah dari berat kering bakteri.

Berdasarkan sumber karbon yang digunakan untuk pertumbuhan mikroba maka mikroba dibagi menjadi klasifikasi :

- 1) *Kemoheterotrof*, yaitu mikroba yang memerlukan sumber karbon yang berasal dari protein, karbohidrat dan lipid.
- 2) *Kemoautotrof*, yaitu mikroba yang memerlukan sumber karbonnya sebagian berasal dari karbon dioksida (CO₂).
- 3) *Fotoautotrof*, yaitu mikroba yang memerlukan seluruh sumber karbonnya berasal dari karbon dioksida (CO₂).

b. Nitrogen, Sulfur dan Fosfor

Dalam pertumbuhan mikroba sintesis protein pada mikroba membutuhkan nitrogen dan sulfur sebagai nutrisi, nitrogen diperoleh dari hasil proses dekomposisi bahan organik yang berasal dari ion ammonium serta senyawa nitrat dan nitrogen. Nitrogen dalam hal ini merupakan sumber nutrisi yang sangat diperlukan untuk mensintesis asam amino yang selanjutnya oleh bakteri akan digunakan untuk mensintesis protein, DNA dan RNA. Unsur – unsur seperti nitrogen, sulfur dan fosfor selama ini menjadi sumber nutrisi yang penting bagi pertumbuhan mikroba terutama dalam menyusun bagian – bagian sel mikroba itu sendiri dan terlebih juga dalam pembentukan ATP yang nantinya akan digunakan sebagai sumber energi dari mikroba.

c. Oksigen

Beberapa mikroba terutama bakteri memiliki karakteristik yang berbeda terhadap kebutuhan oksigen dalam pertumbuhannya. Berikut klasifikasi mikroba terhadap kebutuhan oksigen :

- 1) Bakteri *aerob obligat*, merupakan bakteri yang mutlak membutuhkan oksigen dalam pertumbuhannya. Misal: *M. tuberculosis*.
- 2) Bakteri *anaerob obligat*, merupakan bakteri yang hidup bila tidak ada oksigen. Misal : *Clostridium tetani*
- 3) Bakteri *anaerob fakultatif*, merupakan bakteri yang tumbuh saat didapatkan oksigen ataupun disaat kondisi tidak terdapat oksigen

- 4) Bakteri *mikroaerofilik*, merupakan bakteri yang dapat hidup bila tekanan oksigennya rendah. Misal : *Neisseria gonorrhoeae*.

d. Senyawa Logam

Senyawa logam atau yang biasa disebut *trace element* merupakan bahan nutrisi yang juga diperlukan dalam pertumbuhan dan kehidupan mikroba meskipun dalam jumlah yang sedikit. Beberapa senyawa logam seperti Fe, Cu dan Zn didapatkan di alam terutama di air.

Kemampuan mikroba dalam melakukan pengambilan bahan makanan (*nutrient uptake*) merupakan suatu proses memindahkan bahan makanan yang berada disekitar mikroba untuk dibawa ke dalam sitoplasma juga menjadi faktor yang menentukan kelangsungan hidup suatu mikroorganisme. Terdapat dua cara pengambilan makanan oleh mikroba, yang pertama adalah pengambilan secara aktif dimana proses pengambilan ini menggunakan sistem pembawa seperti pada bakteri Gram negatif yang menggunakan sistem permease (*beta-galaktosida permease*) atau dengan menggunakan *periplasmic binding protein*. Pengambilan secara pasif biasanya terjadi pada bahan nutrisi yang ukuran berat molekul yang diambil lebih kecil dan dipengaruhi oleh tekanan osmosis, pengambilan secara pasif ini disebut cara difusi. Sedangkan untuk ukuran berat molekul yang lebih besar seperti polisakarida (selulosa, tepung, pektin), protein, lipid dan asam nukleat, beberapa mikroba menggunakan eksoenzim. Eksoenzim ini berperan dalam memecah bahan nutrisi yang ada di lingkungan sekitar menjadi ukuran yang lebih kecil dan mudah untuk masuk ke dalam sel. Eksoenzim ini dihasilkan oleh bakteri pada akhir fase logaritmik. Beberapa eksoenzim yang dihasilkan oleh bakteri adalah lesitinase, hialuronidase, nikotinamide, proteinase.

C. Pertumbuhan Bakteri

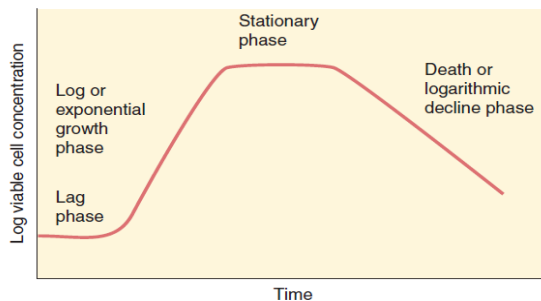
Bakteri pada dasarnya berkembang biak dengan cara membelah diri. Proses pembelahan diri dilakukan oleh bakteri secara *binary fission*, dimana bakteri membelah dari satu menjadi dua, dari dua menjadi empat dan seterusnya. Pada proses membelah diri bakteri memerlukan waktu, waktu yang diperlukan bakteri untuk membelah diri ini disebut disebut *generation time* atau *doubling time*. Setiap bakteri memiliki *generation time* yang berbeda-beda satu dengan yang lainnya, umumnya waktu pembelahan bakteri sekitar 1-3 jam, namun ada beberapa bakteri yang memiliki *generation time* yang sangat panjang sekitar 24 jam atau lebih, sebagai contoh pada *M. tuberculosis* memiliki *generation time* sekitar 15 jam dan ada beberapa bakteri yang memiliki *generation time* yang cukup pendek seperti *Escherichia coli* yaitu sekitar 20 menit.

1. Fase Pertumbuhan Bakteri

Pada proses pertumbuhannya pada sebuah media perbenihan bakteri diamati berdasarkan perhitungan jumlah bakteri yang hidup maka bakteri mengalami empat fase pertumbuhan bakteri yang diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Fase Penyesuaian (*Lag phase*)
- b. Fase Pembelahan (*Logarithmic phase*)
- c. Fase Stationer (*Stationary phase*)
- d. Fase Penurunan (*Death phase*)

Empat fase pertumbuhan yang digambarkan pada kurva berikut ini :



Gambar 3.1 Grafik Pertumbuhan Bakteri
(Jawetz, Melnick & Adelberg 2019)

Fase Penyesuaian (*Lag phase*)

Sebuah bakteri yang dibiakkan ke dalam suatu media, pada awalnya akan mengalami fase penyesuaian, dimana dalam hal ini bakteri menyesuaikan dengan kondisi lingkungan di sekitarnya. Lama fase penyesuaian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

a. Media dan lingkungan pertumbuhan

Jika media dan lingkungan pertumbuhan sama seperti media sebelumnya, maka bakteri tidak akan melakukan proses adaptasinya, tetapi jika bahan nutrisi dan kondisi lingkungan yang baru berbeda dengan sebelumnya maka pertumbuhan bakteri akan mengalami proses adaptasi.

b. Jumlah inokulum

Jumlah awal bakteri jika semakin banyak yang diinokulasi pada sebuah media maka akan mempercepat fase adaptasi dari bakteri tersebut.

Pada fase ini bakteri akan mengalami beberapa keadaan, yaitu peningkatan aktivitas metabolisme, peningkatan sintesis protoplasma, peningkatan asam nukleat dan peningkatan ukuran sel.

Fase Pembelahan (*Logarithmic phase*)

Pada fase ini bakteri akan membelah dengan sangat cepat secara maksimum dan konstan, hal ini sangat dipengaruhi oleh faktor media tempat pertumbuhan bakteri seperti pH dan kandungan bahan nutrisinya begitu juga suhu dan kelembapan udara. Bakteri membutuhkan energi atau ATP yang lebih banyak daripada fase lainnya. Pada fase ini aktivitas bakteri sangat tinggi, baik dalam metabolisme dan pembelahan selnya. Akhir dari fase ini adalah terjadi penurunan kecepatan pertumbuhan populasi yang disebabkan oleh nutrisi di dalam media yang sudah berkurang dan adanya hasil dari metabolisme yang beracun yang bersifat menghambat pertumbuhan bakteri.

Fase Stationer (*Stationary phase*)

Pada fase ini jumlah populasi sel tetap, hal ini diakibatkan oleh jumlah sel yang tumbuh sama dengan jumlah sel yang mati dan kecepatan pertumbuhan mencapai titik terendahnya. Ketika bahan nutrisi telah habis tetapi sel tetap membelah mengakibatkan ukuran sel dari bakteri menjadi lebih kecil dan pada fase ini bakteri lebih tahan terhadap keadaan ekstrim seperti panas, dingin, radiasi dan bahan-bahan kimia sebagai proses mempertahankan kelangsungan hidupnya.

Fase Penurunan (*Death phase*)

Pada fase ini terjadi kematian sel bakteri sehingga terjadi penurunan populasi bakteri, hal ini disebabkan nutrisi di dalam media telah habis dan energi cadangan di dalam sel telah habis. Kecepatan kematian sel bakteri dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi, kondisi lingkungan dan jenis bakteri itu sendiri.

2. Pengukuran Pertumbuhan Bakteri

Metode pengukuran pertumbuhan bakteri dapat dibedakan menjadi metode langsung dan tidak langsung. Contoh pengukuran pertumbuhan bakteri dengan metode langsung hitungan mikroskopik dengan menggunakan hemositometer biasanya digunakan untuk mengukur pertumbuhan bakteri pada susu dan hitungan cawan yang biasa digunakan untuk mengukur pertumbuhan bakteri susu, air, makanan, tanah. Sedangkan contoh pengukuran pertumbuhan bakteri dengan metode tidak langsung adalah sebagai berikut :

- a. Berdasarkan kekeruhan, bila suspensi biakan cairan dan homogen
- b. Berdasarkan berat kering sel, bila suspensi biakan kental dan tidak homogen
- c. Berdasarkan kadar nitrogen, bila suspensi biakan kental dan tidak homogen
- d. Berdasarkan aktivitas biokimia dengan uji mikrobiologis

Parameter yang digunakan untuk mengukur pertumbuhan bakteri dengan menggunakan densitas massa sel dan konsentrasi sel bakteri. Prinsip pengukuran densitas massa sel adalah pengukuran berat kering sel per unit volume biakan (*culture*), sedangkan prinsip pengukuran konsentrasi sel bakteri adalah pengukuran jumlah sel per unit volume perbenihan cair bakteri.

3. Kontrol Terhadap Pertumbuhan Mikroba

Kontrol terhadap pertumbuhan mikroba dapat dilakukan dengan cara membunuh mikroba atau menghambat pertumbuhannya dapat dilakukan secara fisik, kimia dan biologi.

- a. Fisik, kontrol ini menggunakan uap air dan tekanan tinggi, sterilisasi dengan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C dengan tekanan 15 psi/1.5 kg/cm² selama 15 menit sangat efektif dalam mengontrol pertumbuhan mikroba.
- b. Kimia, kontrol ini menggunakan senyawa kimia untuk mengendalikan pertumbuhan mikroba. Senyawa kimia yang dapat mengendalikan pertumbuhan mikroba dapat dibedakan menjadi antiseptik, desinfektan dan bahan kemoterapik. Antiseptik adalah substansi kimia yang digunakan pada jaringan hidup yang dapat menghambat pertumbuhan mikroba, desinfektan adalah substansi kimia yang dapat menghambat pertumbuhan sel vegetatif pada materi yang tidak hidup, bahan kemoterapik adalah substansi kimia yang dapat merusak/menghambat pertumbuhan mikroba dalam jaringan hidup.
- c. Mekanik, kontrol ini digunakan untuk bahan yang mudah rusak karena pemanasan misalnya vitamin, enzim, serum dan antibiotik. Contoh : filtrasi, pasteurisasi dan tindalisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Mahon, C.R. & Lehman, D.C., 2019. *Textbook of Diagnostic Microbiology*. 6th ed. St. Louis, MO: Elsevier.
- Noorhamdani., Sumarno, Roekistiningsih., Santosaningsih, D., Mulyastuti, Y., Rahayu, S.I., Santoso, S., Dzen, S.M., Winarsih, S., Hidayati, D.Y.N., Erikawati, D. & Fitri, B.S., 2018. *Bakteriologi Medik*. Edisi ke-3. Jakarta: IRDH (International Research and Development for Human Beings).
- Riedel, S., Morse, S.A., Mietzner, T. & Miller, S., 2019. *Jawetz, Melnick & Adelberg's Medical Microbiology*. 28th ed. New York: McGraw-Hill Education.

BAB

4

HABITAT MIKROORGANISME

apt. Muhammad Akmal A Sukara, S.Farm., M.Si.

A. Pendahuluan

Mikroorganisme merupakan kelompok makhluk hidup mikroskopis yang keberadaannya tersebar hampir di seluruh permukaan bumi. Mereka memiliki kemampuan adaptasi yang luar biasa terhadap variasi kondisi lingkungan, mulai dari tanah, air, udara, hingga lingkungan yang ekstrem. Pemahaman mengenai habitat mikroorganisme menjadi penting karena habitat menentukan pola hidup, interaksi, serta peranan mikroorganisme dalam keseimbangan ekosistem. Dalam konteks farmasi, pengetahuan ini sangat esensial karena banyak senyawa bioaktif dan metabolit yang dimanfaatkan dalam pengembangan obat justru berasal dari mikroba yang hidup pada habitat spesifik (Madigan et al., 2019).

Kajian tentang habitat mikroorganisme tidak dapat dilepaskan dari cabang ilmu ekologi mikroba. Ekologi mikroba mempelajari hubungan timbal balik antara mikroorganisme dengan lingkungannya serta interaksi dengan organisme lain. Pengetahuan ini membantu dalam menjelaskan bagaimana mikroorganisme berperan dalam siklus biogeokimia, penyediaan energi, hingga kontribusinya dalam bidang kesehatan maupun penyakit. Pemahaman mendalam terhadap habitat mikroorganisme memungkinkan mahasiswa dan peneliti untuk menghubungkan aspek teoritis dengan aplikasi

nyata dalam bidang farmasi, baik dalam produksi antibiotik, probiotik, maupun bioteknologi farmasi (Prescott et al., 2020).

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi molekuler dan bioinformatika telah memperluas wawasan mengenai keragaman mikroorganisme dalam berbagai habitat. Teknik seperti metagenomik dan analisis 16S rRNA memungkinkan peneliti mengidentifikasi komunitas mikroba tanpa harus melalui tahap kultur konvensional. Hal ini memperlihatkan bahwa habitat mikroorganisme jauh lebih kompleks dan kaya dibandingkan dengan apa yang dapat ditumbuhkan di laboratorium (Whitman, 2015). Oleh karena itu, mahasiswa farmasi perlu memahami bahwa setiap habitat mikroba menyimpan potensi baru dalam penemuan molekul bioaktif untuk terapi modern.

Dalam ruang lingkup farmasi, habitat mikroorganisme menjadi dasar dalam memahami sumber daya alami yang dapat dikembangkan menjadi produk kesehatan. Misalnya, bakteri tanah menghasilkan antibiotik penting seperti streptomisin dan tetracyclin, sedangkan mikroorganisme laut diketahui memproduksi senyawa antitumor dan antiinflamasi (Clardy et al., 2006). Pemahaman terhadap habitat juga memberikan gambaran tentang potensi risiko, seperti penyebaran mikroorganisme patogen di rumah sakit yang dapat menimbulkan infeksi nosokomial. Hal ini menjadikan penguasaan konsep habitat mikroorganisme tidak hanya penting secara akademis tetapi juga strategis dalam praktik kefarmasian.

B. Pengertian Habitat dan Ekologi Mikroorganisme

Habitat mikroorganisme dapat dipahami sebagai lingkungan alami tempat mikroorganisme hidup, tumbuh, dan berinteraksi dengan faktor biotik maupun abiotik. Habitat ini mencakup media fisik seperti tanah, air, udara, maupun jaringan organisme hidup. Konsep habitat sangat penting karena menentukan distribusi, adaptasi, serta peranan mikroorganisme dalam suatu ekosistem. Berbeda dengan makroorganisme yang

memiliki keterbatasan ruang gerak, mikroorganisme dapat hidup hampir di seluruh permukaan bumi, termasuk di lingkungan ekstrem yang tidak mendukung kehidupan organisme lain (Madigan et al., 2019).

Secara ekologis, habitat tidak hanya menyediakan ruang fisik, tetapi juga menciptakan kondisi kimia dan fisika yang memengaruhi metabolisme mikroorganisme. Faktor-faktor seperti pH, suhu, tekanan osmotik, ketersediaan oksigen, serta sumber nutrisi menentukan jenis mikroorganisme yang dapat bertahan hidup. Sebagai contoh, mikroba asidofilik hanya dapat tumbuh baik pada lingkungan dengan pH rendah, sementara halofilik membutuhkan kadar garam yang tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa habitat bersifat selektif terhadap jenis mikroba yang dapat berkembang di dalamnya (Prescott et al., 2020).

Ekologi mikroba merupakan ilmu yang mempelajari hubungan timbal balik antara mikroorganisme dengan lingkungannya, baik dalam skala individu, populasi, maupun komunitas. Dalam konteks ini, ekologi mikroba tidak hanya berfokus pada keberadaan mikroorganisme, tetapi juga menelaah interaksi mereka dengan organisme lain seperti tumbuhan, hewan, dan manusia. Interaksi ini dapat bersifat mutualisme, komensalisme, maupun parasitisme. Dengan memahami ekologi mikroba, kita dapat menjelaskan peranan penting mikroorganisme dalam menjaga keseimbangan ekosistem serta dampaknya terhadap kesehatan manusia (Ryan & Ray, 2020).

Salah satu aspek penting dalam ekologi mikroba adalah keberadaan mikrobioma, yaitu komunitas mikroorganisme yang hidup bersama dalam suatu habitat tertentu. Mikrobioma dapat ditemukan di berbagai lingkungan, termasuk tubuh manusia. Penelitian menunjukkan bahwa mikrobioma berperan penting dalam menjaga kesehatan, misalnya mikrobioma usus yang membantu pencernaan dan produksi vitamin. Sebaliknya, ketidakseimbangan dalam komunitas ini dapat memicu munculnya penyakit. Hal ini menegaskan bahwa habitat

mikroorganisme bukanlah entitas pasif, melainkan sistem dinamis yang memiliki implikasi besar terhadap kehidupan (Gilbert et al., 2018).

Konsep habitat juga mencakup skala mikroskopis hingga makroskopis. Pada skala mikroskopis, mikroorganisme dapat membentuk biofilm, yaitu komunitas mikroba yang melekat pada suatu permukaan dan dilindungi oleh matriks polimer. Biofilm merupakan contoh habitat mikroorganisme yang unik, karena mampu memberikan perlindungan terhadap kondisi lingkungan yang tidak bersahabat. Biofilm banyak dijumpai pada permukaan gigi, kateter medis, maupun pipa industri. Keberadaan biofilm memiliki dampak signifikan, baik secara positif dalam proses biodegradasi maupun secara negatif dalam menyebabkan infeksi kronis (Hall-Stoodley et al., 2004).

Pemahaman habitat mikroorganisme juga tidak dapat dipisahkan dari konsep niche ekologi. Niche menggambarkan peran mikroorganisme dalam ekosistem, termasuk bagaimana ia memperoleh nutrisi, berinteraksi dengan organisme lain, dan memengaruhi lingkungannya. Dua mikroorganisme yang menempati habitat yang sama dapat memiliki niche yang berbeda, sehingga memungkinkan mereka untuk hidup berdampingan. Konsep niche membantu menjelaskan mengapa komunitas mikroba sangat beragam meskipun berada dalam ruang yang terbatas (Whitman, 2015).

Dalam bidang farmasi, pemahaman tentang habitat dan ekologi mikroorganisme memiliki relevansi praktis. Misalnya, eksplorasi mikroorganisme tanah telah menghasilkan berbagai antibiotik penting, sedangkan mikroba laut memberikan senyawa bioaktif baru yang potensial sebagai obat antikanker. Selain itu, pengetahuan mengenai habitat mikroba patogen di rumah sakit sangat penting dalam mengembangkan strategi pencegahan infeksi nosokomial. Oleh karena itu, mahasiswa farmasi perlu memahami bahwa studi ekologi mikroba tidak hanya berorientasi pada teori, tetapi juga berimplikasi langsung pada penemuan obat dan kesehatan masyarakat (Clardy et al., 2006).

Perkembangan teknologi molekuler telah memperkaya pemahaman tentang habitat mikroorganisme. Teknik sekuensing DNA generasi baru memungkinkan identifikasi ribuan spesies mikroba dalam suatu sampel tanpa harus melalui tahap kultur konvensional. Penemuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar mikroba yang ada di alam tidak dapat dikultur menggunakan metode klasik. Dengan demikian, konsep habitat kini tidak hanya dipahami dari apa yang terlihat di laboratorium, tetapi juga mencakup komunitas tersembunyi yang hanya dapat diungkap melalui pendekatan molekuler (Quince et al., 2017).

Selain memberikan manfaat, habitat mikroorganisme juga dapat menjadi sumber ancaman. Mikroorganisme patogen yang beradaptasi pada tubuh manusia mampu menimbulkan berbagai penyakit infeksi. Habitat rumah sakit, dengan berbagai prosedur medis invasif, menjadi tempat ideal bagi mikroba resisten berkembang. Fenomena ini memunculkan tantangan besar dalam bidang farmasi, khususnya terkait resistensi antibiotik. Oleh karena itu, penguasaan konsep habitat dan ekologi mikroorganisme penting dalam mengembangkan strategi penanggulangan penyakit infeksi modern (World Health Organization, 2020).

Dengan demikian, pengertian habitat dan ekologi mikroorganisme bukan hanya sekadar terminologi dasar, tetapi merupakan fondasi dalam memahami dinamika kehidupan mikroba. Habitat menentukan distribusi, keberagaman, dan adaptasi mikroorganisme, sementara ekologi menjelaskan interaksi serta peranan mereka dalam ekosistem. Bagi bidang farmasi, pemahaman ini membuka peluang besar dalam penemuan senyawa bioaktif baru sekaligus menjadi kunci dalam menghadapi tantangan kesehatan global.

C. Hubungan Mikroorganisme dengan Lingkungannya

Hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya merupakan aspek fundamental dalam memahami dinamika kehidupan mikroba. Mikroorganisme tidak hidup secara

terisolasi, melainkan senantiasa berinteraksi dengan faktor fisika, kimia, dan biotik di sekitarnya. Faktor lingkungan tersebut akan memengaruhi pertumbuhan, metabolisme, serta kemampuan mikroba untuk bertahan hidup. Sebaliknya, mikroorganisme juga mampu memodifikasi lingkungannya melalui aktivitas metabolik, misalnya dengan menghasilkan asam organik yang menurunkan pH atau menghasilkan enzim yang mengubah komposisi nutrisi dalam suatu ekosistem (Madigan et al., 2019).

Salah satu bentuk hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya adalah interaksi dengan faktor abiotik. Suhu, kelembaban, ketersediaan cahaya, serta komposisi kimia habitat menentukan spesies mikroba yang dapat tumbuh. Misalnya, mikroorganisme psikrofil mampu beradaptasi pada suhu rendah di bawah 15°C, sedangkan termofil dapat tumbuh optimal pada suhu tinggi lebih dari 55°C. Hal ini menunjukkan bahwa habitat membentuk tekanan selektif yang menuntut mikroorganisme mengembangkan mekanisme adaptasi spesifik (Prescott et al., 2020).

Selain faktor abiotik, hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya juga mencakup interaksi dengan faktor biotik. Mikroba berinteraksi dengan organisme lain dalam bentuk simbiosis, baik mutualisme, komensalisme, maupun parasitisme. Sebagai contoh, bakteri *Rhizobium* yang hidup di akar tanaman leguminosa melakukan hubungan mutualisme dengan menyediakan nitrogen hasil fiksasi, sementara tanaman menyediakan karbohidrat sebagai sumber energi. Interaksi semacam ini memperlihatkan bahwa mikroorganisme merupakan bagian integral dari ekosistem dan memiliki kontribusi penting dalam siklus nutrisi (Ryan & Ray, 2020).

Hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya juga terlihat pada kemampuan mereka membentuk komunitas kompleks, seperti biofilm. Dalam biofilm, mikroorganisme melekat pada permukaan dan menghasilkan matriks polisakarida yang melindungi komunitas dari perubahan lingkungan. Keberadaan biofilm meningkatkan resistensi

terhadap antibiotik dan desinfektan, sehingga menjadi tantangan besar dalam dunia medis. Sebaliknya, biofilm juga bermanfaat, misalnya dalam pengolahan limbah cair melalui sistem trickling filter (Hall-Stoodley et al., 2004).

Dalam konteks kesehatan manusia, hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya sangat nyata pada sistem mikrobiota tubuh. Lingkungan usus, kulit, dan saluran pernapasan menjadi habitat mikroba yang secara kolektif dikenal sebagai mikrobioma. Hubungan ini sebagian besar bersifat komensalisme atau mutualisme, di mana mikroba membantu pencernaan, memproduksi vitamin, serta melindungi tubuh dari invasi patogen. Gangguan lingkungan internal, seperti penggunaan antibiotik berlebihan, dapat merusak keseimbangan mikrobiota dan memicu penyakit, misalnya infeksi *Clostridioides difficile* (Gilbert et al., 2018).

Hubungan yang bersifat antagonistik juga penting dipahami. Mikroorganisme dapat bersaing satu sama lain untuk mendapatkan nutrisi atau ruang hidup. Persaingan ini mendorong munculnya senyawa antibiotik alami yang diproduksi oleh mikroba tertentu untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain. Fenomena ini tidak hanya menjelaskan dinamika ekologi mikroba, tetapi juga dimanfaatkan dalam bidang farmasi sebagai sumber penemuan obat antimikroba baru (Clardy et al., 2006).

Lingkungan juga dapat memengaruhi ekspresi genetik mikroorganisme. Beberapa mikroba menunjukkan fenomena regulasi gen yang dipicu oleh kondisi lingkungan tertentu. Sebagai contoh, bakteri patogen *Vibrio cholerae* hanya mengekspresikan toksinnya ketika berada pada lingkungan usus manusia. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan mikroorganisme dengan lingkungan bersifat adaptif dan kompleks, di mana ekspresi fenotipe sering kali bergantung pada stimulus eksternal (Nelson & Cox, 2017).

Dari perspektif ekosistem global, mikroorganisme berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan. Mereka terlibat dalam siklus biogeokimia, seperti fiksasi

nitrogen, dekomposisi bahan organik, dan fotosintesis oleh cyanobacteria. Proses-proses ini sangat penting dalam menyediakan nutrisi dan energi bagi organisme lain, sehingga mikroorganisme dapat dipandang sebagai pilar utama keberlangsungan kehidupan di bumi (Falkowski et al., 2008).

Namun, hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya juga dapat menimbulkan dampak negatif. Pencemaran lingkungan, misalnya oleh logam berat atau limbah industri, dapat mengakibatkan perubahan struktur komunitas mikroba. Beberapa mikroorganisme mampu bertahan dengan cara mengembangkan resistensi atau mekanisme detoksifikasi, sementara yang lain tidak mampu bertahan hidup. Dampak ini pada akhirnya berpengaruh terhadap stabilitas ekosistem secara keseluruhan dan bahkan dapat meningkatkan risiko penyebaran mikroba patogen (Atlas & Bartha, 2013).

Dengan demikian, hubungan mikroorganisme dengan lingkungannya merupakan aspek yang sangat luas, meliputi interaksi dengan faktor abiotik, biotik, hingga peran global dalam siklus ekosistem. Pemahaman tentang dinamika ini tidak hanya memberikan wawasan ilmiah, tetapi juga relevan dalam bidang farmasi dan kesehatan masyarakat. Melalui pemahaman ini, mahasiswa dapat melihat bahwa mikroorganisme bukan sekadar entitas mikroskopis, tetapi aktor penting yang membentuk dan dipengaruhi oleh lingkungannya secara timbal balik.

D. Klasifikasi Habitat Mikroorganisme

Klasifikasi habitat mikroorganisme merupakan salah satu aspek fundamental dalam mikrobiologi lingkungan maupun farmasi. Habitat mikroorganisme dapat dibedakan berdasarkan berbagai faktor, seperti kondisi fisik, kimia, maupun interaksi biologis dengan organisme lain. Pendekatan klasifikasi ini penting karena memungkinkan peneliti dan praktisi memahami persebaran, adaptasi, serta potensi aplikasi mikroorganisme dalam bidang farmasi, kesehatan, dan industri (Madigan et al., 2019). Dengan memahami keragaman habitat, kita dapat

memetakan fungsi ekologis mikroorganisme serta mengoptimalkan pemanfaatannya.

Salah satu pendekatan klasifikasi habitat mikroorganisme adalah berdasarkan kondisi lingkungan, yaitu habitat ekstrem dan habitat moderat. Habitat ekstrem mencakup lingkungan dengan kondisi yang sangat berbeda dari standar kehidupan manusia, seperti suhu tinggi, kadar garam tinggi, atau pH ekstrem. Mikroorganisme yang hidup di lingkungan ini dikenal sebagai ekstremofil, misalnya termofil, halofil, dan asidofil. Sebaliknya, habitat moderat mencakup tanah, air tawar, udara, dan jaringan makhluk hidup yang memiliki kondisi relatif stabil (Rothschild & Mancinelli, 2001).

Berdasarkan komponen fisik, habitat mikroorganisme dapat dibedakan menjadi habitat daratan (terrestrial), perairan (aquatic), serta udara. Mikroorganisme tanah merupakan komponen penting dalam siklus biogeokimia, termasuk dekomposisi bahan organik dan fiksasi nitrogen. Sementara itu, mikroorganisme akuatik dapat ditemukan baik di air tawar maupun laut, memainkan peran dalam rantai makanan akuatik dan siklus karbon. Habitat udara, meskipun relatif sementara, berfungsi sebagai media perantara bagi penyebaran mikroorganisme patogen dan non-patogen (Tortora et al., 2020).

Selain berdasarkan lingkungan fisik, habitat mikroorganisme juga dapat diklasifikasikan menurut asosiasinya dengan organisme lain. Dalam hal ini, terdapat mikroorganisme bebas (free-living) dan mikroorganisme yang hidup dalam asosiasi simbiosis dengan inang. Bentuk simbiosis tersebut bisa berupa mutualisme, komensalisme, maupun parasitisme. Misalnya, mikrobiota usus manusia berperan penting dalam metabolisme dan kesehatan, sementara beberapa mikroorganisme lain dapat menyebabkan infeksi (Prescott et al., 2017).

Klasifikasi habitat juga dapat ditinjau dari aspek kimiawi, misalnya ketersediaan oksigen. Mikroorganisme aerob membutuhkan oksigen untuk bertahan hidup, sementara anaerob dapat berkembang tanpa kehadiran oksigen, bahkan

ada yang bersifat anaerob obligat yang justru terhambat oleh oksigen. Selain itu, terdapat mikroaerofil yang membutuhkan oksigen dalam kadar rendah, serta fakultatif anaerob yang mampu beradaptasi dengan kondisi beroksigen maupun tanpa oksigen (Madigan et al., 2019).

Habitat mikroorganisme juga dapat dikaitkan dengan faktor energi dan sumber karbon yang dimanfaatkan. Berdasarkan hal ini, mikroorganisme dibedakan menjadi fototrof yang memanfaatkan cahaya sebagai sumber energi, dan kemotrof yang menggunakan senyawa kimia. Sementara itu, berdasarkan sumber karbon, terdapat autotrof yang menggunakan CO₂ sebagai sumber karbon, serta heterotrof yang membutuhkan senyawa organik (Tortora et al., 2020). Klasifikasi ini penting dalam memahami metabolisme mikroorganisme pada berbagai habitat.

Dalam konteks farmasi, klasifikasi habitat mikroorganisme sangat relevan, terutama dalam hal penemuan antibiotik dan metabolit sekunder. Banyak senyawa bioaktif ditemukan pada mikroorganisme tanah, khususnya genus *Streptomyces*. Sementara itu, habitat ekstrem telah terbukti menjadi sumber mikroorganisme baru yang mampu menghasilkan enzim dan metabolit dengan potensi farmasi tinggi (Baltz, 2019). Dengan demikian, eksplorasi habitat yang berbeda dapat memperluas kemungkinan penemuan obat-obatan baru.

Lebih lanjut, pemahaman klasifikasi habitat mikroorganisme membantu dalam upaya pengendalian infeksi. Mikroorganisme patogen dapat ditemukan di berbagai habitat, mulai dari air yang terkontaminasi, udara, hingga jaringan inang. Mengetahui di mana mikroorganisme tersebut hidup dan bagaimana mereka berpindah habitat menjadi kunci dalam pencegahan dan pengendalian penyakit (Prescott et al., 2017).

Klasifikasi habitat juga memiliki implikasi dalam bidang bioteknologi lingkungan. Mikroorganisme tanah dan air banyak digunakan dalam bioremediasi untuk menguraikan polutan, sementara mikroorganisme ekstremofil dimanfaatkan dalam

proses industri yang membutuhkan kondisi ekstrim, seperti suhu tinggi atau pH rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pengelompokan habitat tidak hanya bermanfaat untuk tujuan akademik, tetapi juga memiliki signifikansi praktis (Rothschild & Mancinelli, 2001).

Secara keseluruhan, klasifikasi habitat mikroorganisme memberikan kerangka kerja untuk memahami keragaman, adaptasi, serta potensi aplikasi mikroorganisme dalam berbagai bidang. Dengan membedakan habitat berdasarkan faktor fisik, kimiawi, dan biologis, kita dapat menilai kontribusi masing-masing kelompok mikroorganisme terhadap ekosistem maupun kehidupan manusia. Pemahaman ini sekaligus menjadi dasar dalam pembelajaran mikrobiologi farmasi, di mana habitat mikroorganisme memiliki kaitan erat dengan potensi terapeutik maupun patogeniknya.

E. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Habitat Mikroorganisme

Habitat mikroorganisme tidak hanya ditentukan oleh lokasi tempat mereka berada, melainkan juga oleh berbagai faktor lingkungan yang berperan dalam mendukung atau menghambat pertumbuhannya. Faktor-faktor tersebut mencakup kondisi fisik, kimia, dan biologis yang secara bersama-sama menciptakan suatu ekosistem mikroba yang khas. Memahami faktor-faktor ini sangat penting, terutama dalam konteks farmasi, karena dapat membantu memprediksi distribusi mikroorganisme, mengendalikan pertumbuhan patogen, serta mengeksplorasi mikroba untuk kepentingan bioteknologi (Prescott et al., 2017).

Suhu merupakan faktor utama yang memengaruhi keberadaan mikroorganisme. Suhu menentukan laju metabolisme dan aktivitas enzimatik. Berdasarkan toleransi suhu, mikroorganisme dapat diklasifikasikan menjadi psikrofil (hidup optimal pada suhu rendah), mesofil (suhu sedang, termasuk patogen manusia), dan termofil (suhu tinggi). Kondisi ekstrem juga dihuni oleh hipertermofil, yang dapat tumbuh pada suhu mendekati 100°C. Hal ini menunjukkan bahwa

adaptasi suhu merupakan mekanisme penting dalam menentukan habitat mikroorganisme (Madigan et al., 2019).

Selain suhu, pH lingkungan juga berperan signifikan. Sebagian besar mikroorganisme tumbuh optimal pada pH netral (6,5–7,5), namun ada kelompok asidofil yang hidup pada lingkungan dengan pH rendah, serta alkalifil yang mampu bertahan di lingkungan basa. Faktor pH ini memengaruhi struktur protein, permeabilitas membran, dan ketersediaan nutrisi. Dengan demikian, pH menjadi parameter kunci dalam menentukan jenis mikroorganisme yang dapat bertahan hidup di suatu habitat (Tortora et al., 2020).

Kelembaban dan ketersediaan air juga menjadi faktor vital. Air berfungsi sebagai medium reaksi biokimia, pelarut nutrisi, dan agen transportasi metabolit. Mikroorganisme memiliki toleransi yang berbeda terhadap tekanan osmotik. Halofil, misalnya, mampu hidup pada lingkungan dengan kadar garam tinggi, sementara sebagian besar mikroba lain membutuhkan kondisi dengan kadar air bebas yang cukup. Oleh karena itu, aktivitas mikroorganisme sangat bergantung pada kondisi osmotik lingkungannya (Prescott et al., 2017).

Oksigen merupakan faktor lain yang berperan penting. Beberapa mikroorganisme bersifat aerob obligat, membutuhkan oksigen untuk respirasi, sedangkan anaerob obligat justru mati bila terkena oksigen. Ada pula mikroorganisme fakultatif anaerob yang dapat hidup baik dengan atau tanpa oksigen, serta mikroaerofil yang memerlukan oksigen dalam konsentrasi rendah. Distribusi mikroorganisme dalam habitat tertentu seringkali dipengaruhi oleh gradien oksigen yang tersedia (Madigan et al., 2019).

Selain faktor fisik dan kimia, ketersediaan nutrisi juga memengaruhi habitat mikroorganisme. Unsur makro seperti karbon, nitrogen, fosfor, dan sulfur merupakan komponen penting untuk pertumbuhan. Sumber karbon dapat berasal dari senyawa organik (heterotrof) atau anorganik (autotrof), sementara nitrogen penting untuk sintesis protein dan asam nukleat. Habitat dengan kelimpahan nutrisi tertentu akan

mendukung populasi mikroba yang spesifik (Tortora et al., 2020).

Interaksi biologis juga menjadi faktor penentu dalam habitat mikroorganisme. Mikroba dapat berkompetisi untuk mendapatkan nutrisi, bersimbiosis dengan organisme lain, atau bahkan menghasilkan senyawa antimikroba untuk menghambat pesaingnya. Contoh yang menonjol adalah mikrobiota usus manusia yang hidup berdampingan dengan inang, memberikan manfaat dalam metabolisme, namun juga saling bersaing untuk mempertahankan keseimbangan ekosistem (Berg et al., 2020).

Selain itu, cahaya matahari dapat menjadi faktor penting, khususnya bagi mikroorganisme fototrof yang memanfaatkan energi cahaya untuk fotosintesis. Intensitas dan panjang gelombang cahaya dapat memengaruhi distribusi mikroba fotosintetik, terutama di lingkungan akuatik. Mikroorganisme ini tidak hanya penting secara ekologis, tetapi juga dalam mendukung rantai makanan serta siklus karbon global (Madigan et al., 2019).

Faktor antropogenik juga tidak bisa diabaikan. Aktivitas manusia seperti pencemaran, penggunaan antibiotik, serta perubahan lingkungan akibat urbanisasi dan industrialisasi dapat memengaruhi habitat mikroorganisme. Misalnya, pencemaran logam berat dapat menyeleksi mikroorganisme yang resisten terhadap logam, sementara penggunaan antibiotik dalam jumlah besar mendorong munculnya resistensi bakteri patogen. Hal ini menunjukkan bahwa habitat mikroba bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh aktivitas manusia (Berg et al., 2020).

Secara keseluruhan, habitat mikroorganisme terbentuk dari kombinasi kompleks antara faktor fisik, kimia, biologis, dan antropogenik. Memahami faktor-faktor ini tidak hanya memberikan wawasan teoritis dalam mikrobiologi, tetapi juga implikasi praktis dalam bidang farmasi, kesehatan, industri, dan lingkungan. Oleh karena itu, studi mendalam mengenai faktor-faktor yang memengaruhi habitat mikroorganisme menjadi

fondasi penting dalam pengembangan ilmu mikrobiologi farmasi.

F. Peranan Habitat terhadap Keanekaragaman Mikroorganisme

Habitat merupakan salah satu faktor penentu utama dalam membentuk keanekaragaman mikroorganisme. Lingkungan tempat mikroba hidup menyediakan berbagai kondisi fisik, kimia, dan biologis yang memengaruhi distribusi serta kemampuan adaptasi mikroorganisme. Setiap habitat memiliki karakteristik unik yang memungkinkan munculnya populasi mikroba yang berbeda-beda, baik dari segi jenis, jumlah, maupun fungsinya dalam ekosistem (Prescott et al., 2017). Keanekaragaman ini tidak hanya penting dalam konteks ekologi, tetapi juga memiliki relevansi besar dalam bidang farmasi dan kesehatan.

Tanah sebagai salah satu habitat mikroorganisme menunjukkan tingkat keanekaragaman yang sangat tinggi. Kandungan bahan organik, kelembaban, dan interaksi dengan tumbuhan membuat tanah menjadi ekosistem yang kompleks bagi mikroba. Banyak spesies bakteri, fungi, dan aktinomisetes ditemukan di tanah, beberapa di antaranya berperan penting dalam siklus nitrogen, dekomposisi, dan produksi metabolit sekunder. Keanekaragaman yang tinggi inilah yang menjadikan tanah sumber utama penemuan antibiotik, seperti streptomisin yang dihasilkan oleh *Streptomyces* (Baltz, 2019).

Perairan, baik laut maupun air tawar, juga menjadi habitat dengan keanekaragaman mikroorganisme yang signifikan. Mikroba fotosintetik seperti alga dan sianobakteri berperan sebagai produsen primer dalam rantai makanan akuatik. Di laut dalam, ditemukan pula mikroba ekstremofil yang mampu bertahan pada tekanan tinggi dan ketiadaan cahaya. Kondisi ini menunjukkan bahwa keanekaragaman mikroba di habitat perairan sangat dipengaruhi oleh gradien cahaya, nutrisi, dan tekanan (Madigan et al., 2019).

Habitat udara, meskipun dianggap kurang stabil, tetap berperan dalam penyebaran mikroorganisme. Spora bakteri dan jamur dapat bertahan di udara dalam jangka waktu lama, sehingga memungkinkan mereka berpindah antar habitat. Keanekaragaman mikroba di udara tidak sebesar tanah atau air, tetapi habitat ini penting dalam epidemiologi, karena berperan dalam transmisi penyakit menular, terutama infeksi saluran pernapasan (Tortora et al., 2020).

Habitat tubuh makhluk hidup juga merupakan sumber keanekaragaman mikroorganisme. Dalam tubuh manusia, misalnya, terdapat ekosistem mikroba yang disebut mikrobiota. Mikrobiota usus, kulit, mulut, dan organ lain memiliki peran yang berbeda, mulai dari membantu metabolisme hingga melindungi tubuh dari patogen. Keanekaragaman mikroba dalam tubuh dipengaruhi oleh faktor nutrisi, sistem imun, serta kondisi lingkungan sekitar. Hubungan ini menunjukkan betapa erat kaitan antara habitat dengan keanekaragaman mikroorganisme (Berg et al., 2020).

Habitat ekstrem memberikan kontribusi unik terhadap keanekaragaman mikroba. Lingkungan dengan suhu sangat tinggi, pH ekstrem, atau kadar garam tinggi dihuni oleh mikroorganisme khusus yang disebut ekstremofil. Keanekaragaman mikroba di habitat ini memberikan peluang besar dalam bioteknologi, karena enzim dan metabolit yang dihasilkan ekstremofil seringkali memiliki stabilitas dan aktivitas tinggi dalam kondisi ekstrem, yang tidak dapat ditemukan pada mikroba dari habitat biasa (Rothschild & Mancinelli, 2001).

Keanekaragaman mikroba yang dipengaruhi habitat juga berkaitan dengan peran ekologis. Setiap mikroorganisme memiliki fungsi yang berbeda dalam ekosistem, seperti dekomposisi, fotosintesis, fiksasi nitrogen, atau produksi antibiotik. Habitat yang kaya nutrisi akan mendukung pertumbuhan mikroba heterotrof, sementara habitat miskin nutrisi cenderung dihuni mikroba autotrof yang mampu

memanfaatkan energi cahaya atau bahan anorganik (Madigan et al., 2019).

Dalam bidang farmasi, peran habitat terhadap keanekaragaman mikroorganisme sangat signifikan karena menentukan potensi bioaktif yang dapat dieksplorasi. Mikroba dari habitat yang berbeda seringkali menghasilkan metabolit sekunder dengan struktur dan fungsi yang unik. Misalnya, laut dalam telah menjadi sumber senyawa antikanker baru, sementara mikroorganisme tanah masih menjadi sumber utama antibiotik. Dengan demikian, pemetaan habitat dan keanekaragaman mikroba menjadi langkah strategis dalam penemuan obat baru (Baltz, 2019).

Selain manfaatnya, keanekaragaman mikroorganisme juga berimplikasi pada kesehatan masyarakat. Habitat yang terkontaminasi, seperti air limbah atau tanah yang tercemar, dapat menjadi sumber mikroorganisme patogen yang berpotensi menimbulkan wabah penyakit. Oleh karena itu, pemahaman tentang hubungan antara habitat dan keanekaragaman mikroba tidak hanya penting untuk penelitian farmasi, tetapi juga untuk kesehatan lingkungan dan upaya pencegahan penyakit menular (Prescott et al., 2017).

Secara keseluruhan, habitat merupakan faktor fundamental dalam membentuk keanekaragaman mikroorganisme. Variasi kondisi fisik, kimia, dan biologis pada habitat yang berbeda menciptakan peluang adaptasi dan inovasi biologis yang luar biasa pada mikroba. Pengetahuan ini penting untuk memperluas pemahaman ekologi mikroba sekaligus mengoptimalkan pemanfaatannya dalam bidang farmasi, industri, dan kesehatan. Dengan demikian, studi tentang habitat dan keanekaragaman mikroorganisme menjadi salah satu pilar utama dalam mikrobiologi farmasi.

G. Peranan Mikroorganisme Tanah

Mikroorganisme tanah memainkan peran sentral dalam siklus biogeokimia, khususnya untuk unsur nitrogen (N), karbon (C), sulfur (S), dan fosfor (P), yang mendukung dinamika

nutrisi ekosistem terestrial. Dalam siklus nitrogen, bakteri seperti *Rhizobium* spp. Dan *Azotobacter* spp. melakukan fiksasi nitrogen atmosfer menjadi senyawa organik yang dapat dimanfaatkan tanaman, sementara proses denitrifikasi oleh *Pseudomonas* spp. mengembalikan nitrogen ke bentuk gas N_2 , mencegah akumulasi berlebih (Paul, 2014). Proses ini tidak hanya meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi vegetasi, tetapi juga menjaga keseimbangan global nitrogen, di mana mikroorganisme tanah berkontribusi hingga 90% dari fiksasi biologis di lahan pertanian. Tanpa peran ini, degradasi tanah akan mempercepat, mengancam produktivitas ekosistem. Pada siklus karbon, mikroorganisme tanah berfungsi sebagai agen utama dekomposisi bahan organik, mengubah residu tanaman dan hewan menjadi karbon dioksida melalui respirasi aerobik dan anaerobik, serta menyimpan karbon organik stabil dalam bentuk humus (Lehmann et al., 2021). Bakteri seperti *Actinomyces* spp. dan jamur seperti *Aspergillus* spp. mendominasi proses ini, di mana aktivitas enzimatik mereka memfasilitasi mineralisasi karbon, yang berkontribusi terhadap siklus karbon global dengan menyerap hingga 120 Gt C per tahun di lapisan atas tanah. Peran ini krusial dalam mitigasi perubahan iklim, karena gangguan seperti pengolahan tanah berlebih dapat melepaskan karbon tersimpan, memperburuk emisi gas rumah kaca. Siklus sulfur bergantung pada mikroorganisme tanah untuk transformasi elemental sulfur menjadi sulfat yang dapat diserap tanaman melalui oksidasi oleh bakteri *thiobacillus* seperti *Thiobacillus thiooxidans*, serta reduksi sulfat menjadi hidrogen sulfida oleh bakteri sulfat-reduksi seperti *Desulfovibrio* spp. (Bates et al., 2019). Proses ini memastikan ketersediaan sulfur untuk sintesis asam amino pada tanaman, dengan mikroorganisme tanah menyumbang lebih dari 70% dari siklus sulfur di ekosistem hutan dan lahan basah. Ketidakseimbangan, seperti akumulasi sulfida toksik di tanah anaerobik, dapat menghambat pertumbuhan akar, menekankan pentingnya biodiversitas mikroba dalam menjaga homeostasis siklus ini. Dalam siklus fosfor, mikroorganisme tanah seperti *Pseudomonas*

spp. dan *Bacillus* spp. memobilisasi fosfor organik melalui sekresi enzim fosfatase, mengubahnya menjadi bentuk larut yang mudah diakses tanaman, sementara proses mineralisasi mengintegrasikan fosfor ke dalam rantai makanan (Richardson et al., 2011). Fosfor, yang sering terbatas di tanah tropis, bergantung pada aktivitas ini untuk mengatasi fiksasi kimia, di mana kontribusi mikroba mencapai 50-80% dari ketersediaan fosfor tahunan. Peran ini mendukung ketahanan ekosistem terhadap defisiensi nutrisi, terutama di lahan marginal, dan menyoroti potensi aplikasi bioteknologi untuk pertanian berkelanjutan. Secara keseluruhan, peran sinergis mikroorganisme tanah dalam siklus N, C, S, dan P mencerminkan jaringan kompleks yang mendukung habitat mikroba dan makrofauna, dengan implikasi luas terhadap keberlanjutan lingkungan. Pemahaman mendalam tentang interaksi ini diperlukan untuk strategi konservasi tanah, di mana perubahan iklim dan aktivitas antropogenik dapat mengganggu keseimbangan biogeokimia. Penelitian lebih lanjut di habitat mikroorganisme tanah akan memperkuat model prediksi ekosistem, memastikan manajemen sumber daya yang adaptif.

H. Mikroorganisme Aquatik Bersifat Patogen

Mikroorganisme akuatik yang bersifat patogen merupakan kelompok signifikan dalam dinamika ekosistem perairan, di mana mereka tidak hanya berfungsi sebagai agen infeksius terhadap organisme inang, tetapi juga memengaruhi keseimbangan habitat mikroba secara keseluruhan. Patogen akuatik seperti *Vibrio cholerae* dan *Pseudomonas aeruginosa* mendiami lingkungan perairan tawar dan laut, sering kali bertahan dalam bentuk viable but non-culturable (VBNC) untuk menghindari kondisi stres lingkungan (Colwell, 2013). Keberadaan mereka menimbulkan risiko zoonotik yang tinggi, terutama di habitat berbasis air yang terkontaminasi, di mana interaksi antara faktor antropogenik seperti polusi dan perubahan iklim mempercepat penyebaran. Pemahaman peran patogen ini krusial untuk pengelolaan habitat mikroorganisme

akuatik, mengingat kontribusi mereka terhadap morbiditas global mencapai jutaan kasus tahunan. *Vibrio cholerae*, bakteri Gram-negatif yang menyebabkan kolera, berkembang biak optimal di habitat akuatik hangat dengan salinitas rendah, seperti estuari dan sungai yang terkontaminasi feces manusia, di mana ia membentuk biofilm pada zooplankton seperti copepod untuk bertahan hidup (Reidl dan Klose, 2002). Patogen ini memproduksi toksin kolera yang mengganggu keseimbangan elektrolit inang, menyebabkan diare akut yang dapat fatal jika tidak diobati, dengan insidens global mencapai 1,3-4 juta kasus per tahun menurut data Organisasi Kesehatan Dunia. Di habitat mikroorganisme akuatik, *V. cholerae* berinteraksi dengan komunitas bakteri lain melalui quorum sensing, yang memodulasi virulensi dan resistensi antibiotik, sehingga memperumit strategi mitigasi di ekosistem perairan tropis. Sebaliknya, *Pseudomonas aeruginosa*, oportunistik patogenik yang ubiquitous di habitat akuatik, mendominasi lingkungan perairan tawar seperti kolam renang, sungai, dan peralatan medis yang lembab, di mana kemampuannya membentuk biofilm memungkinkan persistensi jangka panjang meskipun paparan desinfektan (Stover et al., 2000). Bakteri ini menghasilkan berbagai virulensi faktor seperti eksotoksin A dan pirocianin, yang merusak jaringan inang melalui mekanisme imunomodulasi, terutama pada individu imunokompromais, dengan tingkat mortalitas hingga 50% pada infeksi sistemik. Dalam konteks habitat mikroorganisme, *P. aeruginosa* berkontribusi terhadap dysbiosis komunitas akuatik, di mana kompetisi nutrisi dengan spesies non-patogen dapat mengubah struktur biodiversitas, terutama di perairan tercemar limbah industri. Interaksi antara patogen akuatik ini dengan habitat mikroorganisme sering kali diperburuk oleh faktor lingkungan seperti peningkatan suhu air dan eutrofikasi, yang meningkatkan replikasi dan transmisi, sebagaimana diamati pada wabah kolera di wilayah Asia Selatan akibat banjir musiman. Resistensi multiresisten pada kedua patogen ini, didorong oleh transfer gen horizontal di biofilm akuatik,

menimbulkan tantangan bagi pengendalian, di mana strategi berbasis mikrobioma seperti probiotik antagonis mulai dieksplorasi untuk restorasi keseimbangan habitat (Colwell, 2013). Pendekatan ini menekankan perlunya integrasi ekologi mikroba dalam manajemen risiko patogen, untuk mencegah dampak cascading pada rantai makanan akuatik. Secara keseluruhan, peran patogen akuatik seperti *V. cholerae* dan *P. aeruginosa* dalam habitat mikroorganisme mencerminkan ketergantungan kompleks antara virulensi, adaptasi lingkungan, dan dinamika komunitas, dengan implikasi luas terhadap kesehatan publik dan keberlanjutan ekosistem perairan. Penelitian mendatang harus difokuskan pada pemantauan molekuler untuk deteksi dini, guna mendukung model prediksi wabah di habitat yang rentan. Dengan demikian, pemahaman ini tidak hanya memperkaya pengetahuan tentang habitat mikroorganisme, tetapi juga mendukung kebijakan adaptif dalam menghadapi ancaman emerging pathogen di era perubahan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlas, R. M., & Bartha, R. (2013). *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications* (4th ed.). Benjamin Cummings.
- Baltz, R. H. (2019). Natural product drug discovery in the genomic era: realities, conjectures, misconceptions, and opportunities. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 46(3-4), 281-299.
- Bates, S.T., Berg-Lyons, D., Caporaso, J.G., et al. (2019) Examining the global distribution of microbial life in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 129, pp. 1-10. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.10.012.
- Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M. C. C., Charles, T., ... & Schlöter, M. (2020). Microbiome definition revisited: old concepts and new challenges. *Microbiome*, 8(1), 1-22.
- Clardy, J., Fischbach, M. A., & Walsh, C. T. (2006). New antibiotics from bacterial natural products. *Nature Biotechnology*, 24(12), 1541-1550.
- Colwell, R.R. (2013) *Vibrios in the environment*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Falkowski, P. G., Fenchel, T., & DeLong, E. F. (2008). The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*, 320(5879), 1034-1039.
- Gilbert, J. A., Blaser, M. J., Caporaso, J. G., Jansson, J. K., Lynch, S. V., & Knight, R. (2018). Current understanding of the human microbiome. *Nature Medicine*, 24(4), 392-400.
- Hall-Stoodley, L., Costerton, J. W., & Stoodley, P. (2004). Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases. *Nature Reviews Microbiology*, 2(2), 95-108.

- Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I. and Rillig, M.C. (2021) The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(10), pp. 1-15. doi: 10.1038/s43017-021-00217-8.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2019). *Brock Biology of Microorganisms*. 15th ed. Pearson.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Lehninger Principles of Biochemistry* (7th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Paul, E.A. (2014) *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. 4th edn. Amsterdam: Academic Press.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2017). *Microbiology*. 10th ed. McGraw-Hill Education.
- Quince, C., Walker, A. W., Simpson, J. T., Loman, N. J., & Segata, N. (2017). Shotgun metagenomics, from sampling to analysis. *Nature Biotechnology*, 35(9), 833–844.
- Reidl, J. and Klose, K.E. (2002) 'Vibrio cholerae and cholera: out of the water and into the host', *FEMS Microbiology Reviews*, 26(2), pp. 125-139. doi: 10.1111/j.1574-6976.2002.tb00605.x.
- Richardson, A.E., Barea, J.M. and Delgado, A. (2011) Phosphomonoesterases: understanding aliasing and functional diversity in microbial communities. In: Barea, J.M., et al. (eds.) *The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*. 2nd edn. Boca Raton: CRC Press, pp. 135-156.
- Rothschild, L. J., & Mancinelli, R. L. (2001). Life in extreme environments. *Nature*, 409(6823), 1092–1101.
- Ryan, K. J., & Ray, C. G. (2020). *Sherris Medical Microbiology* (8th ed.). McGraw-Hill.

- Stover, C.K., Pham, X., Erwin, A.L. et al. (2000) 'Complete genome sequence of *Pseudomonas aeruginosa* PAO1, an opportunistic pathogen', *Nature*, 406(6799), pp. 959-964. doi: 10.1038/35023079.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2020). *Microbiology: An Introduction*. 13th ed. Pearson.
- Whitman, W. B. (2015). The modern concept of the procaryote. In Whitman, W.B. (Ed.), *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*. Wiley.
- World Health Organization. (2020). Antimicrobial resistance. WHO

BAB 5

INTERAKSI MIKROBA

drh. Dicky Andiarsa, M.Ked.

A. Pendahuluan

Interaksi mikroba adalah fenomena fundamental yang membentuk struktur, fungsi, dan dinamika ekosistem mikroba di seluruh biosfer.(Weiland-Bräuer, 2021) Mikroba, meskipun berukuran mikroskopis, memiliki peran besar dalam menjaga keseimbangan lingkungan melalui hubungan yang saling mempengaruhi satu sama lain dan organisme lain. Interaksi ini dapat bersifat positif, netral, maupun negatif, tergantung pada dampaknya bagi pihak yang terlibat.

Pemahaman mendalam tentang interaksi mikroba menjadi sangat penting, bukan hanya untuk memahami ekologi mikroba itu sendiri, tetapi juga untuk aplikasi praktis dalam bidang pertanian, pengolahan limbah, bioteknologi, dan kesehatan lingkungan.

B. Konsep Dasar Interaksi Mikroba

Interaksi mikroba mencakup segala bentuk hubungan antar mikroorganisme, baik dari spesies yang sama (intraspesifik) maupun berbeda (interspesifik).(Selim and Zayed, 2017) Hubungan ini terbentuk karena mikroba hidup dalam komunitas yang berbagi sumber daya dan ruang, sehingga muncul dinamika kompetisi, kerja sama dan netralitas. Secara umum, interaksi mikroba dapat dibagi menjadi:

1. **Interaksi Positif**

Menguntungkan minimal satu pihak, tanpa merugikan pihak lain

2. **Interaksi negatif**

Merugikan salah satu pihak.

3. **Interaksi netral**

Tidak memberikan pengaruh berarti terhadap kedua belah pihak.

Klasifikasi ini menjadi kerangka awal untuk memahami kompleksitas hubungan mikroba di alam.

C. **Klasifikasi Interaksi Mikroba**

1. **Mutualisme:** Mutualisme adalah hubungan saling menguntungkan bagi kedua organisme. Contoh klasik adalah hubungan antara *Rhizobium* sp. dan tanaman leguminosa. Bakteri mengikat nitrogen dari udara dan menyediakannya dalam bentuk amonia yang dapat diserap tanaman, sementara tanaman menyediakan karbohidrat hasil fotosintesis sebagai sumber energi bakteri. (Bascompte, 2019)

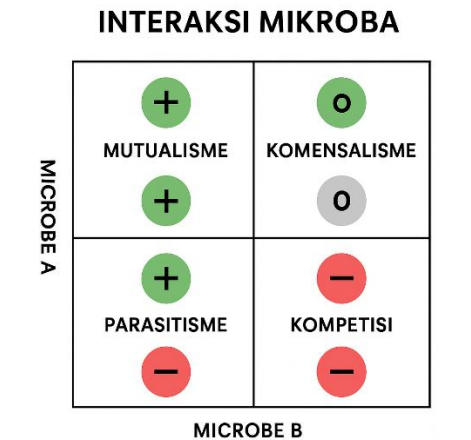
2. **Komensalisme:** Komensalisme adalah interaksi di mana satu pihak diuntungkan, sementara pihak lain tidak terpengaruh. Misalnya, bakteri anaerob fakultatif mengkonsumsi oksigen di suatu mikrohabitat, sehingga menciptakan kondisi anaerob yang mendukung pertumbuhan bakteri anaerob obligat. (Mathis and Bronstein, 2020)

3. **Kompetisi:** Kompetisi terjadi ketika dua atau lebih mikroba bersaing untuk sumber daya yang terbatas, seperti nutrisi atau ruang. (Zhu *et al.*, 2016) Kompetisi dapat bersifat:

- a. **Eksplorasi** – menggunakan sumber daya lebih cepat daripada kompetitor.
- b. **Interferensi** – menghasilkan senyawa penghambat seperti antibiotik

4. **Amensalisme:** Amensalisme adalah hubungan di mana satu pihak dirugikan sedangkan pihak lain tidak terpengaruh. (Abd Alhadi and Naji, 2024) Contoh: produksi antibiotik oleh *Penicillium* yang menghambat bakteri di sekitarnya

5. **Predasi:** Beberapa bakteri, seperti *Bdellovibrio bacteriovorus*, memangsa bakteri lain dengan cara masuk ke dalam periplasma dan menghancurkan sel inang. (Waso *et al.*, 2021)
6. **Parasitisme:** Dalam parasitisme, mikroba mendapatkan keuntungan dari organisme inang dengan merugikan inang tersebut. (Drew, Stevens and King, 2021) Contoh: virus bakteriofag yang menginfeksi dan menghancurkan bakteri.



Gambar 5.1 Diagram Interaksi Mikroba

Tabel 5.1 Klasifikasi interaksi mikroba

Jenis Interaksi	Simbol Efek	Contoh	Dampak Ekologis
Mutualisme	+/+	<i>Rhizobium</i> – leguminosa	Fiksasi nitrogen, peningkatan kesuburan tanah
Komensalisme	+/0	Bakteri pendegradasi selulosa – bakteri fermentatif	Penyediaan gula sederhana
Parasitisme	+/-	Bakteriofag – bakteri	Penurunan populasi inang
Kompetisi	-/-	Bakteri pelarut fosfat – fungi	Perebutan sumber daya fosfor

Jenis Interaksi	Simbol Efek	Contoh	Dampak Ekologis
Amensalisme	-/0	<i>Penicillium</i> – bakteri Gram positif <i>Bdellovibrio</i>	Produksi antibiotik
Predasi	+/-	<i>bacteriovorus</i> – bakteri Gram negatif	Pengendalian populasi bakteri

D. Faktor yang Mempengaruhi Interaksi Mikroba

Interaksi mikroba sangat dipengaruhi oleh:

1. Ketersediaan nutrisi.

Nutrien (karbon, nitrogen, fosfor, sumber electron, vitamin, dsb.) adalah bahan bakar dan bahan bangunan bagi mikroba. Ketersediaan dan jenis nutrient menentukan siapa yang tumbuh cepat, siapa bertahan, dan jenis interaksi yang muncul (kompetisi, mutualisme, atau komensalisme). (Mathis and Bronstein, 2020; Adesina, 2025) Kondisi bisa terjadi sebagai berikut:

- Kondisi kaya nutrisi cenderung menguntungkan r-strategist (penyerap cepat), memicu kompetisi eksploitatif karena banyak spesies bersaing memanfaatkan sumber yang sama.
- Kondisi terbatas atau spesifik (mis. Hanya tersedia substrat kompleks) mendorong sintrofisme atau cross-feeding (mutualisme metabolik), di mana satu spesies memecah senyawa kompleks menjadi produk yang bisa dimanfaatkan spesies lain.
- Nisbah nutrisi (mis. C:N:P) juga menentukan jalur metabolik yang dominan (mis. denitrifikasi vs nitrifikasi)

Contoh nyata. Pada limbah pertanian yang kaya nitrogen/pupuk, komunitas mikroba air cenderung dipenuhi algae dan bakteri heterotrof yang menyebabkan eutrofikasi; dalam reaktor biogas, kekurangan karbon sederhana akan

membuat komunitas bergantung pada rantai sintrofik untuk menghasilkan asetat dan H_2 bagi metanogen.

Metode pengukuran / eksperimen.

- a. Analisis kimia air/tanah: DOC (dissolved organic carbon), NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} .
- b. Stable isotope probing untuk melacak aliran C atau N antar spesies.
- c. Rancangan microcosm dengan gradien nutrisi (kontrol vs beragam konsentrasi) untuk melihat pergeseran komunitas/metabolit.

Implikasi praktis. Mengatur input nutrisi (mis. Pupuk, amandemen tanah) dapat diarahkan untuk mendukung mikroba menguntungkan dan mencegah ledakan patogen atau HAB

2. pH dan suhu

pH dan suhu langsung mempengaruhi kinetika enzim, stabilitas membran, kelarutan ion, dan ketersediaan nutrisi. Setiap mikroba memiliki rentang toleransi dan optimum – perubahan kecil dapat menggeser komposisi komunitas. (Selim and Zayed, 2017)

Bagaimana mempengaruhi reaksi:

- a. pH: mempengaruhi ionisasi nutrisi dan toksin; beberapa bakteri (mis. Nitrifikasi) sensitif terhadap pH, sehingga perubahan pH dapat menekan satu kelompok dan membuka ceruk bagi lainnya.
- b. Suhu: mempengaruhi laju reaksi biokimia (Q_{10} effect). Peningkatan suhu misalnya dapat mempercepat degradasi organik, menurunkan kelarutan oksigen, dan memicu pergeseran dari komunitas aerob ke mikroaerofil/anaerob.

Contoh: Pemanasan laut menyebabkan bleaching (gangguan mutualisme karang-*zooxanthellae*). Di tanah, pengapuran (menaikkan pH mengubah dominasi bakteri dan jamur).

3. Konsentrasi oksigen – mengatur distribusi mikroba aerob, anaerob, dan fakultatif.

Oksigen adalah penerima electron kuat; ketersediaannya menentukan jalur respirasi (aerob, respirasi alternatif seperti denitrifikasi, sulfat reduksi, metanogenesis pada kondisi anaerob). Gradien oksigen menciptakan niche mikro-lingkungan. (Jassey *et al.*, 2010) Mekanisme reaksi:

- a. Lapisan oksigen pada biofilm atau sedimen memungkinkan stratifikasi: permukaan aerob, lapisan menengah mikroaerofil, dasar anaerob. Ini memfasilitasi metabolite handoff antara aerob dan anaerob (mis. $O_2 \rightarrow NO_3^- \rightarrow SO_4^{2-}$).
- b. Perubahan oksigen (mis. Hipoksia) dapat mengubah kompetisi menjadi kolaborasi mis. Fermentasi produk digunakan oleh komponen anaerob.

4. Kepadatan populasi – mempengaruhi mekanisme quorum sensing.

Banyak perilaku kolektif mikroba (pembukaan biofilm, produksi toksin, sekresi enzim) dikendalikan oleh *quorum sensing*-sistem (QS) komunikasi yang dipicu oleh konsentrasi autoinducer yang meningkat seiring kepadatan sel. (Preda and Săndulescu, 2019)

Bagaimana mempengaruhi interaksi:

- a. Kepadatan rendah: perilaku individual dominan; sedikit koordinasi memicu penyebaran dan eksplorasi.
- b. Kepadatan tinggi: trigger QS mengakibatkan pembentukan struktur komunitas (biofilm) produksi antibiotik/enzim yang mengubah hubungan kompetitif menjadi antagonistik atau memfasilitasi mutualisme dengan menstabilkan *niche*.

Contoh: Kolonisasi pathogen kadang menjadi virulen hanya setelah mencapai ambang kepadatan (mis. *Pseudomonas aeruginosa*). Dalam Biofilm, kedekatan mempermudah transfer gen dan metabolit.

5. **Gangguan lingkungan – polusi, perubahan iklim, atau introduksi spesies asing dapat mengubah pola interaksi**

Gangguan (pulsed atau kronik) seperti polusi kimia, perubahan iklim, praktik agrikultur intensif, atau pengenalan spesies asing dapat merombak komunitas mikroba, menurunkan keanekaragaman, atau mendorong keadaan alternatif yang sulit kembali. (Pyšek *et al.*, 2020)

E. Mekanisme Interaksi Mikroba

1. Pertukaran Metabolit

Banyak mikroba membentuk hubungan saling menguntungkan melalui pertukaran metabolit. Misalnya, bakteri fermentatif menghasilkan asam organik yang digunakan metanogen untuk memproduksi metana.

2. Komunikasi Kimia (*Quorum Sensing*)

Quorum sensing memungkinkan mikroba mengatur perilaku kolektif, seperti pembentukan biofilm atau produksi toksin, berdasarkan kepadatan populasi.

3. Antagonisme melalui Senyawa Antimikroba

Produksi bakteriocin, antibiotik, atau senyawa toksik lain adalah strategi umum untuk memenangkan kompetisi

4. Kontak Fisik Langsung

Interaksi seperti konjugasi, predasi, atau pembentukan biofilm membutuhkan kedekatan fisik.

F. Interaksi Mikroba di Berbagai Ekosistem

1. Tanah

Tanah merupakan habitat mikroba yang sangat beragam, mencakup bakteri, jamur, aktinomisetes, hingga archaea. Di sekitar akar tanaman (rhizosfer), mikroba berinteraksi secara intensif melalui pertukaran nutrisi dan senyawa kimia.(Pantigoso, Newberger and Vivanco, 2022) Interaksi ini dapat bersifat **mutualisme** (misalnya fiksasi nitrogen oleh *Rhizobium* untuk tanaman) maupun **kompetisi** dalam memperebutkan sumber daya.

2. Perairan Tawar

Dalam ekosistem air tawar, mikroba berperan penting dalam **siklus nutrisi** seperti nitrogen, fosfor, dan karbon. Populasi mikroba diatur secara alami oleh **predasi protozoa** dan faktor lingkungan (pH, oksigen, cahaya). Interaksi ini menjaga keseimbangan ekosistem serta mendukung rantai makanan akuatik.(Andersson *et al.*, 2018)

3. Laut

Mikroba laut, termasuk fitoplankton dan bakteri laut, memiliki kontribusi besar terhadap **produktivitas primer** dan **siklus karbon global**. Mereka berinteraksi melalui simbiosis (misalnya alga dengan bakteri penghasil vitamin), kompetisi, maupun pertukaran senyawa metabolit. Hubungan ini menentukan keberlanjutan rantai makanan laut dan bahkan memengaruhi iklim global.(Andersson *et al.*, 2018)

4. Sistem Pengolahan Limbah

Dalam reaktor biologis, terutama sistem anaerob, kinerja pengolahan limbah sangat bergantung pada **hubungan sinergis antar-mikroba**. Misalnya, bakteri fermentatif menghasilkan asam organik yang kemudian dimanfaatkan oleh metanogen untuk menghasilkan metana. Interaksi ini memastikan limbah dapat terurai dengan efisien dan berkelanjutan.

G. Aplikasi dan Implikasi

1. Pertanian Berkelanjutan

Inokulasi mikroba bermanfaat, seperti bakteri penambat nitrogen atau fungi mikoriza, dapat membantu menyediakan unsur hara bagi tanaman secara alami. Hal ini mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia sintesis, menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang, sekaligus menekan dampak negatif terhadap lingkungan.

2. Bioremediasi

Konsorsium mikroba, yaitu gabungan beberapa jenis mikroorganisme, mampu bekerja sama untuk memecah dan mendegradasi polutan organik (seperti hidrokarbon,

pestisida) maupun anorganik (seperti logam berat). Teknologi ini menjadi Solusi ramah lingkungan untuk membersihkan tanah dan air yang tercemar.

3. Pengendalian Hayati

Mikroba antagonis, seperti *Trichoderma* atau *Pseudomonas fluorescens*, dapat menghambat pertumbuhan pathogen tanaman melalui mekanisme persaingan nutrisi, produksi antibiotik, atau induksi ketahanan tanaman. Pendekatan ini mengurangi penggunaan pestisida kimia, sekaligus menjaga ekosistem pertanian lebih sehat dan berkelanjutan.

H. Studi Kasus

1. Konsorsium Degradasi Minyak di Laut

Setelah insiden tumpahan minyak *Deepwater Horizon* di Teluk Meksiko, para ilmuwan menemukan bahwa bakteri laut tertentu dapat membentuk konsorsium atau kelompok kerja sama untuk memecah hidrokarbon dalam minyak. Mikroba-mikroba ini saling melengkapi dalam metabolisme, sehingga mampu mempercepat proses degradasi minyak mentah secara alami. (Kimes *et al.*, 2013) Hal ini menunjukkan potensi besar mikroba sebagai agen bioremediasi pada pencemaran laut.

2. Biofilm pada Pipa Air Minum

Di dalam pipa air minum sering terbentuk biofilm, yaitu komunitas mikroba yang menempel pada permukaan pipa dan dikelilingi oleh lapisan pelindung berupa matriks ekstraseluler. (Gholipour *et al.*, 2023) Struktur ini membuat mikroba lebih tahan terhadap desinfektan maupun kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Studi biofilm penting karena dapat mempengaruhi kualitas air minum dan Kesehatan Masyarakat, sekaligus memberi Gambaran bagaimana mikroba berinteraksi serta saling melindungi dalam suatu komunitas.

I. Tantangan dan Arah Penelitian

1. Mengungkap interaksi mikroba yang belum dapat diukur.

Saat ini, ilmu mikrobiologi sudah mampu mengidentifikasi jenis mikroba dalam suatu komunitas melalui Teknik sekuensing DNA. Namun, memahami bagaimana mikroba saling berinteraksi (misalnya siap yang bekerja sama, siapa yang bersaing, atau siapa yang saling ketergantungan) masih menjadi tantangan besar. Banyak interaksi yang terjadi pada Tingkat molekuler atau kimiawi, sehingga sulit dideteksi dengan metode konvensional. Penelitian ke depan diarahkan pada pengembangan teknologi yang lebih canggih, seperti metabolomic dan single-cell analysis, untuk bisa 'membaca' interaksi tersembunyi ini.

2. Mengembangkan model prediksi respon komunitas terhadap perubahan lingkungan.

Komunitas mikroba sangat dinamis dan dapat berubah cepat Ketika lingkungannya berubah, misalnya akibat pencemaran, perubahan iklim, atau intervensi manusia. Saat ini, kita masih kesulitan memprediksi bagaimana komunitas mikroba akan bereaksi terhadap perubahan tersebut. Oleh karena itu, penelitian diarahkan untuk membangun model prediksi berbasis data (bioinformatika dan *machine learning*). Model ini diharapkan mampu meramalkan arah perubahan komunitas mikroba, sehingga dapat dimanfaatkan dalam pengelolaan lingkungan, kesehatan manusia, maupun bioteknologi.

3. Mengintegrasikan *metagenomics*, *metatranscriptomics*, dan pemodelan jaringan untuk memetakan interaksi.

Pendekatan modern seperti *metagenomics* (mengungkap siapa saja yang ada), *metatranscriptomics* (mengetahui gen apa yang aktif), dan pemodelan jaringan (memahami hubungan antar mikroba) dapat digabungkan untuk memetakan interaksi mikroba secara lebih menyeluruh. Integrasi ini memungkinkan peneliti tidak hanya melihat keberadaan spesies, tetapi juga fungsinya,

aktivitas nyata di lapangan, serta hubungan kompleks dalam ekosistem.

J. Kesimpulan

Interaksi mikroba merupakan fondasi penting dalam menjaga keseimbangan berbagai ekosistem, mulai dari tanah, perairan tawar, laut, hingga sistem buatan seperti pengolahan limbah. Di tanah, hubungan erat antara mikroba dan tanaman melalui zona rhizosfer menunjukkan peran mutualisme sekaligus kompetisi yang mendukung kesuburan dan keberlanjutan produktivitas. Pada ekosistem perairan tawar, mikroba berperan sebagai penggerak utama siklus nutrisi dan regulator populasi melalui rantai interaksi dengan organisme lain. Di laut, interaksi mikroba tidak hanya menentukan produktivitas primer, tetapi juga berimplikasi luas terhadap siklus karbon global dan iklim bumi. Sementara itu, dalam sistem pengolahan limbah, keberhasilan teknologi berbasis mikroba ditentukan oleh sinergi antar komunitas mikroorganisme yang mampu memecah, mengolah, dan menstabilkan bahan organik secara efisien. Dengan demikian, mikroba tidak hanya berfungsi sebagai organisme mikroskopis, tetapi juga sebagai aktor kunci dalam menjaga stabilitas ekologi, mendukung keberlanjutan lingkungan, dan menyediakan layanan ekosistem vital bagi kehidupan manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Alhadi, A.R.S. and Naji, R.K. (2024) "The contribution of amensalism and parasitism in the three-species ecological system's dynamic," *Commun. Math. Biol. Neurosci.*, 2024(0), p. Article ID 33. Available at: <https://doi.org/10.28919/cmbn/8456>.
- Adesina, A.A. (2025) "MICROBIAL INTERRELATIONSHIP EXAMPLES OF; MUTUALISM, COMMENSALISM, SYNERGISM, PARASITISM, COMPETITION AND PREDATION."
- Andersson, A. *et al.* (2018) "Predators and nutrient availability favor protozoa-resisting bacteria in aquatic systems," *Scientific Reports*, 8(1), p. 8415. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26422-4>.
- Bascompte, J. (2019) "Mutualism and biodiversity," *Current Biology*, 29(11), pp. R467–R470. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.03.062>.
- Drew, G.C., Stevens, E.J. and King, K.C. (2021) "Microbial evolution and transitions along the parasite-mutualist continuum," *Nature Reviews Microbiology*, 19(10), pp. 623–638. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00550-7>.
- Gholipour, S. *et al.* (2023) "The bacterial biofilm resistome in drinking water distribution systems: A systematic review," *Chemosphere*, 329, p. 138642. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138642>.
- Jassey, V.E.J. *et al.* (2010) "Fine-Scale Horizontal and Vertical Micro-distribution Patterns of Testate Amoebae Along a Narrow Fen/Bog Gradient | Microbial Ecology," *Microbial Ecology*, 61(2011), pp. 374–385.
- Kimes, N.E. *et al.* (2013) "Metagenomic analysis and metabolite profiling of deep-sea sediments from the Gulf of Mexico following the Deepwater Horizon oil spill," *Frontiers in*

- Microbiology*, 4. Available at:
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00050>.
- Mathis, K.A. and Bronstein, J.L. (2020) "Our Current Understanding of Commensalism," *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 51(Volume 51, 2020), pp. 167–189. Available at:
<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-011720-040844>.
- Pantigoso, H.A., Newberger, D. and Vivanco, J.M. (2022) "The rhizosphere microbiome: Plant-microbial interactions for resource acquisition," *Journal of Applied Microbiology*, 133(5), pp. 2864–2876. Available at:
<https://doi.org/10.1111/jam.15686>.
- Preda, V.G. and Săndulescu, O. (2019) "Communication is the key: biofilms, quorum sensing, formation and prevention," *Discoveries*, 7(3), p. e100. Available at:
<https://doi.org/10.15190/d.2019.13>.
- Pyšek, P. *et al.* (2020) "Scientists' warning on invasive alien species," *Biological Reviews*, 95(6), pp. 1511–1534. Available at:
<https://doi.org/10.1111/brv.12627>.
- Selim, Sh.M. and Zayed, M.S. (2017) "Microbial Interactions and Plant Growth," in D.P. Singh, H.B. Singh, and R. Prabha (eds.) *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives: Volume 1: Fundamental Mechanisms, Methods and Functions*. Singapore: Springer, pp. 1–15. Available at:
https://doi.org/10.1007/978-981-10-5813-4_1.
- Waso, M. *et al.* (2021) "Insights into *Bdellovibrio* spp. mechanisms of action and potential applications," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(5), p. 85. Available at:
<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03054-x>.
- Weiland-Bräuer, N. (2021) "Friends or Foes – Microbial Interactions in Nature," *Biology*, 10(6), p. 496. Available at:
<https://doi.org/10.3390/biology10060496>.

Zhu, Q. *et al.* (2016) "Multiple soil nutrient competition between plants, microbes, and mineral surfaces: model development, parameterization, and example applications in several tropical forests," *Biogeosciences*, 13(1), pp. 341–363. Available at: <https://doi.org/10.5194/bg-13-341-2016>.

BAB

6

SIKLUS NUTRISI

apt. Mitha Dwi Puspitasari, M.Farm.

Siklus nutrisi adalah serangkaian proses biogeokimia yang sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan mendukung kehidupan. Melalui sistem ini, elemen-elemen penting seperti karbon, nitrogen, fosfor, sulfur, dan logam lainnya mengalami siklus berulang antara komponen abiotik dan biotik yang ada di lingkungan (Madigan et al., 2019).

Siklus nutrisi merujuk pada pertukaran materi organik dan anorganik di seluruh ekosistem, yang mengakibatkan zat dan unsur tertentu diserap, dihilangkan, didaur ulang, dan dihasilkan di lingkungan. Kehidupan mikroba telah lama dikenal memiliki peran penting dalam konsumsi dan regenerasi sumber daya di lingkungan pada berbagai tingkatan dan dapat dianggap sebagai alat utama dalam proses daur ulang nutrisi.

Dalam ekosistem alami, mikroorganisme berkontribusi dalam proses dekomposisi bahan organik, fiksasi nitrogen, oksidasi sulfur, serta baik mineralisasi maupun imobilisasi fosfor. Proses-proses ini sangat penting untuk mempertahankan produktivitas tanah dan air, serta memiliki dampak langsung terhadap perubahan iklim, pencemaran lingkungan, dan kesehatan manusia serta organisme lainnya (Prescott et al., 2021)

Penelitian tentang siklus nutrisi dalam konteks mikrobiologi lingkungan membantu kita memahami interaksi mikroorganisme dengan lingkungannya, serta bagaimana aktivitas mereka dapat dimanfaatkan atau diatur untuk keuntungan lingkungan dan

industri, seperti dalam bioremediasi, pengelolaan limbah, dan praktik pertanian yang berkelanjutan (Tortora et al., 2020)

Dengan memahami prinsip dasar dari setiap siklus elemen, kita dapat merancang pendekatan pengelolaan lingkungan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, dalam bab ini, akan dibahas lima siklus nutrisi utama yaitu siklus karbon, nitrogen, fosfor, sulfur, dan logam serta peran penting mikroorganisme di setiap tahap dari proses tersebut.

A. Siklus Karbon

Karbon adalah unsur krusial yang membentuk dasar senyawa organik seperti karbohidrat, lipid, protein, dan asam nukleat, yang merupakan pondasi bagi semua bentuk kehidupan. Dalam ekosistem, karbon berputar melalui siklus biogeokimia yang sebagian besar dikendalikan oleh aktivitas mikroorganisme (Falkowski et al., 2008)

Bentuk Karbon di Lingkungan Karbon hadir dalam berbagai bentuk di alam:

1. Karbon dioksida (CO_2) dalam atmosfer.
Senyawa organik dalam makhluk hidup dan sisa-sisa organik. Metana (CH_4), terutama di tempat anaerob.
2. Karbonsubstrat anorganik seperti karbonat (CO_3^{2-}) dan bikarbonat (HCO_3^-) di perairan (Madigan et al., 2019)

Proses Utama dalam Siklus Karbon

1. Fotosintesis

Mikroorganisme fotoautotrof seperti cyanobacteria dan alga menggunakan CO_2 dari atmosfer atau perairan untuk menghasilkan senyawa organik melalui fotosintesis:



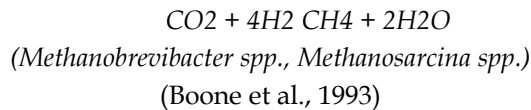
Proses ini penting karena menyerap karbon dari atmosfer dan mengubahnya menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh organisme lain (Raven et al., 2005).

2. Respirasi dan Fermentasi

Respirasi seluler oleh mikroorganisme heterotrof melepaskan kembali CO₂ ke atmosfer saat mereka memecah senyawa organik untuk mendapatkan energi. Dalam kondisi anaerob, fermentasi menghasilkan senyawa seperti metana, asetat, dan etanol (Prescott et al., 2021).

3. Metanogenesis

Dilakukan oleh *Archaea* metanogenik, terutama dalam lingkungan anaerob seperti rawa, sedimen laut, dan saluran pencernaan hewan. Metanogenesis mengubah CO₂ dan H₂ atau asetat menjadi CH₄:



4. Metanotrofi

Proses oksidasi CH₄ menjadi CO₂ oleh bakteri metanotrof (misalnya *Methylococcus capsulatus*) dalam lingkungan aerob. Ini membantu mengurangi pelepasan metana, gas rumah kaca kuat, ke atmosfer (Hanson & Hanson, 1996).

5. Penguburan dan Pembentukan Batu Kapur

Sebagian karbon organik yang tidak terurai dapat terperangkap dalam sedimen dan menjadi batuan fosil, seperti batu bara dan minyak bumi. Karbon anorganik juga dapat membentuk batu kapur (CaCO₃) melalui presipitasi ion karbonat (Berner, 2003).

6. Degradasi Bahan Organik

Mikroba tanah dan air memegang peranan penting dalam dekomposisi bahan organik, melepaskan karbon kembali ke atmosfer sebagai CO₂ atau metana. Enzim yang dihasilkan, seperti selulase dan lignase, memungkinkan pemecahan bahan kompleks seperti selulosa dan lignin (Jastrow et al., 2007).

Dampak Aktivitas Manusia

Aktivitas seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan limbah organik mengganggu keseimbangan siklus karbon, meningkatkan emisi CO₂ dan CH₄. Hal ini berkontribusi pada perubahan iklim dan mempengaruhi fungsi mikroba lingkungan. (on Climate Change, 2021)

B. Siklus Nitrogen

Nitrogen merupakan unsur esensial dalam protein dan asam nukleat. Walaupun atmosfer mengandung 78% nitrogen, sebagian besar organisme tidak dapat memanfaatkannya langsung dalam bentuk N₂. Mikroba berperan dalam mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang tersedia bagi organisme lain (Kuypers et al., 2018).

Siklus nitrogen adalah salah satu siklus biogeokimia yang paling kompleks, melibatkan berbagai bentuk nitrogen anorganik dan organik, serta peran sentral mikroorganisme dalam proses transformasinya (Madigan et al., 2019)

Mikroba membantu terjadinya siklus nitrogen di bumi, sehingga nitrogen ini dapat digunakan oleh organisme lain. Seperti kita ketahui bahwa nitrogen merupakan unsur penting dalam kehidupan organisme. Di dalam siklus nitrogen ini terjadi beberapa proses, antara lain:

1. Fiksasi Nitrogen

Fiksasi nitrogen adalah proses mengubah gas N₂ menjadi bentuk amonia (NH₃) atau ion ammonium (NH₄⁺) yang dapat digunakan oleh tanaman. Proses ini dilakukan oleh:

- Bakteri bebas seperti *Azotobacter* dan *Clostridium*.
- Bakteri simbiotik seperti *Rhizobium* yang hidup dalam bintil akar leguminosa.
- Cyanobacteria seperti *Anabaena* dan *Nostoc* juga mampu melakukan fiksasi nitrogen.

“The conversion of atmospheric nitrogen to ammonia by microorganisms is a key step in the nitrogen cycle.” (Madigan et al., 2019)

2. Amonifikasi (Deaminasi)

Amonifikasi adalah proses penguraian bahan organik yang mengandung nitrogen (protein, asam amino) menjadi amonia (NH_3) atau amonium (NH_4^+). Proses ini dilakukan oleh mikroorganisme saprofit seperti *Bacillus*, *Proteus*, dan *Pseudomonas*.

“Ammonification is the release of ammonia during the decomposition of organic nitrogenous materials.” (Prescott et al., 2021).

3. Nitrifikasi

Nitrifikasi merupakan proses oksidasi biologis dari amonia menjadi nitrit (NO_2^-) dan kemudian menjadi nitrat (NO_3^-) melalui dua tahap:

- a. Amonia $\rightarrow$ Nitrit oleh bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas*.
- b. Nitrit $\rightarrow$ Nitrat oleh *Nitrobacter*.

“Nitrification, a key process in the nitrogen cycle, is mediated by chemolithoautotrophic bacteria that derive energy from ammonia oxidation.” (Torsvik & Øvreås, 2002)

4. Denitrifikasi

Denitrifikasi adalah proses reduksi nitrat (NO_3^-) kembali menjadi gas nitrogen (N_2) oleh bakteri anaerob seperti *Pseudomonas denitrificans* dan *Paracoccus denitrificans*. Proses ini melepaskan nitrogen ke atmosfer.

“Denitrification closes the nitrogen cycle by returning nitrogen to the atmosphere as N_2 gas.” (Madigan et al., 2019).

Tabel 6.1 Peran Mikroorganisme dalam siklus Nitrogen

Proses	Mikroorganisme
Fiksasi nitrogen	<i>Rhizobium</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Clostridium</i>
Amonifikasi	<i>Bacillus</i> , <i>Proteus</i> , <i>Pseudomonas</i>
Nitrifikasi	<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i>
Denitrifikasi	<i>Pseudomonas</i> , <i>Paracoccus</i>

Mikroorganisme memiliki enzim spesifik seperti nitrogenase untuk fiksasi dan enzim oksidase untuk nitrifikasi yang memungkinkan berlangsungnya proses ini di lingkungan tanah dan air.

Dampak Lingkungan dan Aktivitas Manusia

Aktivitas manusia seperti penggunaan pupuk nitrogen sintetis, pembakaran bahan bakar fosil, dan pengolahan limbah menyebabkan gangguan pada siklus nitrogen:

Eutrofikasi perairan akibat limpasan pupuk (run-off) menyebabkan pertumbuhan alga berlebih. Emisi gas rumah kaca seperti dinitrogen oksida (N_2O) dari proses denitrifikasi.

"Anthropogenic alterations to the nitrogen cycle have led to increased nitrogen deposition and related ecological imbalances." (Galloway et al., 2008).

C. Siklus Sulfur

Sulfur (belerang) adalah unsur penting bagi kehidupan, terlibat dalam pembentukan asam amino (seperti sistein dan metionin), vitamin (biotin, tiamin), dan koenzim. Dalam ekosistem, sulfur mengalami transformasi kimia melalui siklus biogeokimia, baik dalam bentuk organik maupun anorganik. Mikroorganisme memainkan peran utama dalam mengubah bentuk sulfur sehingga tersedia untuk tanaman dan organisme lainnya.

"Sulfur cycling is integral to the health of ecosystems, involving a diverse set of microbial metabolisms in both aerobic and anaerobic environments." (Madigan et al., 2019).

Sulfur sangat diperlukan untuk pembentukan molekul-molekul penting organisme seperti protein dan juga berperan sebagai kofaktor pada enzim. Sehingga, siklus sulfur sangat penting bagi organisme. Mikroba-mikroba fotosintetik dan kemosintetik sangat berperan dalam siklus ini. Mereka berperan dalam proses oksidasi reduksi pada siklus sulfur. Proses siklus sulfur yang terjadi adalah sebagai berikut:

1. Mineralisasi Senyawa Organik Sulfur

Desulfurisasi: Mikroorganisme menguraikan bahan organik yang mengandung sulfur (seperti protein) menjadi H₂S. Contoh mikroba: *Desulfovibrio*, *Clostridium*.

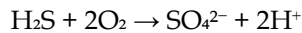
2. Oksidasi Sulfur

Proses mengubah H₂S menjadi sulfat (SO₄²⁻).

Dilakukan oleh bakteri sulfur seperti:

- Thiobacillus thiooxidans
- Beggiatoa
- Acidithiobacillus ferrooxidans

Reaksi Umum :



"Sulfur oxidizing bacteria contribute to acid mine drainage and play a role in industrial applications." (Prescott et al., 2021).

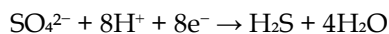
3. Reduksi Sulfat

Sulfat (SO₄²⁻) digunakan sebagai akseptor elektron dalam kondisi anaerob.

Diubah menjadi H₂S oleh bakteri pereduksi sulfat seperti:

- Desulfovibrio desulfuricans
- Desulfotomaculum

Reaksi:



4. Asimilasi Sulfat

Sulfat diserap tanaman dan mikroorganisme dan dimasukkan ke dalam senyawa organik seperti asam amino.

Gambar Siklus Sulfur

[Organik sulfur] → (Mineralisasi) → [H₂S] → (Oksidasi) → [SO₄²⁻]

↑ ↓

(Reduksi) ←-----←

Siklus sulfur adalah proses penting dalam menjaga ketersediaan sulfur di lingkungan. Mikroorganisme berperan sentral dalam mengubah bentuk sulfur melalui proses oksidasi dan reduksi, baik dalam kondisi aerob maupun anaerob.

D. Siklus Fosfor

Sumber utama fosfor di lingkungan adalah batuan fosfat (apatit). Proses pelapukan batuan ini melepaskan ion fosfat (PO_4^{3-}) ke dalam tanah dan air. Fosfat inilah yang kemudian digunakan oleh tanaman dan mikroorganisme.

Siklus fosfor melibatkan beberapa tahap penting:

1. Pelapukan batuan: Proses alami yang melepaskan fosfat dari batuan ke tanah.
2. Asimilasi biologis: Tumbuhan dan mikroorganisme menyerap fosfat untuk kebutuhan metabolisme.
3. Transfer melalui rantai makanan: Fosfat berpindah dari produsen ke konsumen dan akhirnya ke dekomposer.
4. Dekomposisi: Organisme mati dan limbahnya diurai oleh mikroorganisme, melepaskan fosfat kembali ke lingkungan (Sylvia et al., 2005).
5. Presipitasi dan sedimentasi: Fosfat yang tidak digunakan akan mengendap dan kembali membentuk batuan fosfat.

Siklus fosfor merupakan siklus sedimen yang penting bagi produktivitas ekosistem. Mikroorganisme berperan dalam pelapukan mineral fosfat, mineralisasi senyawa organik, dan imobilisasi fosfat, sehingga mengatur ketersediaannya bagi tumbuhan dan organisme lain. Aktivitas mikroba ini mempengaruhi kesuburan tanah, produktivitas perairan, dan keseimbangan nutrisi di biosfer (Schlesinger & Bernhardt, 2013).

Peran Mikroorganisme dalam Siklus Fosfor

Mikroorganisme memiliki peran sentral dalam mobilisasi dan fiksasi fosfat, sehingga mengatur ketersediaan fosfor bagi tanaman dan organisme lain:

1. Mikroba pelarut fosfat

Bakteri seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan jamur seperti *Aspergillus* mampu mengubah bentuk fosfat yang tidak larut (misalnya kalsium fosfat, besi fosfat) menjadi ortofosfat yang tersedia bagi tanaman. Proses ini dilakukan melalui sekresi asam organik yang melarutkan mineral fosfat (Rodríguez & Fraga, 1999)

2. Produksi fosfatase

Banyak mikroorganisme menghasilkan enzim fosfatase yang memutus ikatan fosfat dari senyawa organik, melepaskan ortofosfat yang dapat dimanfaatkan organisme lain (Tabatabai, 1994).

E. Siklus Besi dan Logam Lain

Besi (Fe) dan logam lain seperti mangan (Mn), tembaga (Cu), kobalt (Co), dan molibdenum (Mo) merupakan unsur esensial bagi kehidupan karena berperan dalam reaksi enzimatik, transport elektron, dan proses metabolisme lainnya (Schlesinger & Bernhardt, 2013). Dalam ekosistem, bentuk kimia logam ini berubah melalui proses oksidasi-reduksi yang dimediasi oleh mikroorganisme, baik di lingkungan aerob maupun anaerob.

“Iron cycling is driven by a complex interplay between abiotic chemistry and microbial metabolisms, influencing nutrient availability and contaminant mobility.” (Emerson et al., 2010).

F. Implikasi Lingkungan

1. Pemeliharaan Keseimbangan Ekosistem

Aktivitas mikroba menjaga ketersediaan unsur hara, mendukung produktivitas primer, dan mencegah penumpukan bentuk unsur yang toksik (Falkowski et al., 2008).

2. Mitigasi Perubahan Iklim

Metanotrof dan bakteri denitrifikasi mengurangi emisi gas rumah kaca (CH_4 dan N_2O), sehingga membantu menekan pemanasan global (Kuypers et al., 2018)

3. Bioremediasi Pencemar Logam dan Bahan Organik

Mikroba pereduksi logam seperti *Geobacter* mampu mengendapkan atau mengimobilisasi logam berat, mengurangi dampak toksisitas di perairan dan tanah (Lovley, 2017).

4. Pencegahan Eutrofikasi

Bakteri denitrifikasi dan pelarut fosfat membantu mengontrol kadar nitrogen dan fosfor, mengurangi risiko ledakan alga di perairan

5. Keterhubungan Global Siklus Unsur

Perubahan aktivitas mikroba akibat suhu, pH, atau pencemaran dapat memengaruhi keseimbangan antar siklus (misalnya N, C, S) sehingga memicu efek berantai pada iklim dan produktivitas (Emerson et al., 2010).

G. Kesimpulan

Mikroorganisme merupakan penggerak utama siklus nutrisi global, berperan dalam fiksasi, oksidasi, reduksi, dan dekomposisi unsur hara seperti C, N, S, P, Fe, dan logam lainnya. Aktivitas mereka tidak hanya memastikan ketersediaan nutrisi bagi organisme lain, tetapi juga mengatur keseimbangan ekosistem, mengendalikan emisi gas rumah kaca, mencegah pencemaran, dan memfasilitasi bioremediasi. Perubahan kondisi lingkungan seperti suhu, pH, dan pencemaran dapat mengganggu kinerja mikroba, memicu ketidakseimbangan antar siklus unsur, dan berdampak luas pada stabilitas ekosistem serta iklim global (Falkowski et al., 2008).

DAFTAR PUSTAKA

- Berner, R. A. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426(6964), 323–326.
<https://doi.org/10.1038/nature02131>
- Boone, D. R., Whitman, W. B., & Rouviere, P. (1993). Diversity and taxonomy of methanogens. In J. G. Ferry (Ed.), *Methanogenesis* (pp. 35–80). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2391-8_2 Campbell. (2012). *Biologi*. Erlangga.
- Conrad, R. (2020). Importance of microbial methane production and consumption in terrestrial ecosystems. *FEMS Microbiology Reviews*, 44(3), 418–432.
<https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa012>
- Correll, D. L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 27(2), 261–266.
<https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004>
- Emerson, D., Fleming, E. J., & McBeth, J. M. (2010). Iron-oxidizing bacteria: An environmental and genomic perspective. *Annual Review of Microbiology*, 64, 561–583.
<https://doi.org/10.1146/annurev.micro.112408.134208>
- Falkowski, P. G., Fenchel, T., & Delong, E. F. (2008). The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*, 320(5879), 1034–1039.
<https://doi.org/10.1126/science.1153213>
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., & Cosby, B. J. (2008). The nitrogen cascade. *BioScience*, 58(4), 341–356.
<https://doi.org/10.1641/B580408>
- Hanson, R. S., & Hanson, T. E. (1996). Methanotrophic bacteria. *Microbiological Reviews*, 60(2), 439–471.
<https://doi.org/10.1128/mr.60.2.439-471.1996>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jastrow, J. D., Amonette, J. E., & Bailey, V. L. (2007). Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 80(1), 5–23. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9178-3>
- Kappler, A., Pasquero, C., Konhauser, K. O., & Newman, D. K. (2005). Phototrophic Fe(II) oxidation in anoxic environments. *Microbiology*, 151(6), 1633–1644. <https://doi.org/10.1099/mic.0.27535-0>
- Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5), 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
- Lovley, D. R. (2017). Happy together: Microbial communities that hook up to swap electrons. *ISME Journal*, 11(2), 327–336. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.136>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2019). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2021). *Microbiology* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2005). *Biology of plants* (7th ed.). W. H. Freeman and Company.
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4–5), 319–339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An analysis of global change* (3rd ed.). Academic Press.

- Sharples, A. N., Kleinman, P. J. A., Heathwaite, A. L., Gburek, W. J., Folmar, G. J., & Schmidt, J. P. (2003). *Agricultural phosphorus and eutrophication*. USDA Agricultural Research Service https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/oc/np/p_hosphorus.pdf
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
- Suharsono, & K., P. M. (2017). *Biologi Umum*. LPPM Universitas Siliwangi. Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). *Principles and applications of soil microbiology*. Pearson Prentice Hall.
- Tabatabai, M. A. (1994). Soil enzymes. In R. W. Weaver, J. S. Angle, & P. S. Bottomley (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2 – Microbiological and biochemical properties* (pp. 775-833). Soil Science Society of America.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2020). *Microbiology: An introduction* (13th ed.). Pearson. Torsvik, V., & Øvreås, L. (2002). Microbial diversity and function in soil: From genes to ecosystems. *Current Opinion in Microbiology*, 5(3), 240-245. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(02\)00324-7](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(02)00324-7)

BAB 7

INOKULASI DAN ISOLASI MIKROORGANISME

apt. Wiwit Zuriati Uno, S.Farm., M.Si.

A. Pendahuluan

Mikroorganisme merupakan makhluk hidup berukuran sangat kecil yang hanya dapat diamati menggunakan mikroskop, dengan populasi yang sangat melimpah di berbagai ekosistem. Hampir setiap lingkungan—baik tanah, air, udara, maupun tubuh organisme—menjadi habitat bagi komunitas mikroba dengan keragaman luar biasa. Perannya dalam kehidupan manusia sangat beragam; sebagian besar memberikan manfaat besar, tetapi ada pula yang menimbulkan ancaman kesehatan maupun kerugian. Karena itu, pengetahuan mengenai cara memperlakukan, membudidayakan, sekaligus mengendalikan mikroorganisme menjadi aspek mendasar dalam biologi, kedokteran, hingga industri (Madigan et al., 2018).

Dari sisi manfaat, mikroorganisme sudah digunakan sejak lama dalam kehidupan sehari-hari. Dalam bidang pangan, keberadaan mikroba dimanfaatkan pada proses fermentasi yang menghasilkan produk populer seperti yoghurt, keju, tempe, kecap, hingga tape. Fermentasi tidak hanya memperbaiki cita rasa dan aroma, tetapi juga meningkatkan daya simpan serta kandungan nutrisi, misalnya dengan menghasilkan vitamin maupun metabolit bioaktif (Hutkins, 2018). Pada bidang kesehatan, mikroorganisme berperan penting sebagai sumber senyawa obat, contohnya *Penicillium notatum* yang pertama kali

ditemukan mampu menghasilkan penisilin. Sementara itu, dalam pengelolaan lingkungan, mikroba memiliki fungsi vital melalui proses bioremediasi, yaitu penguraian senyawa berbahaya atau limbah menjadi bentuk yang lebih aman sehingga mampu mengurangi pencemaran (Azubuike et al., 2016). Meski demikian, mikroorganisme juga berpotensi merugikan. Banyak spesies bersifat patogen yang mampu menyebabkan penyakit menular pada manusia, hewan, maupun tumbuhan. Contoh bakteri berbahaya antara lain *Mycobacterium tuberculosis*, *Salmonella typhi*, dan *Vibrio cholerae* yang dapat memicu penyakit serius pada manusia. Dalam bidang pangan, kontaminasi mikroba patogen menurunkan kualitas, berpotensi menyebabkan keracunan, dan membahayakan konsumen (Prescott, 2020). Hal ini menegaskan perlunya pengendalian yang tepat agar risiko dapat ditekan sekaligus manfaatnya tetap dimaksimalkan. Dalam praktik mikrobiologi, keterampilan **inokulasi** dan **isolasi** menjadi kunci utama.

Inokulasi merupakan teknik penanaman mikroorganisme ke dalam medium tertentu dengan tujuan menumbuhkan atau memperbanyak populasi, serta mengamati sifat fisiologisnya. Kegiatan ini menuntut penerapan prosedur aseptis yang ketat untuk mencegah kontaminasi silang (Cappuccino & Welsh, 2017). Sebaliknya, isolasi merupakan proses memisahkan mikroba dari campuran hingga diperoleh kultur murni, yakni kultur yang berisi satu jenis spesies saja. Kultur murni ini menjadi dasar bagi penelitian lanjutan, identifikasi jenis mikroba, serta pemanfaatannya dalam industri maupun bioteknologi (Madigan et al., 2018). Kedua keterampilan ini menjadi fondasi bagi riset terapan lintas bidang. Dalam penelitian pangan, misalnya, isolasi probiotik diperlukan agar mikroorganisme yang digunakan benar-benar murni dan stabil sebelum diaplikasikan dalam produk. Dalam bioremediasi, mikroba pengurai harus diinokulasikan ke medium selektif agar dapat diidentifikasi dan diuji efektivitasnya (Azubuike et al., 2016). Sementara dalam dunia medis, isolasi bakteri patogen memudahkan proses diagnosis penyakit dan penentuan terapi

yang tepat bagi pasien. Selain itu, penguasaan inokulasi dan isolasi berkontribusi besar terhadap perkembangan ilmu pengetahuan modern. Kebutuhan akan kultur murni semakin meningkat, baik dalam penelitian genetika, produksi enzim, maupun rekayasa metabolit sekunder. Teknik tradisional seperti metode gores (*streaking*) pada media padat masih diajarkan sebagai dasar, tetapi kini semakin banyak dikombinasikan dengan teknologi molekuler seperti PCR dan sekuensing DNA untuk mempercepat serta meningkatkan akurasi identifikasi mikroorganisme (Prescott, 2020). Dengan demikian, pemahaman dan keterampilan dalam melakukan inokulasi serta isolasi mikroorganisme menjadi sangat penting. Melalui teknik ini, potensi positif mikroba dapat dimanfaatkan secara optimal, sementara dampak negatifnya dapat diminimalkan. Pada akhirnya, penguasaan keterampilan dasar ini membuka jalan bagi inovasi di berbagai sektor, termasuk pangan, kesehatan, industri, dan lingkungan hidup.

B. Konsep Dasar Inokulasi

Inokulasi merupakan salah satu keterampilan mendasar dalam mikrobiologi, yaitu proses pemindahan mikroorganisme dari satu tempat atau medium ke medium lain yang sesuai untuk menunjang pertumbuhannya. Proses ini dilakukan dengan prosedur aseptis yang ketat, sehingga mikroorganisme target dapat tumbuh tanpa terkontaminasi oleh mikroba lain (Cappuccino & Welsh, 2017).

Tujuan utama inokulasi meliputi beberapa aspek:

- 1. Menumbuhkan mikroba untuk penelitian** – kultur mikroba diperlukan untuk observasi morfologi, fisiologi, maupun aktivitas biokimia.
- 2. Memperbanyak sel mikroba untuk produksi metabolit** – misalnya produksi enzim, asam organik, antibiotik, atau senyawa bioaktif lain.

3. **Uji sifat fisiologis dan biokimia** – inokulasi digunakan untuk melihat kemampuan mikroba dalam memfermentasi gula, menghasilkan enzim tertentu, atau beradaptasi pada kondisi lingkungan spesifik.

C. Metode dan Tahapan Inokulasi

Inokulasi merupakan salah satu keterampilan mendasar dalam mikrobiologi yang bertujuan menumbuhkan dan memelihara mikroorganisme pada medium yang sesuai. Proses ini harus dilakukan secara aseptis agar kultur yang diperoleh bebas dari kontaminasi mikroba lain (Cappuccino & Welsh, 2017). Secara umum, metode inokulasi dapat dibedakan berdasarkan teknik yang digunakan, yaitu:

1. Inokulasi pada Media Padat (Solid Media)

Media padat biasanya berbasis agar, digunakan untuk isolasi koloni murni atau uji sifat pertumbuhan mikroorganisme.

Metode yang sering digunakan:

- a. **Streak Plate Method (goresan)** Mikroba digoreskan pada permukaan agar menggunakan *inoculating loop* yang telah disterilisasi. Teknik ini bertujuan memisahkan sel sehingga terbentuk koloni tunggal. *Contoh:* isolasi *Escherichia coli* dari sampel air minum (Madigan et al., 2019). **Streak Plate Method atau Metode Gores ini bertujuan untuk** memperoleh koloni tunggal dari campuran mikroorganisme. Adapun tahapan **Tahapan:**

- 1) Sterilkan ose dengan pembakaran.
- 2) Ambil inokulum mikroba.
- 3) Goreskan pada media padat (agar) dalam cawan petri secara bertahap (zona 1–4).
- 4) Inkubasi pada suhu sesuai jenis mikroba.

- b. **Spread Plate Method (sebar)** Suspensi mikroba ditetaskan di atas permukaan agar, lalu diratakan dengan *spreader* steril. Digunakan untuk menghitung jumlah mikroba (total plate count). *Contoh:* inokulasi *Lactobacillus plantarum* pada MRS agar untuk enumerasi (Hutkins,

2018). **Spread Plate Method** atau **Metode Sebar** merupakan metode yang digunakan untuk menyebarkan mikroorganisme merata di permukaan agar. **Tahapan** penggunaan metode ini

- 1) Pipetkan suspensi mikroba ke permukaan media agar.
- 2) Gunakan batang L-rod steril untuk menyebarkan inokulum.
- 3) Biarkan agar menyerap suspensi.
- 4) Inkubasi hingga koloni tumbuh.

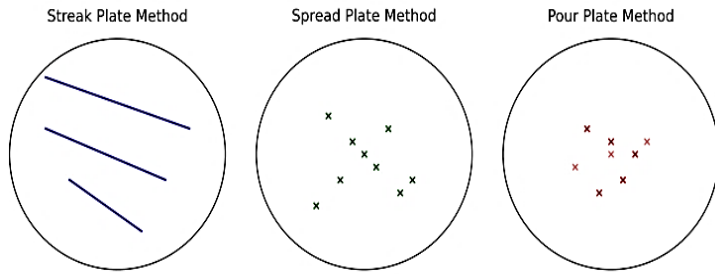
Contoh penggunaan metode pada Penentuan jumlah bakteri asam laktat dalam yoghurt (Ogunbanwo et al., 2017).

- c. **Pour Plate Method (cawan tuang)** Suspensi mikroba dicampur dengan medium agar cair lalu dituangkan ke cawan petri. Koloni akan tumbuh di seluruh medium (permukaan dan bagian dalam).

Contohnya inokulasi *Bacillus subtilis* pada nutrient agar untuk uji viabilitas (Singh et al., 2019). **Tujuan** penggunaan metode ini adalah menghitung jumlah mikroba dalam sampel (viable count) dengan **Tahapan**:

- 1) Campurkan suspensi mikroba dengan media agar cair steril (40–45°C).
- 2) Tuang campuran ke cawan petri.
- 3) Biarkan memadat.
- 4) Inkubasi dan amati koloni di permukaan maupun dalam agar.

Contoh: Isolasi bakteri tanah untuk produksi enzim amilase (Singh et al., 2018).



Gambar 7.1 Metode Inokulasi

2. Inokulasi pada Media Cair (Liquid Media)

Media cair digunakan untuk memperbanyak sel atau memproduksi metabolit tertentu.

Tahapan:

- Ambil inokulum menggunakan pipet steril atau loop.
- Masukkan ke dalam tabung atau erlenmeyer berisi medium cair steril.
- Inkubasi dengan kondisi sesuai (suhu, waktu, aerasi).

Contoh: inokulasi *Saccharomyces cerevisiae* pada medium cair glukosa untuk produksi etanol (Kumar et al., 2020).

3. Inokulasi Jaringan atau In Situ

Digunakan untuk menumbuhkan mikroba langsung dari jaringan tumbuhan, hewan, atau lingkungan.

Tahapan:

- Sterilisasi permukaan sampel (jika dari jaringan).
- Potong bagian kecil, letakkan di medium steril.
- Inkubasi hingga mikroba keluar dari jaringan dan tumbuh di medium.

Contoh: inokulasi endofit dari daun kelor (*Moringa oleifera*) untuk skrining senyawa bioaktif (Abalaka et al., 2021).

D. Tahapan Umum Inokulasi

1. Persiapan Alat dan Medium

- Sterilisasi medium (autoklaf, oven, atau filtrasi).
- Siapkan alat (loop, jarum inokulasi, pipet) yang sudah disterilkan.

2. Pengambilan Inokulum

- a. Menggunakan loop atau jarum steril yang telah dipanaskan dan didinginkan.
- b. Inokulum diambil dari kultur stok atau sampel.

3. Pemindahan ke medium baru

- a. Dilakukan sesuai metode (streaking, spreading, pouring, atau inokulasi cair).
- b. Harus dilakukan di area aseptis (laminar air flow).

4. Inkubasi

- a. Medium ditempatkan pada kondisi optimal (suhu, kelembapan, waktu, atmosfer aerob/anaerob).

5. Pengamatan

- a. Pertumbuhan mikroba diamati dari morfologi koloni, kekeruhan medium cair, atau uji biokimia lanjut.

E. Konsep Dasar Isolasi

Isolasi merupakan teknik penting dalam mikrobiologi yang bertujuan memisahkan satu jenis mikroorganisme dari suatu campuran sehingga diperoleh **kultur murni** (*pure culture*). Kultur murni hanya mengandung satu spesies mikroba, sehingga dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut tanpa gangguan dari mikroorganisme lain. Isolasi mikroorganisme merupakan salah satu keterampilan dasar yang sangat penting dalam ilmu mikrobiologi. Proses ini bertujuan untuk memisahkan satu jenis mikroba dari suatu campuran kompleks sehingga diperoleh kultur murni atau *pure culture*. Kultur murni hanya mengandung satu spesies mikroba, sehingga memudahkan peneliti dalam melakukan berbagai analisis fisiologis, biokimia, maupun genetik tanpa adanya gangguan dari mikroorganisme lain. Kultur murni sangat diperlukan dalam berbagai bidang penelitian maupun aplikasi industri. Dalam bidang kesehatan, misalnya, isolasi *Salmonella typhi* dari sampel klinis digunakan untuk diagnosis penyakit tifus. Pada bidang farmasi, *Streptomyces sp.* diisolasi untuk menghasilkan antibiotik streptomisin. Sementara di bidang pangan, *Lactobacillus plantarum* sering diisolasi untuk dijadikan starter

fermentasi sayuran. Sebagai contoh lain, *Bacillus subtilis* dapat diisolasi dari tanah, kemudian dikembangkan sebagai kultur murni untuk produksi enzim protease yang dimanfaatkan dalam industri pangan (pemecahan protein pada pembuatan keju) maupun industri deterjen (enzim pembersih noda protein).

Kultur murni diperlukan karena setiap mikroba memiliki karakteristik fisiologis, morfologis, dan genetik yang berbeda. Dengan memisahkan dan memurnikan satu jenis mikroba, peneliti dapat melakukan:

1. **Identifikasi spesies** Misalnya, isolasi *Salmonella typhi* dari sampel klinis untuk diagnosis penyakit tifus.
2. **Produksi metabolit tertentu** Seperti isolasi *Streptomyces* sp. untuk menghasilkan antibiotik streptomisin.
3. **Aplikasi industri dan pangan** Misalnya, isolasi *Lactobacillus plantarum* untuk kultur starter fermentasi sayuran.

Contoh kasus: *Bacillus subtilis* dapat diisolasi dari tanah, lalu dikembangkan menjadi kultur murni untuk produksi enzim protease yang bermanfaat dalam industri pangan (pemecahan protein pada pembuatan keju) maupun industri deterjen (enzim pembersih noda protein).

F. Metode dan Teknik Isolasi

1. Streak plate method

Salah satu metode isolasi yang paling sering digunakan adalah **streak plate method** atau metode goresan. Teknik ini dilakukan dengan cara menggoreskan sampel mikroorganisme pada permukaan media padat dalam cawan petri menggunakan jarum ose steril. Goresan dilakukan secara bertahap dari satu sisi cawan ke sisi lain dengan pola tertentu, biasanya kuadran atau zig-zag. Setiap kali jarum ose digoreskan ke area baru, jumlah sel mikroba yang terbawa semakin sedikit. Setelah proses inkubasi, sel yang terpisah akan berkembang menjadi koloni tunggal yang dapat diambil sebagai kultur murni. Misalnya, *Escherichia coli* dapat diisolasi dari sampel air menggunakan metode ini untuk memastikan keamanan kualitas air konsumsi.

2. Metode Serial Dilution

Metode **serial dilution** atau pengenceran bertingkat. Dalam metode ini, suspensi mikroorganisme diencerkan secara berurutan, biasanya dengan perbandingan 1:10, hingga diperoleh tingkat pengenceran tertentu yang membuat jumlah mikroba berkurang secara signifikan. Dari setiap tingkat pengenceran, sebagian kecil sampel kemudian ditanam pada media padat. Hasil inkubasi akan menunjukkan semakin sedikit jumlah koloni pada cawan dengan pengenceran yang lebih tinggi, sehingga memungkinkan terbentuknya koloni tunggal yang dapat diisolasi lebih lanjut. Metode ini banyak digunakan dalam analisis kualitas pangan, misalnya untuk menghitung jumlah bakteri hidup dalam susu segar dengan metode **Total Plate Count (TPC)**. Selain itu, terdapat pula **selective media** atau media selektif yang diformulasikan khusus untuk mendukung pertumbuhan mikroba tertentu sekaligus menghambat mikroba lain. Media ini biasanya mengandung zat tambahan seperti garam empedu, antibiotik, atau pewarna diferensial yang bekerja secara selektif. Sebagai contoh, Mac Conkey agar digunakan untuk mengisolasi bakteri Gram negatif karena kandungan garam empedu dan kristal violet yang menghambat bakteri Gram positif. Pada media ini, *Escherichia coli* akan membentuk koloni berwarna merah muda karena kemampuan memfermentasi laktosa, sedangkan *Salmonella* membentuk koloni pucat karena tidak memfermentasi laktosa. Media selektif lainnya adalah MRS agar yang dirancang khusus untuk mendukung pertumbuhan *Lactobacillus*, bakteri asam laktat yang banyak dimanfaatkan dalam fermentasi pangan.

3. Micromanipulation

Metode ini dilakukan dengan bantuan mikropipet khusus atau mikromanipulator yang terhubung dengan mikroskop. Dengan alat tersebut, peneliti dapat mengambil satu sel tunggal dari campuran mikroorganisme dan menempatkannya ke dalam medium yang sesuai. Sel tunggal

ini kemudian akan tumbuh menjadi koloni murni setelah proses inkubasi. Teknik ini meskipun jarang digunakan dalam laboratorium dasar, tetapi memiliki peranan penting dalam penelitian lanjutan seperti rekayasa genetika pada *Saccharomyces cerevisiae* atau studi mendalam tentang interaksi gen pada mikroorganisme tertentu. Untuk penelitian yang lebih spesifik, terutama dalam bidang genetika dan bioteknologi, digunakan teknik **micromanipulation** atau mikromanipulasi. Contoh nyata penerapan isolasi dapat dilihat pada mikroorganisme *Bacillus subtilis* yang banyak ditemukan di tanah. Melalui isolasi hingga menjadi kultur murni, mikroorganisme ini dikembangkan sebagai produsen enzim protease. Enzim tersebut memiliki manfaat luas, baik dalam industri pangan untuk memecah protein pada proses pembuatan keju, maupun dalam industri deterjen sebagai enzim pembersih noda berbasis protein. Hal ini menunjukkan bahwa teknik isolasi tidak hanya berperan dalam ranah penelitian, tetapi juga berdampak nyata dalam kehidupan sehari-hari melalui berbagai produk hasil bioteknologi. Dengan demikian, metode isolasi baik dengan goresan, pengenceran bertingkat, media selektif, maupun mikromanipulasi merupakan pilar penting dalam mikrobiologi. Teknik-teknik ini tidak hanya membantu dalam memperoleh kultur murni, tetapi juga membuka peluang besar untuk pengembangan aplikasi mikroorganisme dalam bidang kesehatan, pangan, dan industri.

Tahapan Isolasi Mikroorganisme

1. Streak Plate Method

Teknik goresan pada cawan agar menggunakan ose steril. Goresan dilakukan berulang kali sehingga sel-sel mikroba terpisah dan akhirnya tumbuh sebagai koloni tunggal. Koloni tunggal ini merupakan sumber kultur murni.

2. Serial Dilution

Suspensi mikroba diencerkan secara bertahap (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , dst.). Hasil pengenceran ditanam pada media agar sehingga jumlah mikroba cukup sedikit untuk membentuk koloni tunggal.

3. Selective Media

Menggunakan media dengan kandungan selektif yang mendukung pertumbuhan mikroba tertentu sekaligus menghambat mikroba lain. Contoh: **MacConkey agar** untuk bakteri Gram negatif tumbuh, sedangkan Gram positif dihambat. *E. coli* akan tampak merah muda (fermentasi laktosa), sedangkan *Salmonella* pucat (tidak fermentasi).

4. Micromanipulation

Teknik lanjutan dengan mikromanipulator untuk memisahkan satu sel mikroba dari campuran. Biasanya digunakan dalam riset genetika dan bioteknologi.

G. Aplikasi dan Tantangan

Mikroorganisme hasil inokulasi dan isolasi memiliki berbagai aplikasi yang sangat luas dalam bidang pangan, lingkungan, kesehatan, hingga industri modern.

Dalam bidang pangan, mikroorganisme berperan besar dalam menciptakan produk fermentasi yang bernilai gizi maupun ekonomi. Contoh yang paling dikenal adalah produksi tempe melalui fermentasi kedelai oleh *Rhizopus oligosporus*, pembuatan yoghurt dengan memanfaatkan *Lactobacillus bulgaricus* dan *Streptococcus thermophilus*, serta produksi keju dengan peran bakteri asam laktat dan enzim protease dari mikroba tertentu. Selain itu, isolasi mikroorganisme probiotik juga banyak digunakan dalam fortifikasi pangan, yakni penambahan mikroba bermanfaat untuk meningkatkan kesehatan pencernaan dan daya tahan tubuh manusia.

Di Bidang lingkungan, mikroorganisme yang diisolasi dan dikembangkan memiliki peran penting dalam bioremediasi, yaitu pemanfaatan mikroba untuk membersihkan polutan atau limbah organik. Bakteri pengurai seperti *Pseudomonas sp.* dapat

dimanfaatkan untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon pada tanah tercemar minyak, sementara jamur tertentu seperti *Aspergillus* dan *Fusarium* menunjukkan kemampuan dalam proses degradasi plastik yang sulit terurai di alam. Dengan cara ini, keberadaan mikroorganisme berkontribusi pada upaya pelestarian lingkungan sekaligus menjadi solusi terhadap masalah pencemaran. Namun demikian, dalam praktiknya terdapat sejumlah tantangan yang harus dihadapi. Kontaminasi silang merupakan masalah klasik dalam kegiatan inokulasi maupun isolasi, yang dapat mengakibatkan kegagalan eksperimen dan hilangnya kultur murni. Tantangan lainnya adalah keterbatasan fasilitas laboratorium steril, terutama di daerah dengan sumber daya terbatas, yang menyebabkan risiko tinggi terhadap masuknya mikroba asing ke dalam kultur. Selain itu, proses identifikasi mikroorganisme tidak selalu sederhana. Teknologi modern seperti Polymerase Chain Reaction (PCR) dan Next Generation Sequencing (NGS) memang sangat membantu dalam mengenali identitas mikroba hingga tingkat genetik, namun peralatan ini memerlukan biaya besar, keahlian khusus, dan infrastruktur laboratorium yang memadai. Oleh karena itu, meskipun aplikasi inokulasi dan isolasi mikroorganisme sangat menjanjikan, peneliti tetap harus mengatasi hambatan teknis dan logistik agar manfaat mikroorganisme dapat dimaksimalkan untuk kesejahteraan manusia dan kelestarian lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cappuccino, J. G., & Sherman, N. (2017). *Microbiology: A laboratory manual* (11th ed.). Pearson Education.
- Dash, H. R., Mangwani, N., Chakraborty, J., Kumari, S., & Das, S. (2013). Marine bacteria: Potential candidates for enhanced bioremediation. *Marine Pollution Bulletin*, 77(1-2), 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.025>
- Khalid, A. (2011). An overview of lactic acid bacteria. *International Journal of Biosciences*, 1(3), 1-13.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Boston: Pearson.
- Mundir (2013) *Metode Penelitian Kualitatif dan Kuantitatif*, STAIN Jember Press. Edited by Hisbiyatul Hasanah. Jember: STAIN Jember Press.
- Prescott, L. M. (2020). *Microbiology* (11th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Ray, R. C., & Joshi, V. K. (2014). Fermented foods: Past, present and future. In R. C. Ray & D. Montet (Eds.), *Microorganisms and fermentation of traditional foods* (pp. 1-36). CRC Press.
- Sharma, R., & Jandaik, S. (2021). Role of microbes in food fermentation and environmental sustainability. *Journal of Applied Microbiology*, 130(2), 453-465. <https://doi.org/10.1111/jam.14824>
- Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., & Mehta, P. K. (2019). Microbial bioremediation of environmental pollutants: Recent advances and future prospects. *Environmental Sustainability*, 2, 175-188. <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-x>
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2019). *Microbiology: An introduction* (13th ed.). New York: Pearson.

Zotta, T., Parente, E., & Ricciardi, A. (2017). Aerobic metabolism in the genus *Lactobacillus*: Impact on stress response and potential applications in the food industry. *Journal of Applied Microbiology*, 122(4), 857–869. <https://doi.org/10.1111/jam.13399>

BAB

8

STERILISASI DAN DESINFEKSI

Siti Raudah, S.Si., M.Si.

A. Pendahuluan

Pengendalian mikroorganisme sangat penting, baik di bidang medis, industri dan lainnya. Untuk mencegah dan mengobati penyakit dan untuk mencegah kerusakan makanan dan produk-produk industri yang lain. Metode pengendalian mikroorganisme yang umum dilakukan mencakup penggunaan agen-agen kimia dan fisika yang memberikan efek merugikan pada struktur dan fungsi mikroba sehingga menghasilkan efek mikrobisida atau mikrobistatik. Efek mikrobisida adalah suatu efek yang mematikan mikroba dengan segera. Efek mikrobisida menghambat kapasitas reproduksi sel dan mempertahankan populasi mikroba dalam jumlah yang konstan. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), sterilisasi dan desinfeksi sangat penting untuk mencegah Infeksi Terkait Pelayanan Kesehatan (Healthcare-Associated Infections/HAI) dan memastikan keamanan pasien dan tenaga medis. WHO menekankan bahwa tanpa sterilisasi dan desinfeksi yang efektif, sulit untuk mencapai pelayanan kesehatan yang berkualitas

Metode kimia untuk pengendalian pertumbuhan mikroba sebagai berikut:

1. Antiseptik: senyawa-senyawa kimia yang digunakan pada jaringan hidup dan digunakan untuk mematikan atau menghambat pertumbuhan bentuk vegetative mikroba

2. Desinfektan: senyawa kimia yang membunuh atau menghambat pertumbuhan bentuk vegetatif mikroba pada benda mati
3. Agen kemoterapeutik: senyawa kimia yang menghancurkan atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme dalam jaringan hidup

Metode fisika untuk pengendalian pertumbuhan mikroba sebagai berikut:

1. Pengendalian suhu

Penggunaan suhu tinggi menjadi satu cara paling efektif untuk membunuh mikroorganisme dengan mendenaturasi protein dan enzim dalam sel.

2. Pengendalian dengan radiasi

Radiasi dapat merusak DNA mikroorganisme, membuatnya tidak aktif atau mati

3. Pengendalian dengan filtrasi

Metode ini secara fisik memisahkan mikroorganisme dari cairan atau gas dengan menggunakan filter berpori sangat kecil.

Agan agen fisika dan kimia memiliki mekanisme kerja pengendalian mikroorganisme yang beragam meskipun semuanya menghasilkan efek kerusakan terhadap satu atau lebih struktur atau molekul seluler esensial dengan tujuan menyebabkan kematian sel atau menghambat pertumbuhan sel. Daerah kerusakan yang dapat menyebabkan malfungsi Adalah dinding sel, membrane sel, sitoplasma, enzim-enzim, atau asam nukleat. Wujud efek kerusakan tersebut dapat berupa:

1. Kerusakan dinding sel. Hal ini dapat terjadi lisis dinding sel akan menyebabkan protoplas rentan terhadap kerusakan osmotik dan suatu lingkungan yang hipotonik dapat menyebabkan terjadinya lisis pada protoplas yang rentan. Adapun senyawa tertentu menghambat sintesis dinding sel yang sangat dibutuhkan selama reproduksi sel mikroba. Kegagalan dalam sintesis segmen dinding sel mengakibatkan protoplasma tidak terlindungi

2. Kerusakan membran sel. Kondisi ini disebabkan oleh lisis membrane sel, yang akan menyebabkan kematian sel yang cepat. Selain itu, sifat selektif alami membrane dapat terpengaruh tanpa menyebabkan kerusakan secara keseluruhan. Akibatnya banyak molekul seluler esensial yang hilang atau terjadi gangguan asupan nutrient. Sehingga proses metabolic akan terganggu.
3. Perubahan keadaan koloidal sitoplasma. Beberapa agen menyebabkan denaturasi protein sitoplasma. Proses denaturasi dapat menyebabkan inaktivasi enzim dan kematian seluler dengan merusak ikatan molekuler protein secara non reversible sehingga protein tersebut tidak aktif secara biologis.
4. Inaktivasi enzim seluler. Enzim dapat diinaktifkan secara kompetitif atau nonkompetitif. Penghambatan non kompetitif bersifat non reversible dan terjadi setelah penggunaan beberapa agen fisika. Seperti merkuri klorida (MgCl_2) yang menyebabkan molekuler protein tidak terpinil sehingga protein tersebut tidak aktif secara biologis.
5. Mempengaruhi struktur dan fungsi molekul DNA. Molekul DNA merupakan pusat pengendalian sel dan juga dapat menjadi daerah target seluler untuk perusakan dan penghambatan. Beberapa agen mempunyai afinitas untuk DNA dan menyebabkan rusaknya molekul DNA sehingga mengganggu proses replikasi dan perannya dalam sintesis protein.

Prosedur sterilisasi dan desinfeksi bertujuan untuk mencegah penularan mikroba kepada pasien. Beberapa faktor yang memengaruhi keberhasilan metode sterilisasi dan desinfeksi adalah;

1. Jumlah organik (mikroorganisme dan bahan kontaminan lainnya seperti darah atau cairan tubuh). Waktu yang diperlukan untuk mematikan mikroorganisme meningkatkan secara langsung seiring dengan jumlah mikroorganisme (jumlah mikroorganisme yang masih hidup dalam sampel). Oleh karena itu, bahan organik dihilangkan

secara mekanis sebelum sterilisasi kimia untuk mengurangi jumlah mikroorganisme

2. Jenis organisme yang ditemukan; Misalnya, spora *Bacillus* spp. merupakan yang paling resisten, sedangkan virus berselubung (misalnya, virus herpes simpleks) merupakan yang paling sensitif terhadap aksi desinfektan.
3. Konsentrasi dan waktu paparan terhadap germisida: Misalnya, bahan kimia yang telah terbukti memiliki aktivitas bakterisida, virisida, sporisida, dan fungisida, ketika digunakan dalam periode yang lebih singkat, berfungsi sebagai desinfektan.
4. Sifat fisik dan kimia permukaan (engsel, retakan, permukaan kasar atau halus): Misalnya, sinar UV tidak menembus dengan baik. Oleh karena itu, sinar UV hanya membunuh organisme yang terpapar langsung pada permukaan kabinet keamanan biologis (BSCs).
5. Suhu: Uap bertekanan, ketika digunakan dalam jangka waktu tertentu, dapat mensterilkan bahan, namun hanya merebusnya dalam air yang berfungsi sebagai desinfektan.
6. Faktor lain yang memengaruhi sterilisasi adalah pH, kelembapan, dan adanya biofilm (Tankeswar, 2025)

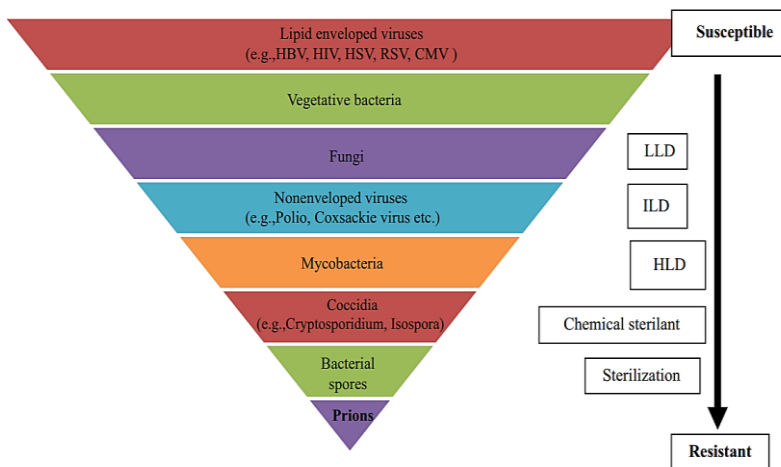
B. Sterilisasi

Sterilisasi adalah proses di mana semua mikroorganisme hidup, spora yang dapat hidup, virus, dan lainnya dimusnahkan (dibunuh). Mikroorganisme dapat dihilangkan melalui panas (seperti uap, panas kering, dan pembakaran) dan bahan kimia. Tanpa prosedur sterilisasi yang efektif, teknik aseptis dan studi laboratorium mikrobiologi tidak akan mungkin dilakukan (Erkmen, 2021) (tabel 8.1). Penggunaan sterilisasi dengan prosedur fisik dan/atau kimiawi untuk sepenuhnya menghilangkan atau menghancurkan semua bentuk kehidupan mikroba (gambar 8.1). Istilah ini bersifat mutlak dan menunjukkan mematikan semua mikroorganisme dan spora (Bhatia & Ichhpujani, 2008).

Tabel 8.1 Metode Sterilisasi

Metode Sterilisasi	Contoh	Target	Aplikasi
High Temperatur	Uap, panas kering	Semua bentuk mikroba (vegetatif dan spora)	Alat bedah yang tahan panas Peralatan semi-kritis
Low Temperatur	Gas etilen oksida, hidrogen peroksida, ozon, plasma gas, klorin dioksida gas, radiasi ionisasi, cahaya berdenyut	Bakteri gram-positif, bakteri gram-negatif, mikobakteria, virus berselubung lipid, virus besar tanpa selubung, spora, kista, trofozoit, kokidia	Peralatan kritis yang sensitif terhadap panas Peralatan perawatan pasien semi-kritis
Liquid Chemical	Sterilan kimia	Prion (tahan terhadap semua bentuk sterilisasi)	Peralatan kritis yang sensitif terhadap panas Peralatan perawatan pasien semi-kritis (yang dapat direndam)
Lainnya	Filtrasi		Serum, Vaksin dan antibiotik

(Mohapatra, 2017)



Gambar 8.1 Peningkatan tingkat resistensi mikroorganisme terhadap sterilisasi dan berbagai tingkat desinfektan
(Mohapatra, 2017)

Beberapa Teknik sterilisasi yang dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Teknik Fisik

a. Panas.

Panas umumnya lebih sering digunakan sebagai agen sterilisasi; panas tidak selektif terhadap semua mikroorganisme termasuk spora dan lainnya. Tindakan panas yang mematikan disebabkan oleh oksidasi-pembakaran atau koagulasi-denaturasi protein mikroba

dan asam nukleat. Efek panas pada lipid membran sel juga dapat terjadi.

1) Sterilisasi Basah

Panas lembap lebih mematikan daripada panas kering; panas lembap membutuhkan suhu kerja yang rendah dan periode pemaparan yang lebih singkat. Panas lembap mendenaturasi dan menggumpalkan protein mikroba (seperti enzim). Denaturasi protein seluler terjadi pada suhu yang lebih rendah dan waktu pemaparan yang lebih singkat. Ikatan protein yang menstabilkan (misalnya, C=O... H-N) lebih mudah dipatahkan ketika molekul air tersedia untuk ikatan hidrogen. Sterilisasi dengan panas lembap melibatkan transfer panas yang efisien karena uap yang mengembun pada benda yang lebih dingin menghasilkan panas (laten) dalam jumlah yang cukup besar.

a) Suhu di bawah 100°C

Perebusan dan pasteurisasi, metode ini tidak menghilangkan spora. Perebusan (100°C) membunuh sebagian besar mikroorganisme dalam waktu kurang lebih 10 menit. Pasteurisasi, yang sebagian besar digunakan dalam industri makanan, mengurangi patogen yang ditularkan melalui makanan dan organisme yang bertanggung jawab atas pembusukan makanan. Biasanya dilakukan pada suhu 72°C (161° F) selama 15 detik. Keuntungan utama dari pasteurisasi adalah perlakuan pada suhu ini mengurangi pembusukan makanan tanpa mempengaruhi rasanya (Mahon & Lehman, 2019).

b) Suhu sekitar 100°C

Tyndallisasi adalah salah satu metode ini di mana pengukusan objek dilakukan selama 30 menit pada masing-masing 3 hari berturut-turut. Prinsipnya adalah bahwa spora yang selamat dari

proses pemanasan akan berkecambah sebelum paparan termal berikutnya dan akan kemudian dibunuh. Tindalisasi memerlukan waktu yang lama, dan hal ini digunakan untuk bahan yang mengandung senyawa kimia termolabil yang dapat terdekomposisi pada suhu yang lebih tinggi.

c) Suhu di atas 100°C

Uap panas jenuh kering bertindak sebagai agen yang sangat baik untuk sterilisasi karena memiliki suhu tinggi dan panas, kemampuan untuk membentuk air kondensasi dan pengurangan volume seketika yang terjadi selama kondensasi. Autoclaf digunakan untuk mensterilkan media padat dan cair, larutan, kultur yang dibuang, peralatan gelas yang terkontaminasi, tabung karet yang tahan panas, kapas, dan lain-lain. Autoklaf adalah panci bertekanan ganda yang besar. Ketika autoklaf ditutup dan panas dinyalakan, air akan memanaskan dan tekanan akan meningkat di dalam autoklaf yang tertutup rapat (gambar 8.2). Ketika tekanan meningkat di atas tingkat atmosfer normal, titik didih air akan meningkat. Sebagai contoh, pada 15 pon per inci persegi (psi) di atas tekanan atmosfer normal di permukaan laut, air mendidih pada suhu 121°C, bukan 100°C seperti yang terjadi pada tekanan atmosfer di permukaan laut.



Gambar 8.2 Autoclaf

Sterilisasi yang sesuai dalam autoklaf dilakukan dengan mempertahankan suhu 121°C selama 15-20 menit pada tekanan 15 psi (1,02 atm). Beberapa media, seperti kaldu fermentasi tertentu, gelatin nutrisi, dan susu lakmus, akan rusak pada suhu 121°C. Media-media tersebut harus diautoklaf pada suhu dan tekanan yang lebih rendah (seperti pada suhu 115°C selama 10 menit).

2) Sterilisasi kering

Panas kering umumnya digunakan dalam tiga cara:

a) Udara panas/kering

Sterilisasi panas kering biasanya dilakukan dalam oven di mana sejumlah kombinasi waktu dan suhu dapat digunakan. Sangat penting bahwa udara panas harus bersirkulasi di antara benda-benda yang sedang disterilkan dan oleh karena itu, benda-benda tersebut harus dikemas secara longgar dan diberikan ruang udara yang memadai untuk memastikan perpindahan panas yang optimal (gambar 8.3).



Gambar 8.3 Oven

Teknik ini mensterilkan peralatan gelas yang bersih (misalnya, cawan petri, pipet, labu, dan tabung reaksi) karena tidak dapat menyebabkan pengembunan uap air pada peralatan gelas.

Sterilisasi kering dilakukan dalam oven udara kering pada suhu 180°C selama 2 jam.

b) Red Heat

Jarum inokulasi, loop, dan ujung forsep disterilkan dengan menahannya dalam nyala api pembakar Bunsen hingga menjadi panas dan berwarna kemerahan.

c) Flaming

Paparan langsung selama beberapa detik melalui nyala api dapat digunakan untuk pisau bedah dan mulut peralatan gelas, tabung reaksi, dan lainnya didesinfeksi sebelum dan sesudah digunakan. Instrumen kecil, penyebar kaca, slide mikroskop, kaca penutup, forsep, dan lainnya didesinfeksi dengan mencelupkannya ke dalam alkohol dan kemudian membakar permukaan instrumen.

d) Insinerasi

Metode yang efisien untuk sterilisasi dan pembuangan bahan yang terkontaminasi pada suhu tinggi.

b. Filtrasi

Cairan dan gas dapat disterilkan dengan melewatkannya melalui filter. Metode ini berguna untuk mensterilkan cairan, enzim, dan larutan yang labil terhadap panas. Metode ini didasarkan pada proses mekanis untuk menghilangkan mikroorganisme dari larutan dengan melewatkannya melalui filter (ukuran pori $\leq 0,2$ atau $0,4 \mu\text{m}$) dan sel mikroba dipertahankan pada filter. Filter kapas-wol juga dapat digunakan untuk desinfeksi udara dan gas. Jenis jaringan yang lama (Berkefeld, Chamberlain, Seitz) saat ini telah diganti dengan penyaring (filter) membran yang terbuat dari selulosa berpori. Penyaring (filter) ini mengabsorpsi hanya sedikit cairan yang difiltrasi sehingga berguna

untuk sterilisasi. Ukuran penyaring (filter) yang digunakan untuk sterilisasi adalah 0,22 μm karena ukuran ini lebih kecil dari bakteri.

Filtrasi larutan zat cair melalui pori-pori kecil membran filter mengikat mikroorganisme yang terdapat dalam larutan dan membuatnya steril. Proses ini dilakukan dengan menggunakan membran selulosa asetat atau selulosa nitrat bersama dengan vakum, sedangkan filter partikel udara berkecepatan tinggi (HEPA) digunakan untuk filtrasi udara. Filtrasi merupakan metode pilihan untuk mensterilkan gas dan bahan yang sensitif terhadap panas, seperti larutan antibiotik, bahan kimia beracun, radioisotop, vaksin, dan karbohidrat (Tankeswar, 2025)

c. Radiasi

Radiasi sangat penting terutama untuk bahan yang tidak bisa disterilkan dengan panas atau bahan kimia.

- 1) Radiasi Ionisasi, meliputi sinar-X, sinar gamma, dan sinar beta. Sinar-sinar ini dapat menyebabkan kerusakan DNA untai tunggal dan terkadang untai ganda. Sebaliknya, sinar ultraviolet tidak memiliki energi yang cukup untuk mengeluarkan elektron yang dapat menyebabkan perubahan kimiawi sehingga bukan merupakan radiasi pengion. Spora lebih tahan terhadap radiasi pengion daripada bakteri yang tidak berspora. Radiasi pengion digunakan untuk sterilisasi barang medis sekali pakai sekali pakai. Radiasi ionisasi menghasilkan ion seperti elektron, radikal hidroksil, radikal hidrida, dan spesies molekul reaktif lainnya dari molekul yang bertabrakan dengan partikel radiasi. Setiap molekul reaktif ini mampu mengubah dan menyebabkan kerusakan pada makromolekul seperti DNA, lipid, dan protein. Ionisasi dan degradasi selanjutnya dari biomolekul ini menyebabkan kematian sel yang terpapar radiasi.

- 2) Radiasi non-ionisasi yaitu sinar UV dengan panjang gelombang yang bervariasi antara 210-328 nm dan panjang gelombang 240-280 nm terbukti paling efisien dalam mensterilkan. Dengan sinar UV, kuantum energi yang dibebaskan lebih sedikit dan sinar ini memiliki daya penetrasi yang lebih rendah yang membuat sinar ini kurang efektif dibandingkan jenis radiasi lainnya. Spora bakteri lebih tahan terhadap sinar UV daripada sel vegetatif. Paparan sinar UV menghasilkan pembentukan dimer purin dan pirimidin di antara molekul yang berdekatan pada untai DNA yang sama yang mengakibatkan lesi non-kode pada DNA dan kematian bakteri.

Sinar UV dan sinar gamma adalah metode umum yang masing-masing punya kelebihan dan keterbatasan. Penggunaan metode ini harus dilakukan dengan prosedur keamanan yang ketat, terutama untuk radiasi ionisasi.

1) Radiasi Sinar Ultraviolet

Penyinaran ini dilakukan digunakan untuk mengendalikan infeksi yang ditularkan melalui udara pada ruangan tertutup seperti ruangan kultur jaringan. Sinar ultra violet (UV) merusak DNA dengan cara membantu struktur siklodimer sehingga proses translasi protein terganggu. Efektivitas sinar UV sebagai zat yang mematikan berhubungan erat dengan panjang gelombangnya. Panjang gelombang yang paling efektif untuk membunuh bakteri adalah 240-280 nm. Panjang gelombang 260 nm merupakan panjang gelombang yang maksimum diabsorpsi oleh DNA bakteri. Satuan energi sinar UV dinyatakan dengan mikrowatt/luas paparan/waktu. Lampu UV 15watt mampu memancarkan sinar UV sebesar 38 mikrowatt/cm²/detik pada jarak 1 (satu) meter. Dosis letal untuk bakteri berkisar antara 1800-6500 mikrowatt/cm². Spora bakteri membutuhkan dosis 10

kali lebih besar. Sinar UV tidak dapat menembus benda padat dan kurang mampu menembus cairan. Efek samping: merusak retina mata dan sel-sel yang bermitosis sehingga tidak diperbolehkan bekerja dibawah sinar UV. Selain itu sinar UV juga bersifat mutagenik

2) Radiasi Sinar Gamma

Radiasi ini digunakan untuk sterilisasi alat rumah sakit dalam jumlah besar. Sumber radiasi yang dipakai adalah Co^{60} dan Cs^{137} dengan dosis radiasi bervariasi antara 2,5-4,5 Mrad. Efisiensi sterilisasi tergantung pada jenis bahan, suhu, konsentrasi dan resistensi mikroorganisme terhadap radioaktif (Cara Penyelenggaraan Laboratorium Klinik Yang Baik, 2013)

Radiasi digunakan untuk sterilisasi dan desinfeksi dalam industri peralatan medis dan pangan. FDA telah menyetujui penggunaan radiasi untuk sterilisasi peralatan bedah, peralatan laboratorium sekali pakai, obat-obatan, dan bahkan cangkok jaringan. WHO telah menyetujui penggunaan radiasi untuk mendesinfeksi makanan yang rentan terhadap kontaminasi mikroba, seperti sayuran segar, produk daging, ayam, dan rempah-rempah (Tankeswar, 2025)

2. Teknik Kimia

Banyak bahan kimia yang digunakan sebagai disinfektan. Efek mematikan pada mikroorganisme disebabkan oleh beberapa mekanisme termasuk denaturasi protein dan enzim; dan penghancuran DNA, dinding sel, dan membran sitoplasma. Beberapa bahan kimia dapat digunakan untuk mendisinfeksi area kerja dan peralatan di laboratorium. Tiga bahan kimia yang dapat direkomendasikan sebagai agen sterilisasi adalah etilen oksida, formaldehida, dan glutaraldehida. Ketiga bahan kimia ini membunuh semua mikroorganisme, termasuk endospora bakteri dan virus. Jadi, sterilisasi ini disebut

“sterilisasi dingin”. Agen-agen ini harus digunakan dalam konsentrasi yang efektif dan dalam kondisi yang sesuai (Bhatia & Ichhpujani, 2008).

C. Desinfeksi

Desinfeksi adalah proses untuk membunuh atau menonaktifkan mikroorganisme (seperti bakteri, virus, dan jamur) pada permukaan benda mati. Tujuannya adalah untuk mencegah infeksi dan penyebaran penyakit. Berbagai agen kimia digunakan untuk mendisinfeksi barang atau peralatan di lingkungan perawatan Kesehatan (tabel 8.2)

- 1. Harus memiliki aktivitas bakterisida yang tinggi
- 2. Dapat membunuh berbagai mikroorganisme, termasuk spora, dengan cepat
- 3. Stabil secara kimia
- 4. Efektif dalam kehadiran senyawa organik
- 5. Kompatibel dengan permukaan yang didesinfeksi
- 6. Mampu menembus celah-celah (diinginkan)
- 7. Harus murah dan estetik (WHO, 2016)

Tabel 8.2 Berbagai Metode Desinfeksi dengan Contoh

Metode Desinfektan	Contoh	Target	Aplikasi
High-Level Disinfectant			
Panas	Pasteurisasi (50 menit)	Semua bentuk vegetatif mikroorganisme	Alat perawatan pasien semi-kritis yang tahan panas (peralatan terapi pernapasan)
Bahan Kimia	Sterilan kimia	Bakteri gram-positif, bakteri gram-negatif, mikobakteria, virus berenvelop lipid, virus besar tanpa envelop, spora, kista, trofozoit, koksidia	Peralatan perawatan pasien semi-kritis yang sensitif terhadap panas (misalnya, endoskop GI, bronkoskop)
Intermediate-Level Disinfectant			
Bahan kimia	Terdaftar di EPA dengan aktivitas tuberkulosis (misalnya, produk berbasis klorin, fenolik)	Bakteri gram-positif, bakteri gram-negatif, virus berenvelope dan non-envelope, mikobakteria	Peralatan non-kritis yang terkontaminasi Permukaan yang terkontaminasi darah Alat yang terkontaminasi cairan tubuh/feses/sputum/Mikobakteria
Low-Level Disinfectant			
Bahan kimia	Terdaftar di EPA tetapi tanpa aktivitas tuberkulosis (misalnya, produk berbasis klorin, fenolik, senyawa amonium kuaterner, alkohol 70 – 90%)	Bentuk vegetatif bakteri, virus lipofilik, dan beberapa jamur	Peralatan perawatan pasien non-kritis

(Mohapatra, 2017)

Aktivitas bakterisida desinfektan kimia merupakan kemampuannya untuk membunuh bakteri, tetapi efektivitasnya bervariasi tergantung pada jenis desinfektan dan mikroorganisme yang ditargetkan. Desinfektan bekerja dengan

merusak struktur esensial mikroorganisme, seperti membran sel, protein, dan asam nukleat, melalui berbagai mekanisme. Desinfektan kimia membunuh mikroorganisme dengan beberapa cara denaturasi protein, perusakan membran sel, oksidasi komponen sel dan alkilasi (gambar 8.4).

MICRO-ORGANISMS		EXAMPLES	LEVEL OF DISINFECTION
PRIONS		Agents for Creutzfeld-Jakob disease	PRION REPROCESSING
BACTERIAL SPORES		Bacillus subtilis, Clostridium sporogenes, Clostridium difficile, etc.	STERILIZATION
COCCIDIA		Cryptosporidium	
MYCOBACTERIA		Mycobacterium tuberculosis	HIGH LEVEL DISINFECTION
NONLIPID OR SMALL VIRUSES		Poliovirus, Coxsackie virus, Rhinovirus, etc.	INTERMEDIATE LEVEL DISINFECTION
FUNGI		Trichophyton spp., Cryptococcus spp., Candida spp., etc.	
VEGETATIVE BACTERIA		Pseudomonas aeruginosa, E. coli, Staph. aureus, Salmonella spp., Neisseria meningitidis, Enterococci, etc.	LOW LEVEL DISINFECTION
LIPID OR MEDIUM-SIZED VIRUSES		Herpes simplex, Cytomegalovirus, Respiratory syncytial, Hepatitis B, Human Immunodeficiency Virus (HIV), etc.	

Gambar 8.4 Urutan menurun resistensi terhadap aktivitas bakterisida desinfektan kimia terhadap berbagai mikroorganisme (WHO, 2016)

Beberapa bahan kimia yang digunakan sebagai desinfektan, sebagai berikut:

1. Etilen oksida

Etilen oksida adalah gas kimia yang tidak berwarna, mudah terbakar, dan berbau agak manis. Senyawa ini sering digunakan sebagai desinfektan dan agen sterilisasi, terutama untuk peralatan medis dan bahan yang tidak tahan panas. Etilen oksida mematikan mikroorganisme seperti bakteri, virus, dan spora dengan cara mengalkilasi protein, DNA, dan RNA esensial mereka. Proses ini pada dasarnya merusak struktur genetik mikroorganisme, menyebabkan tidak dapat bereproduksi atau berfungsi. Penggunaan etilen oksida umumnya dilakukan di ruang khusus dengan kondisi yang terkontrol ketat, seperti suhu (37–63°C), kelembaban (30–85%), dan konsentrasi gas etilen oksida. Karena sifatnya yang mudah meledak dan beracun, proses ini harus dilakukan oleh personel terlatih dan membutuhkan ventilasi yang memadai setelahnya untuk menghilangkan residu gas (Keputusan Kepala Badan Pengawas Obat Dan Makanan Nomor 229 Tahun 2022 Tentang Pedoman Mitigasi Risiko Kesehatan Senyawa Etilen Oksida (Ethylene Oxide), 2,6-Diisopropilnaftalena (2,6-Diisoprophylanthralene), Dan 9,10-Antrakinaon (9,10-Anthraquinone), 2022)

2. Paraformaldehid

Paraformaldehid adalah polimer dari formaldehida, yang merupakan bubuk kristal putih dengan bau formaldehida. Senyawa ini berfungsi sebagai desinfektan fumigasi karena ketika dipanaskan, ia akan melepaskan gas formaldehida. Gas ini sangat efektif untuk mensterilkan permukaan, ruangan, dan peralatan yang tidak dapat disterilkan dengan metode panas atau cair. Paraformaldehid mematikan mikroorganisme dengan cara yang sama seperti formaldehida, yaitu melalui proses alkilasi. Gas formaldehida bereaksi dengan protein dan asam nukleat (DNA/RNA) mikroorganisme, merusak struktur dan fungsinya yang vital. Ini mencegah mikroorganisme untuk

berkembang biak dan bertahan hidup. Gas formaldehida dari paraformaldehid sangat ampuh untuk fumigasi (pengasapan) ruangan atau alat-alat di laboratorium, rumah sakit, atau industri. Proses ini efektif membunuh berbagai jenis mikroorganisme, termasuk bakteri, virus, jamur, dan spora

3. Ikatan fenol

Senyawa fenolik, kelompok senyawa yang luas, termasuk di antara desinfektan pertama yang digunakan. Senyawa ini aktif terhadap bakteri vegetatif dan virus yang mengandung lipid, dan ketika diformulasikan dengan benar, juga aktif terhadap mikobakteria. Senyawa ini tidak aktif terhadap spora, dan aktivitasnya terhadap virus non-lipid bervariasi. Banyak produk fenolik digunakan untuk desinfeksi permukaan lingkungan, dan beberapa di antaranya (misalnya triclosan dan chloroxylonol) termasuk di antara antiseptik yang paling sering digunakan.

Triclosan umum ditemukan dalam produk pembersih tangan. Senyawa ini aktif terutama terhadap bakteri vegetatif dan aman untuk kulit serta membran mukosa. Namun, dalam studi laboratorium, bakteri yang menjadi resisten terhadap konsentrasi rendah triclosan juga menunjukkan resistensi terhadap jenis antibiotik tertentu. Signifikansi temuan ini di lapangan masih belum diketahui. Beberapa senyawa fenolik sensitif terhadap dan dapat dinonaktifkan oleh kekerasan air, sehingga harus dilarutkan dengan air suling atau air deionisasi. Senyawa fenolik tidak direkomendasikan untuk digunakan pada permukaan yang bersentuhan dengan makanan dan di area dengan anak-anak kecil (WHO, 2004).

4. Klorin

Klorin, sebagai oksidator yang bereaksi cepat, merupakan bahan kimia desinfektan yang luas dan spektrumnya luas. Hipoklorit, yang paling umum digunakan di antara desinfektan klorin, tersedia dalam bentuk cair (misalnya, natrium hipoklorit) atau padat (misalnya, kalsium

hipoklorit). Produk klorin yang paling umum dengan konsentrasi 5,25%–6,15% natrium hipoklorit, yang biasanya disebut pemutih rumah tangga. Desinfektan ini memiliki spektrum antimikroba yang luas, tidak meninggalkan residu beracun, tidak terpengaruh oleh kekerasan air, murah, dan bekerja cepat, dapat menghilangkan organisme kering atau terikat dan biofilm dari permukaan, serta memiliki insiden toksisitas serius yang rendah. Natrium hipoklorit pada konsentrasi yang digunakan dalam pemutih rumah tangga (5,25–6,15%) dapat menyebabkan iritasi mata atau luka bakar pada orofaring, esofagus, dan lambung. Kekurangan lain dari hipoklorit meliputi korosif terhadap logam pada konsentrasi tinggi (>500 ppm), inaktivasi oleh materi organik, perubahan warna atau “pemutihan” pada kain, pelepasan gas klorin beracun saat dicampur dengan amonia atau asam (misalnya, pembersih rumah tangga), dan stabilitas relatif

Desinfektan laboratorium yang umum digunakan harus memiliki konsentrasi 1 g/l klorin aktif. Larutan yang lebih kuat, dengan konsentrasi 5 g/l klorin aktif, direkomendasikan untuk menangani tumpahan bahan berbahaya biologis dan dalam kondisi adanya jumlah besar materi organik. Larutan natrium hipoklorit, yang digunakan sebagai pemutih rumah tangga, mengandung 50 g/l klorin aktif dan oleh karena itu harus dilarutkan dengan perbandingan 1:50 atau 1:10 untuk mendapatkan konsentrasi akhir 1 g/l dan 5 g/l, masing-masing.

Bubuk atau tablet kalsium hipoklorit ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) umumnya mengandung sekitar 70% klorin aktif. Larutan yang disiapkan dengan bubuk atau tablet, yang mengandung 1,4 g/l dan 7,0 g/l, akan mengandung 1,0 g/l dan 5 g/l klorin aktif, masing-masing. Pemutih tidak direkomendasikan sebagai antiseptik, tetapi dapat digunakan sebagai desinfektan serbaguna dan untuk merendam bahan-bahan bebas logam yang terkontaminasi. Dalam keadaan darurat, pemutih juga dapat digunakan untuk mendisinfeksi air minum dengan konsentrasi akhir 1–2 mg/l klorin aktif.

Mekanisme Kerja klorin bebas menghancurkan mikroorganisme dengan inaktivasi oleh klorin dapat disebabkan oleh berbagai faktor: oksidasi enzim sulfhidril dan asam amino; klorinasi cincin asam amino; kehilangan isi seluler; penurunan penyerapan nutrisi; penghambatan sintesis protein; penurunan penyerapan oksigen; oksidasi komponen pernapasan; penurunan produksi adenosin trifosfat; kerusakan DNA; dan penurunan sintesis DNA. Mekanisme mikrobisida klorin melibatkan kombinasi faktor-faktor ini atau efek klorin pada situs kritis (Rutala & Weber, 2019)

5. Yodium

Mekanisme kerja disinfektan ini serupa dengan klorin, meskipun mungkin sedikit kurang terhambat oleh bahan organik. Yodium dapat meninggalkan noda pada kain dan permukaan lingkungan, sehingga umumnya tidak cocok digunakan sebagai disinfektan. Di sisi lain, iodophor dan tinctur yodium merupakan antiseptik yang baik. Polyvidone-iodine adalah pembersih bedah yang andal dan aman serta antiseptik kulit praoperasi. Antiseptik berbasis yodium umumnya tidak cocok untuk digunakan pada alat medis/kedokteran gigi. Yodium tidak boleh digunakan pada aluminium atau tembaga. Yodium dapat bersifat toksik. Produk berbasis yodium organik harus disimpan pada suhu 4–10 °C untuk mencegah pertumbuhan bakteri berbahaya di dalamnya (WHO, 2004)

6. Etil/ isoprofil

“Alkohol” merujuk pada dua senyawa kimia yang larut dalam air—etil alkohol (C_2H_5OH) dan isopropil alkohol ($(CH_3)_2CHOH$) yang umumnya memiliki karakteristik bakterisida. Keduanya efektif melawan bakteri vegetatif, tuberkulosisida, jamur, dan virus yang mengandung lipid, tetapi tidak efektif melawan spora. Efektivitasnya terhadap virus non-lipid bervariasi. Untuk efektivitas tertinggi, alkohol ini sebaiknya digunakan pada konsentrasi sekitar 70% (v/v) dalam air: konsentrasi yang lebih tinggi atau lebih

rendah mungkin tidak seefektif dalam membunuh kuman. Keuntungan utama larutan alkohol dalam air adalah tidak meninggalkan residu pada benda yang diolah.

Campuran dengan agen lain lebih efektif daripada alkohol saja, misalnya 70% (v/v) alkohol dengan 100 g/l formaldehida, dan alkohol yang mengandung 2 g/l klorin aktif. Larutan etanol 70% (v/v) dalam air dapat digunakan pada kulit, permukaan kerja meja laboratorium, dan lemari biosafety, serta untuk merendam potongan kecil alat bedah. Pembersih tangan berbasis alkohol direkomendasikan untuk mendekontaminasi tangan yang sedikit kotor dalam situasi di mana mencuci tangan dengan benar tidak praktis atau tidak mungkin. Namun, harus diingat bahwa etanol tidak efektif melawan spora dan mungkin tidak membunuh semua jenis virus non-lipid.

Mekanisme alkohol dengan melakukan denaturasi protein. Etil alkohol murni, yang bersifat dehidrasi, kurang bakterisidal dibandingkan campuran alkohol dan air karena protein denaturasi lebih cepat dalam kehadiran air. Denaturasi protein oleh alkohol menghancurkan dehidrogenase *Escherichia coli* dan bahwa etil alkohol memperpanjang fase lag *Enterobacter aerogenes*. Aktivitas bakteriostatik diyakini disebabkan oleh penghambatan produksi metabolit yang esensial untuk pembelahan sel yang cepat.

Etil alkohol (70%) merupakan konsentrasi paling efektif untuk membunuh fase jaringan *Cryptococcus neoformans*, *Blastomyces dermatitidis*, *Coccidioides immitis*, dan *Histoplasma capsulatum*, serta fase kultur ketiga organisme terakhir yang diaplikasikan secara aerosol pada berbagai permukaan. Fase kultur lebih tahan terhadap aksi etil alkohol dan memerlukan sekitar 20 menit untuk mendisinfeksi permukaan yang terkontaminasi, dibandingkan dengan kurang dari 1 menit untuk fase jaringan. Isopropil alkohol (20%) efektif dalam membunuh kista *Acanthamoeba*

culbertsoni, demikian pula klorheksidin, hidrogen peroksida, dan timerosal

7. Formaldehid

Formaldehida digunakan sebagai disinfektan dan sterilisasi dalam bentuk cair dan gas. Formaldehida dijual dan digunakan terutama sebagai larutan berbasis air yang disebut formalin, yang mengandung 37% formaldehida berdasarkan berat. Larutan ini merupakan bakterisida, tuberkulosisida, fungisida, virisida, dan sporisida. Paparan formaldehida dibatasi dengan konsentrasi paparan rata-rata tertimbang waktu selama 8 jam sebesar 0,75 ppm dan 2 ppm selama periode 15 menit. Tertelannya formaldehida dapat berakibat fatal, dan paparan jangka panjang terhadap konsentrasi rendah di udara atau pada kulit dapat menyebabkan masalah pernapasan serupa asma dan iritasi kulit, seperti dermatitis dan gatal-gatal. Oleh karena itu, petugas harus membatasi kontak langsung dengan formaldehida, dan pertimbangan ini membatasi dalam proses sterilisasi dan desinfeksi. Formaldehida menonaktifkan mikroorganisme dengan cara mengalkilasi kelompok amino dan sulfhidril pada protein serta atom nitrogen pada cincin basa purin.

Konsentrasi yang bervariasi dari larutan formaldehida dalam air dapat menghancurkan berbagai jenis mikroorganisme. Inaktivasi poliovirus dalam 10 menit memerlukan konsentrasi formalin 8%, tetapi semua virus lain yang diuji dapat dinonaktifkan dengan formalin 2%. Formaldehida 4% merupakan agen tuberkulosisidal, menonaktifkan 10^4 M. tuberculosis dalam 2 menit, dan formaldehida 2,5% menonaktifkan sekitar 10^7 Salmonella Typhi dalam 10 menit dalam kehadiran materi organik. Aksi sporisidal formaldehida lebih lambat dibandingkan glutaraldehida dalam uji perbandingan dengan larutan formaldehida 4% dan glutaraldehida 2% terhadap spora B. anthracis. Larutan formaldehida memerlukan 2 jam kontak untuk mencapai faktor inaktivasi 10^4 , sedangkan

glutaraldehida hanya memerlukan 15 menit (Rutala & Weber, 2019)

8. Glutaraldehid

Sama seperti formaldehida, glutaraldehida ($\text{OHC}(\text{CH}_2)_3\text{CHO}$) juga efektif melawan bakteri vegetatif, spora, jamur, dan virus yang mengandung lipid maupun non-lipid. Senyawa ini tidak korosif dan bekerja lebih cepat daripada formaldehida. Namun, dibutuhkan beberapa jam untuk membunuh spora bakteri. Mekanisme Aksi. Aktivitas biocidal glutaraldehida berasal dari alkilasi kelompok sulfhidril, hidroksil, karboksil, dan amino pada mikroorganisme, yang mengganggu sintesis RNA, DNA, dan protein (tabel 8.3)

Glutaraldehida umumnya disediakan dalam bentuk larutan dengan konsentrasi sekitar 20 g/l (2%), dan beberapa produk mungkin perlu “diaktifkan” (dijadikan alkali) sebelum digunakan dengan menambahkan senyawa bikarbonat yang disertakan dalam produk. Larutan yang diaktifkan dapat digunakan kembali selama 1–4 minggu tergantung pada formulasi, jenis, dan frekuensi penggunaannya. Larutan glutaraldehida harus dibuang jika menjadi keruh. Glutaraldehida bersifat toksik dan iritan bagi kulit dan membran mukosa, sehingga kontak dengannya harus dihindari. Penggunaannya harus dilakukan di area yang memiliki ventilasi yang baik.

9. Hidrogen Peroksida

Hidrogen peroksida memiliki sifat-sifat, efektivitas bakterisida, dan potensi penggunaan hidrogen peroksida yang stabil dalam lingkungan perawatan kesehatan. aktivitas bakterisida yang baik pada hidrogen peroksida dan membuktikan sifat-sifat bakterisida, virisida, sporisida, dan fungisida-nya. Hidrogen Peroksida sebagai sterilisasi kimia cair dan desinfektan tingkat tinggi yang mengandung hidrogen peroksida beserta kondisi kontak yang disetujui.

Mekanisme Kerja. Hidrogen peroksida bekerja dengan menghasilkan radikal bebas hidroksil yang merusak, yang dapat menyerang lipid membran, DNA, dan komponen sel esensial lainnya. Katalase, yang diproduksi oleh organisme aerobik dan anaerob fakultatif yang memiliki sistem sitokrom, dapat melindungi sel dari hidrogen peroksida yang dihasilkan secara metabolik dengan mendegradasi hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen. Pertahanan ini terlewati oleh konsentrasi yang digunakan untuk desinfeksi.

Tabel 8.3 Jenis desinfektan dan cara penggunaannya

Parameter/ Penggunaan	Etilen oksida	Paraformal dehid	Ikatan amonium	Ikatan fenol	Ikatan khlor	Ikatan iodofor	Etil/ isoprofil	formal dehid	Glutaral dehid
Konsentrasi zat aktif	400 - 800 mg/L	1U mg/ cm ²	0,1 - 2%	0,2 - 3%	0,01 - 5%	0,47%	70 - 85%	4 - 8%	2%
Suhu (°C)	35 - 60	>23	0	0	0	0	0	0	0
Kelembaban relatif (%)	30 - 60	>60	0	0	0	0	0	0	0
Lama kontak (menit)	10 - 40'	60 - 180'	10 - 30'	10 - 30'	10 - 30'	10 - 30'	10 - 30'	10 - 30'	10 - 600
Efektifitas bakteri vegetatif	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spora bakteri	+	+	0	0	+	0	0	±	+
Virus	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Virus hidrofilik	+	+	0	±	+	±	±	±	+
Basil	+	+	0	+	+	+	+	+	+
HIV	+	+	+	+	+	+	+	+	+
HBV	+	+	0	+	+	+	±	+	+
Penggunaan cairan terkontaminasi	0	0	0	0	+	0	0	±	0
Alat gelas	±	0	+	0	+	0	+	±	+
Alat gelas	±	0	0	0	0	0	0	±	+
Dekontaminasi	±	+	0	0	0	0	0	0	0

Keterangan: +: sangat efektif; +: kurang efektif dan 0: tidak efektif atau tidak dapat digunakan (Cara Penyelenggaraan Laboratorium Klinik Yang Baik, 2013)

DAFTAR PUSTAKA

- Bhatia, R., & Ichhpujani, R. L. (2008). *Essential Of Medical Microbiology* (4 (ed.)). Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd.
- Cara Penyelenggaraan Laboratorium Klinik Yang Baik, Pub. L. No. No. 43 Tahun 2013, 66 37 (2013).
- Erkmen, O. (2021). Laboratory Practice in Microbiology. In *Laboratory Practice in Microbiology*. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/microbiological-media#recommended-publications>
- Keputusan Kepala Badan Pengawas Obat Dan Makanan Nomor 229 Tahun 2022 Tentang Pedoman Mitigasi Risiko Kesehatan Senyawa Etilen Oksida (Ethylene Oxide), 2,6-Diisopropilnaftalena (2,6-Diisoprophyl naphthalene), Dan 9,10-Antrakinon (9,10-Anthraquinone), Pub. L. No. No 229 Tahun 2022, Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) 1 (2022).
- Mahon, C. R., & Lehman, D. C. (2019). Textbook of diagnostic microbiology. In *Elsevier* (6th ed.). Elsevier Saunders.
- Mohapatra, S. (2017). *Sterilization and Disinfection*. Essentials of Neuroanesthesia. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805299-0.00059-2>
- Rutala, W. A., & Weber, D. J. (2019). Disinfection and Sterilization in Health Care Facilities. In *CDC. Centers for Disease Control and Prevention* (CDC). <https://doi.org/10.1016/j.idc.2021.04.004>
- Tankeswar, A. (2025). *Sterilization and Disinfection Methods in Dentistry*. Microbe Online. www.dentalytec.com
- WHO. (2004). Laboratory Biosafety Manual. In *World Health Organization* (3rd ed.). World Health Organization.

WHO. (2016). Decontamination and reprocessing of medical devices for health-care facilities. In *World Health Organization*. World Health Organization.

BAB 9

PERAN MIKROORGANISME DALAM PROSES PENGOLAHAN AIR LIMBAH (AEROB DAN ANAEROB)

Dr. Ir. Iva Rustanti Eri W, MT

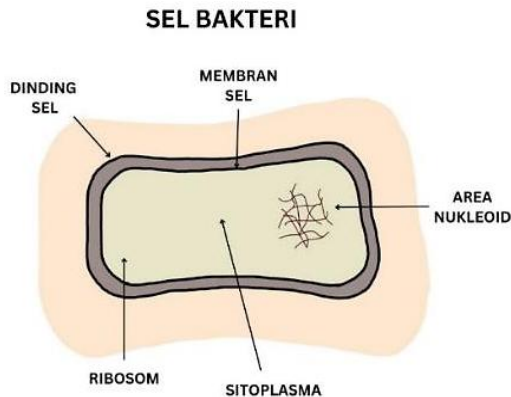
A. Mikroorganisme Hadir dalam Air dan Air Limbah

Mikrobiologi adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari tentang mikroorganisme. Dalam hal kualitas air, mikroorganisme memainkan peran penting, karena dominasi mereka yang besar di lingkungan tertentu, tindakan mereka dalam proses pemurnian air limbah dan hubungannya dengan penyakit yang ditularkan melalui air. Mikroorganisme hanya dapat diamati secara mikroskopis.

Secara umum, sebagian besar sel hidup sangat mirip. Sel-sel pada umumnya memiliki batas luar berupa membran sel. Membran ini bersifat fleksibel dan berfungsi sebagai pembatas selektif antara apa yang terdapat di dalam sel dan lingkungan luar. Membran ini bersifat semi-permeabel dan oleh karena itu berperan penting dalam menyeleksi zat-zat yang dapat keluar atau masuk ke dalam sel. Namun, bakteri, ganggang, jamur, dan tanaman memiliki lapisan eksternal lain yang disebut dinding sel. Dinding sel umumnya terdiri dari bahan kaku yang memberikan bentuk struktural pada sel, bahkan memberikan perlindungan terhadap benturan mekanis dan perubahan osmotik.

Setiap sel mengandung asam nukleat, bahan genetik yang penting untuk reproduksi. Asam ribonukleat (RNA) penting untuk sintesis protein dan ditemukan dalam ribosom yang ada dalam sitoplasma. Sel prokariotik, seperti bakteri, hanya

memiliki area nuklear, sedangkan sel eukariotik memiliki nukleus yang terbungkus membran. Nukleus (atau area inti) kaya akan asam deoksiribonukleat (DNA), yang mengandung informasi genetik yang diperlukan untuk reproduksi semua komponen sel. Sitoplasma sel prokariotik sering kali mengandung DNA dalam struktur kecil yang disebut plasmid.



Gambar 9.1 Skema sederhana sel bakteri

B. Sumber Energi dan Karbon untuk Sel Mikroba

Semua makhluk hidup membutuhkan (a) energi (b) karbon dan (c) nutrisi (nitrogen, fosfor, sulfur, kalium, kalsium, magnesium, dan lain-lain) untuk fungsi pertumbuhan, pergerakan, reproduksi, dan lain-lain. Berdasarkan sumber karbon, ada dua jenis organisme yang mendasar:

1. **Organisme autotrofik.** Sumber karbon: karbon dioksida (CO_2);
2. **Organisme heterotrofik.** Sumber karbon: bahan organik

Berdasarkan sumber energi, ada dua jenis organisme dasar:

1. **Organisme fototrofik.** Sumber energi: cahaya;
2. **Organisme kemotrofik.** Sumber energi: energi dari reaksi kimia.

Kombinasi antara keempat jenis ini ditunjukkan pada Tabel 9.1.

Tabel 9.1 Klasifikasi Umum Mikroorganisme Berdasarkan Sumber Energi dan Karbon

Klasifikasi	Sumber energi	Sumber karbon	Organisme representatif
Fotoautotrof	Ringan	CO ₂	Tanaman tingkat tinggi, alga, fotosintesis bakteri
Fotoheterotrof	Ringan	Bahan organik	Fotosintesis bakteri
Kemoautotrof	Bahan anorganik	CO ₂	Bakteri
Kemoheterotrof	Bahan organik	Bahan organik	Bakteri, fungi, protozoa, hewan

Sumber: von Sperling, (2008)

Pada sebagian besar proses pengolahan limbah (kecuali kolam fakultatif dan kolam pematangan), cahaya tidak dapat menembus secara signifikan ke dalam air limbah yang ada di dalam reaktor biologis, karena kekeruhan yang tinggi, sehingga keberadaan mikroorganisme yang membutuhkan cahaya sebagai sumber energi (fotoautotrof dan fotoheterotrof) sangat terbatas. Oleh karena itu, organisme yang sangat penting pada kondisi ini adalah kemoautotrof (mikroorganisme yang bertanggung jawab pada proses nitrifikasi) dan kemoheterotrof (bertanggung jawab atas sebagian besar reaksi yang terjadi dalam proses biologis). Untuk mempermudah, yang terakhir ini selanjutnya hanya akan dinamai heterotrof.

C. Metabolisme Mikroorganisme

Proses kimiawi yang secara bersamaan terjadi di dalam sel secara bersama-sama disebut metabolisme, dan dapat dibagi menjadi dua kategori (Liu *et al.*, 2010; Torresi *et al.*, 2019)

1. Disimilasi atau katabolisme: reaksi produksi energi, di mana terjadi penguraian substrat;
2. Asimilasi atau anabolisme: reaksi yang mengarah pada pembentukan materi seluler (pertumbuhan), menggunakan energi yang dilepaskan dalam disimilasi.

Dengan cara yang disederhanakan, organisme tumbuh dan mereproduksi diri mereka sendiri dengan menggunakan energi yang dilepaskan dalam disimilasi. Dalam disimilasi, energi yang tersimpan bentuk kimiawi dalam senyawa organik (substrat) dilepaskan dan diubah dalam asimilasi dalam bahan seluler. Pertumbuhan bersih adalah hasil dari keseimbangan antara anabolisme (positif) dan katabolisme (negatif).

Dalam kedua kategori tersebut, transformasi kimiawi terjadi dalam rangkaian reaksi antara yang beragam dan rumit, masing-masing dikatalisis oleh jenis enzim tertentu. Sebagian besar enzim terletak di dalam sel: ini disebut enzim intraseluler atau endoenzim. Namun, beberapa enzim dilepaskan di media eksternal dan disebut sebagai enzim ekstraseluler atau eksoenzim. Pentingnya enzim ini terkait dengan fakta bahwa mereka menyebabkan reaksi hidrolisis di luar sel, dalam medium cair, mengubah molekul substrat yang besar dan kompleks menjadi molekul yang lebih kecil dan lebih sederhana, yang kemudian dapat melewati membran sel agar tersedia untuk dikonsumsi oleh sel.

Tabel 9.2 Karakteristik utama katabolisme oksidatif dan fermentasi

Karakteristik	Katobolisme oksidatif (respirasi)	Katabolisme fermentatif (fermentasi)
Donor electron	Bahan organik	Bahan organik teroksidasi
Akseptor elektron	Eksternal: senyawa anorganik (oksigen, nitrat atau sulfat)	Internal: mengurangi bahan organik

Karakteristik		Katabolisme oksidatif (respirasi)		Katabolisme fermentatif (fermentasi)
Jumlah akhir dihasilkan dari bahan organik	produk yang dari	CO ₂		Setidaknya CO ₂ dan CH ₄
Bentuk dalam akhir	karbon produk	Oksidasi anorganik (CO ₂)	karbon	Oksidasi anorganik karbon (CO ₂) + pengurangan karbon organik (CH ₄)
Kondisi karbon produk akhir	oksidasi dalam	CO ₂		CO ₂ dan CH ₄

Sumber: Morris *et al.*, (2019)

Penguraian bahan organik dalam air limbah terjadi melalui proses disimilasi atau katabolisme. Dua jenis katabolisme yang menarik dalam pengolahan air limbah adalah katabolisme oksidatif (oksidasi bahan organik) dan katabolisme fermentatif (fermentasi bahan organik) (Sharma, Khursheed and Kazmi, 2014):

1. Katabolisme oksidatif: reaksi redoks yang melibatkan zat pengoksidasi dalam medium (oksigen, nitrat atau sulfat) mengoksidasi bahan organik.
2. Katabolisme fermentatif: tidak ada oksidan. Proses ini terjadi karena penataan ulang elektron dalam molekul yang difermentasi sedemikian rupa sedemikian rupa sehingga setidaknya dua produk terbentuk. Secara umum, ada kebutuhan berbagai urutan fermentasi agar produk menjadi stabil, yaitu, menjadi tidak lagi rentan terhadap fermentasi.

Karakteristik utama dari katabolisme oksidatif dan fermentatif disajikan pada Tabel 9.2.

D. Pembangkit Energi dalam Sel Mikroba

Pembangkitan energi dalam sel mikroba dapat dilakukan, tergantung pada mikroorganisme, melalui respirasi (katabolisme oksidatif) atau fermentasi (katabolisme fermentatif). Istilah respirasi tidak terbatas pada proses yang melibatkan konsumsi oksigen.

Secara umum, oksidasi menyiratkan hilangnya satu atau lebih elektron dari zat yang teroksidasi (dalam oksidasi, zat tersebut memberikan muatan negatif dalam bentuk elektron ketika berpindah ke keadaan oksidasi yang lebih tinggi). Zat yang teroksidasi dapat berupa bahan organik, serta senyawa anorganik tereduksi - karena itu, keduanya merupakan donor elektron. Elektron yang diambil dari molekul yang teroksidasi ditransfer melalui reaksi biokimia yang rumit dengan bantuan enzim ke senyawa anorganik lain (agen pengoksidasi), yang menerima denominasi generik dari akseptor elektron. Akibatnya, akseptor elektron memiliki keadaan oksidasi tereduksi. Akseptor elektron utama yang digunakan dalam respirasi tercantum dalam Tabel 9.3 dalam urutan penurunan pelepasan energi.

Tabel 9.3 Akseptor Elektron Tipikal Dalam Reaksi Oksidasi Dalam Air

Kondisi	Akseptor elektron	Bentuk akseptor setelah reaksi	Proses
Aerobik	Oksigen (O ₂)	H ₂ O	Metabolism aerobic
Anoksik	Nitrat (NO ₃ ⁻)	Gas nitrogen (N ₂)	Nitrat reduksi (denitrifikasi)
Anaerobik	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	Sulfit (H ₂ S)	Sulfat reduksi
	Karbondioksida (CO ₂)	Methane (CH ₄)	Metanogenesis

Sumber : Morris *et al.*, (2019)

Ketika berbagai akseptor elektron tersedia di dalam medium, mikroorganisme menggunakan akseptor yang menghasilkan jumlah energi tertinggi. Untuk alasan ini, oksigen terlarut digunakan terlebih dahulu dan, setelah habis, sistem berhenti menjadi aerobik. Jika ada nitrat yang tersedia dalam media cair (yang tidak selalu terjadi), organisme yang mampu menggunakan nitrat dalam respirasi mereka mulai melakukannya, mengubah nitrat menjadi gas nitrogen (denitrifikasi). Kondisi ini memiliki nama khusus, yaitu anoksik (tidak adanya oksigen terlarut tetapi ada nitrat). Ketika nitrat selesai, kondisi anaerobik yang ketat terjadi. Dalam kondisi ini, sulfat digunakan dan direduksi menjadi sulfida, dan karbon dioksida diubah menjadi metana. Meskipun ada zat dengan pelepasan energi yang lebih besar, zat lainnya tidak digunakan (Laureni *et al.*, 2016)

Tahap metanogenesis dapat terjadi dalam dua jalur. Yang pertama adalah proses oksidatif dari metanogenesis hidrogenotrofik (produksi metana dari hidrogen), di mana karbon dioksida bertindak sebagai akseptor elektron dan direduksi menjadi metana. Jalur ini kurang penting dalam hal konversi global, tetapi dapat dilakukan oleh hampir semua organisme metanogenik. Jalur kedua adalah metanogenesis asetotrofik (produksi metana dari asetat), di mana karbon organik dalam bentuk asetat (asam asetat) diubah menjadi metana. Jalur ini bertanggung jawab atas sebagian besar konversi, meskipun dilakukan oleh beberapa spesies bakteri (Gonzalez-Gil *et al.*, 2018). Organisme yang secara fungsional beradaptasi dengan berbagai kondisi respirasi. Yang utama adalah:

1. **Organisme aerobik yang ketat:** hanya menggunakan oksigen bebas dalam pernapasannya
2. **Organisme fakultatif:** menggunakan oksigen bebas (sebaiknya) atau nitrat sebagai electron akseptor.
3. **Organisme anaerobik ketat:** menggunakan sulfat atau karbon dioksida sebagai akseptor elektron dan tidak dapat memperoleh energi melalui respirasi

Pelepasan energi melalui reaksi aerobik lebih banyak dibanding melalui reaksi anaerobik, organisme aerobik mereproduksi diri mereka sendiri dan menstabilkan bahan organik lebih cepat daripada organisme anaerobik. Karena tingkat reproduksi organisme aerobik lebih besar, maka produksi lumpur juga lebih besar.

Reaksi utama untuk menghasilkan energi yang terjadi dalam kondisi aerobik, anoksik, dan anaerobik adalah:

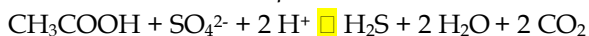
1. Kondisi Aerobik



2. Kondisi Anoksik, *nitrate reduction (denitrification)*



3. Kondisi Anaerobik, *sulphate reduction*



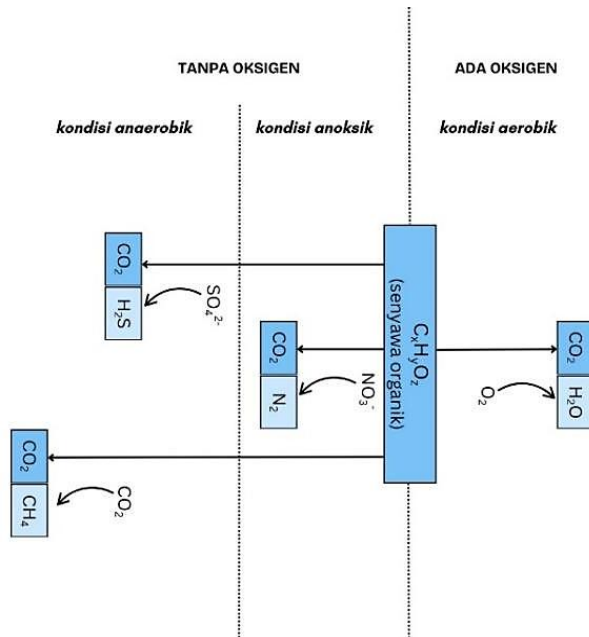
4. Kondisi Anaerobik, *CO₂ reduction (hydrogenotrophic, methanogenesis)*



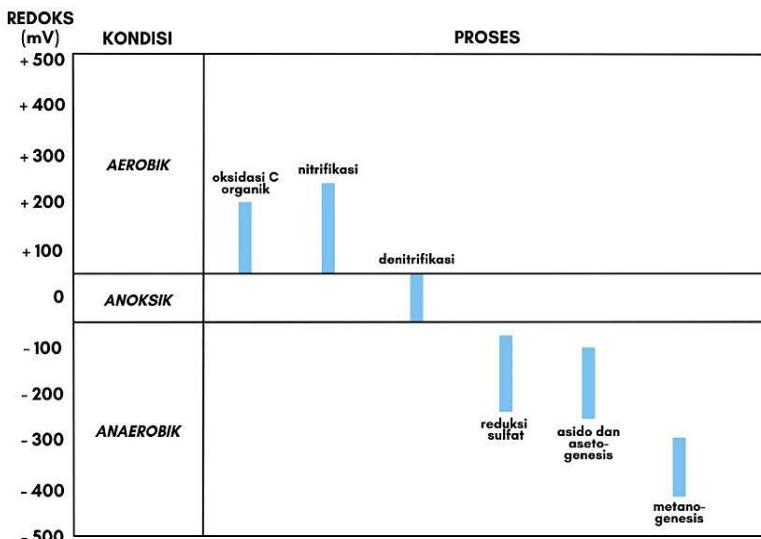
5. Kondisi Anaerobik, *acetotrophic methanogenesis*



Urutan transformasi yang terjadi dalam pengolahan limbah adalah fungsi dari akseptor elektron dan keadaan oksidasi senyawa, yang diukur dengan potensi oksidasi-reduksi (dinyatakan dalam milivolt). Energi maksimum yang tersedia dari oksidasi substrat adalah perbedaan antara kandungan energinya (yang diberikan oleh keadaan oksidasi) dan kandungan energi dari produk akhir reaksi (juga diberikan oleh keadaan oksidasi pada akhir reaksi) (von Sperling, 2008; Laureni *et al.*, 2016; Prahsantika, Harahap and Purwanto, 2020).



Gambar 9.2 Rute Utama Penguraian Bahan Organik Dengan Elektron Akseptor Yang Berbeda



Gambar 9.3 Proses Transformasi Sebagai Fungsi Dari Potensi Redoks

Hal-hal berikut yang menjadi perhatian:

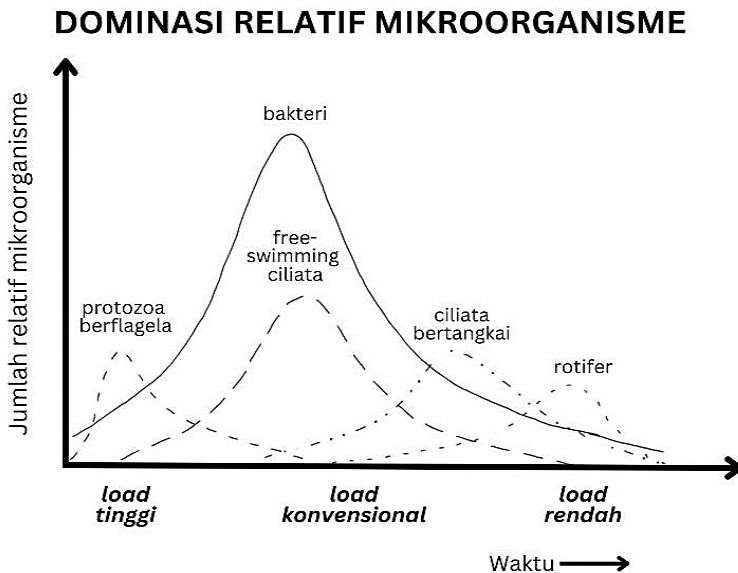
1. Reaksi oksidasi karbon dalam substrat yang sepenuhnya menjadi CO₂ (respirasi aerobik) melepaskan lebih banyak energi daripada reaksi yang menghasilkan etanol (fermentasi).
2. Semakin rendah tingkat oksidasi substrat, semakin besar pelepasan energi. Sebagai contoh, oksidasi asam asetat menjadi CO₂ melepaskan lebih sedikit energi daripada oksidasi etanol menjadi CO₂, karena karbon dalam asam asetat berada pada kondisi oksidasi yang lebih tinggi daripada etanol.
3. CO₂ tidak dapat bertindak sebagai sumber energi, karena CO₂ tidak dapat dioksidasi.

E. Ekologi Pengolahan Air Limbah Biologis

Peran yang dimainkan oleh mikroorganisme dalam pengolahan limbah tergantung pada proses yang digunakan. Pada kolam fakultatif, ganggang memiliki fungsi mendasar yang berkaitan dengan produksi oksigen melalui fotosintesis. Desain kolam dilakukan sedemikian rupa untuk mengoptimalkan keberadaan ganggang dalam media cair dan untuk mendapatkan keseimbangan yang memadai antara bakteri dan ganggang. Dalam sistem pengolahan anaerobik, kondisinya menguntungkan atau bahkan eksklusif untuk pengembangan mikroorganisme yang secara fungsional beradaptasi dengan ketiadaan oksigen. Dalam hal ini, organisme asidogenik dan metanogenik sangat penting.

Massa mikroba yang terlibat dalam proses aerobik terutama terdiri dari bakteri dan protozoa. Organisme lain, seperti jamur dan rotifera, juga dapat ditemukan, tetapi konsentrasinya lebih rendah.. Rotifera efisien dalam konsumsi bakteri yang tersuspensi dan partikel kecil bahan organik. Keberadaan mereka dalam limbah menunjukkan proses pemurnian biologis yang efisien (Joss *et al.*, 2006). Secara umum, dapat dikatakan bahwa keanekaragaman spesies dari berbagai mikroorganisme dalam biomassa rendah.

Gambar 9.4 menyajikan urutan dominasi relatif mikroorganisme utama yang terlibat dalam pengolahan limbah secara aerobik. Interaksi ekologis dalam komunitas mikroba menyebabkan peningkatan populasi suatu kelompok mikroorganisme diikuti oleh penurunan kelompok lain, mengingat karakteristik selektif dari medium dalam transformasi.



Gambar 9.4 Dominasi Relatif Mikroorganisme
(von Sperling, 2008)

Segera setelah masuknya limbah ke dalam reaktor biologis, bahan organik yang tersisa berada pada tingkat maksimum. Jumlah bakteri masih minim, dan amuba yang dapat ditemukan. Ini tidak efisien dalam persaingan untuk mendapatkan makanan yang tersedia, terutama pada awal proses biologi. Karena ketersediaan substrat yang besar, populasi bakteri tumbuh. Amuba kemudian digantikan oleh protozoa berflagel karena lebih efisien dalam persaingan untuk mendapatkan makanan yang tersedia. Protozoa berflagel ini merupakan karakteristik dari sistem dengan beban tinggi. Dengan berlalunya waktu dan berkurangnya bahan organik

yang tersedia, protozoa bersilia menggantikan protozoa berflagel, karena protozoa berflagel mampu bertahan dengan konsentrasi makanan yang lebih rendah. Hal ini mencirikan pengoperasian pada sistem konvensional, di mana sejumlah besar ciliata yang hidup bebas hadir bersama dengan jumlah maksimum bakteri dan konsentrasi bahan organik yang rendah (tersisa). Pada periode retensi yang panjang, yang merupakan karakteristik dari sistem beban rendah, bahan organik yang tersedia adalah minimum dan bakteri dikonsumsi oleh ciliata dan rotifera (Morris *et al.*, 2019).

Bagian di bawah ini menjelaskan dua kelompok utama yang terlibat dalam konversi bahan organik: bakteri dan protozoa, dengan penekanan yang lebih besar diberikan pada kelompok pertama.

1. Bakteri

Bakteri adalah mikroorganisme prokariotik uniseluler (tidak memiliki inti sel) yang hidup terisolasi atau berkoloni. Klasifikasi bakteri menurut bentuknya mencakup kategori yang tercantum dalam Tabel 9.4.

Tabel 9.4 Kategori bakteri berdasarkan bentuknya

Nama	Jenis	Ukuran
Cocci (tunggal, coccus)	Spheroid	Diameter 0.5 - 3.0 μm
Bacilli (tunggal, bacillus)	Rod	Lebar/diameter 0.3 - 1.5 μm , Panjang 1.0 - 10.0 μm
Spirilla (tunggal, spirillum)	Spiral	Panjang <50 μm
Vibrios	Curved rod	lebar/diameter 1.0 - 10.0 μm , Panjang 2.0 - 6.0 μm
Various	filamentous	Panjang >100 μm

Bakteri merupakan kelompok terbesar dan terpenting dalam sistem pengolahan air limbah secara biologis. Mengingat bahwa fungsi utama dari sistem pengolahan

adalah penghilangan zat organik, bakteri heterotrofik adalah agen utama dari mekanisme ini. Selain memainkan peran konversi bahan organik, bakteri memiliki sifat untuk menggumpalkan diri mereka sendiri dalam unit struktural seperti flok, biofilm atau butiran, yang memiliki implikasi penting dalam pengolahan air limbah.

Struktur sel bakteri disajikan pada Gambar 9.5, dan sekitar 80% sel bakteri terdiri dari air dan 20% bahan kering. Dari bahan kering ini, sekitar 90% merupakan bahan organik dan 10% anorganik. Rumus yang banyak digunakan untuk karakterisasi perkiraan komposisi sel adalah (von Sperling, 2008):

- a. Konversi amonia menjadi nitrit (nitrifikasi): bakteri kemoautotrofik
- b. Konversi nitrit menjadi nitrat (nitrifikasi): bakteri kemoautotrofik
- c. Konversi nitrat menjadi gas nitrogen (denitrifikasi): bakteri kemoheterotrofik fakultatif

Selain menghilangkan bahan organik berkarbon, pengolahan limbah juga dapat menggabungkan tujuan lain, yang bergantung pada kelompok bakteri tertentu. Dengan demikian, fenomena berikut ini dapat terjadi:

- a. $C_5H_7O_2N$ (tanpa fosfor dalam formulanya)
- b. $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$ (dengan fosfor dalam rumusnya)

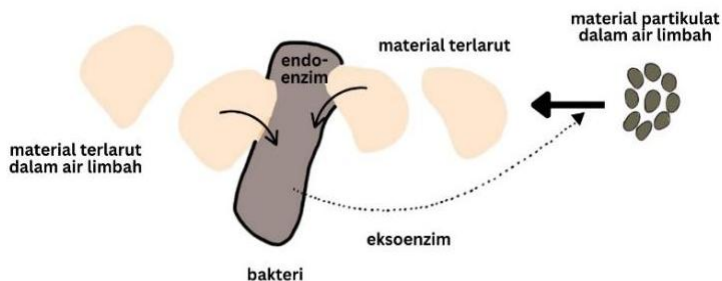
Dalam kedua formulasi tersebut, rasio C:H:O: N adalah sama. Aspek yang penting adalah bahwa semua komponen ini harus diperoleh dari media, dan jika tidak ada komponen tersebut, maka dapat membatasi pertumbuhan populasi bakteri.

Pemanfaatan substrat yang tersedia dalam medium oleh bakteri bergantung pada ukuran relatif partikel. Dua fraksi utama bahan organik dalam air limbah adalah (a) fraksi mudah terurai secara hayati dan (b) mudah terurai secara hayati. Dalam limbah rumah tangga pada umumnya, sebagian besar bahan organik dalam bentuk larut mudah

terdegradasi. Karena ukurannya yang kecil, senyawa yang larut dapat menembus sel bakteri melalui membran selnya.

Di dalam sel, itu bahan organik terlarut dikonsumsi dengan bantuan endoenzim. Senyawa organik dengan dimensi lebih besar dan formula lebih kompleks (partikulat atau tersuspensi bahan organik), harus mengalami proses transformasi di luar sel, memimpin menjadi molekul yang lebih kecil, yang dapat diasimilasi oleh bakteri. Tindakan ini dicapai dengan bantuan eksoenzim dalam reaksi hidrolisis. Dalam hidrolisis, konsumsi energi tidak diperhitungkan, dan tidak ada penggunaan akseptor elektron. Produk akhir hidrolisis hadir dalam bentuk yang mudah terurai secara hayati, menembus membran sel ke dalam sel, di mana ia dikonsumsi dengan cara yang sama seperti zat terlarut (Jewell *et al.*, 2016)

ASIMILASI MATERIAL TERLARUT DAN PARTIKULAT



Gambar 9.5 Asimilasi materi terlarut dan partikulat

Persyaratan lingkungan untuk bakteri bervariasi menurut spesiesnya. Misalnya, bakteri yang terlibat dalam proses nitrifikasi (bakteri kemoautotrofik) jauh lebih sensitif terhadap kondisi lingkungan dibandingkan heterotrofik biasa bakteri yang terlibat dalam stabilisasi bahan organik berkarbon. Secara umum, laju pertumbuhan optimal untuk pertumbuhan bakteri terjadi dalam rentang yang relatif terbatas suhu dan pH, meskipun kelangsungan hidup

mereka dapat terjadi dalam jangka waktu yang lebih luas rentang.

Suhu di bawah tingkat optimal mempunyai pengaruh yang lebih besar dalam pertumbuhannya laju dibandingkan dengan suhu di atas tingkat optimal. Tergantung pada suhu Dalam kisaran tersebut, bakteri dapat diklasifikasikan menjadi psikrofilik, mesofilik, atau termofilik. Itu kisaran suhu tipikal untuk masing-masing kategori tersebut disajikan pada Tabel 9.5. pH juga merupakan faktor penting dalam pertumbuhan bakteri. Kebanyakan bakteri tidak mendukung nilai pH di atas 9,5 atau di bawah 4,0, dan nilai optimal berada di sekitar netralitas (6,5 hingga 8,5) (Holkar *et al.*, 2016).

2. Protozoa

Sebagian besar kelompok protozoa terdiri dari mikroorganisme eukariotik uniseluler tanpa dinding sel. Meskipun mereka tidak memiliki diferensiasi seluler, beberapa memiliki struktur yang relatif kompleks dengan beberapa daerah yang berbeda di dalam sel untuk menjalankan fungsi yang berbeda.

Tabel 9.5 Suhu optimal pertumbuhan bakteri

Tipe	Temperatur (°C)	
	Range	Ideal
Psycrophilic	-10 hingga 30	12 hingga 18
Mesophilic	20 hingga 50	25 hingga 40
Thermophilic	35 hingga 75	55 hingga 65

Mayoritas protozoa bersifat aerobik atau organisme heterotrofik fakultatif. Reproduksi mereka terjadi melalui pembelahan biner. Protozoa biasanya lebih besar dari bakteri dan dapat memakannya. Hal ini membuat kelompok protozoa merupakan tingkat penting dalam jaring makanan, memungkinkan organisme yang lebih besar memberi makan secara tidak langsung pada bakteri, yang seharusnya merupakan bentuk yang tidak dapat diakses makanan. Tergantung pada beberapa karakteristik struktural dan mode

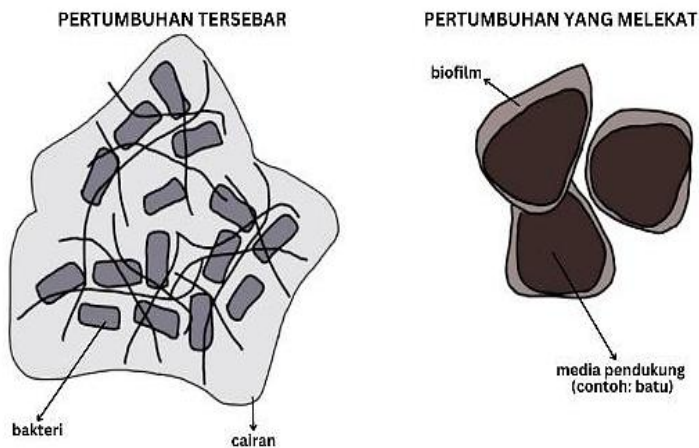
motilitas, protozoa dapat dibagi menjadi beberapa kelompok. Yang menjadi kepentingan utama adalah berikut: amuba, flagellata, dan ciliate yang berenang bebas dan mengintai (Morris *et al.*, 2019). Beberapa spesies bersifat patogen.

Peran penting protozoa dalam pengolahan air secara biologis adalah sebagai:

- a. Konsumsi bahan organik;
- b. Konsumsi bakteri bebas;
- c. Partisipasi dalam pembentukan flok.

Meskipun protozoa berkontribusi pada penghilangan bahan organik dalam air terutama air limbah, peran utama mereka dalam pengolahan (melalui proses seperti lumpur aktif) adalah dengan aktivitas predator yang mereka lakukan pada bakteri yang tersuspensi bebas dalam media cair (Lohani, Chhetri and Khanal, 2015).

TIPE PERTUMBUHAN BIOMASSA



Gambar 9.6 Jenis-jenis Pertumbuhan Biomassa

3. Pertumbuhan biomassa yang tersuspensi dan melekat

Sehubungan dengan pembentukan struktural biomassa, proses pengolahan air secara biologis, sesungguhnya mekanisme pertumbuhan melekat dan tersuspensi dapat terjadi secara bersamaan.

- a. Pertumbuhan tersuspensi: biomassa tumbuh dalam bentuk tersuspensi di dalam cairan sedang, tanpa struktur pendukung apa pun

Sistem:

- 1) kolam stabilisasi dan variannya
 - 2) lumpur aktif dan variannya
 - 3) reaktor selimut lumpur anaerobik aliran atas (menerima air limbah yang mengandung padatan tersuspensi)
- b. Pertumbuhan melekat: biomassa tumbuh menempel pada media pendukung, membentuk biofilm. Media pendukung dapat direndam dalam media cair atau menerima pelepasan cairan terus menerus atau terputus-putus. Media pendukung dapat berupa bahan padat alami (batu, pasir, tanah) atau buatan (plastik) atau terdiri dari aglomerat biomassa itu sendiri (butiran).

4. Flok biologis dalam sistem pertumbuhan terdispersi

Dalam beberapa proses pengolahan, seperti lumpur aktif, organisme terkonsentrasi dan membentuk unit struktural yang lebih luas yang disebut flok. Meskipun mikroorganisme adalah agen dalam penghilangan senyawa organik, flok dalam lumpur aktif memainkan peran penting berperan dalam proses penghilangan bahan organik. Bukan hanya kemampuan organisme heterotrofik dalam menstabilkan bahan organik yang membuat lumpur aktif proses efisien. Yang juga sangat penting adalah kemampuan mikroorganisme yang mengorganisir dirinya dalam unit struktural suatu flok, sehingga mampu memisahkan diri melalui mekanisme fisik sederhana seperti sedimentasi, dalam unit pengendapan terpisah.

Pemisahan ini memungkinkan limbah akhir diklarifikasi (dengan berkurangnya konsentrasi bahan organik tersuspensi). Oleh karena itu, kualitas limbah akhir ditandai dengan rendahnya nilai kelarutan zat organik (dihilangkan di reaktor) dan BOD tersuspensi (flok dihilangkan di final satuan pengendapan). Mekanisme

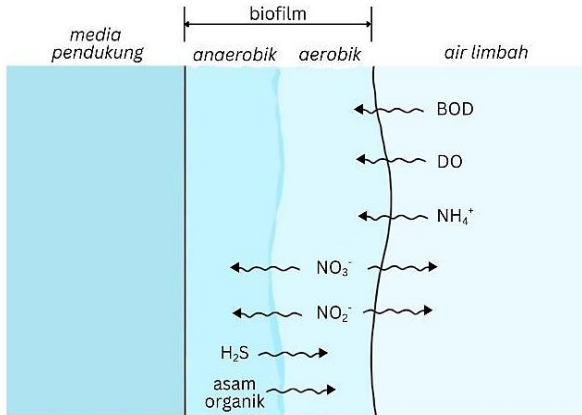
flokulasi yang dalam pengolahan air dicapai pada biaya penambahan produk kimia, terjadi melalui mekanisme yang sepenuhnya alami dalam pengolahan limbah biologis. Di antara mikroorganisme penyusun flok tersebut, selain bakteri dan protozoa, ditemukan juga jamur, rotifera, nematoda, dan kadang-kadang bahkan larva serangga (Menkiti and Ezemagu, 2015).

Matriks flok dapat dengan cepat menyerap hingga 40% zat terlarut dan partikulat zat organik dalam reaktor biologis melalui interaksi ionik. Partikel tersebut merupakan bahan yang akan dihidrolisis oleh eksoenzim sebelum diserap dan dimetabolisme bakteri. Mengingat ukuran flok bervariasi antara 50 dan 500 μm , maka akan menjadi gradien yang nyata antara konsentrasi zat organik dan oksigen dari luar flok (Jewell *et al.*, 2016).

5. Biofilm dalam sistem pertumbuhan terpasang

Imobilisasi mikroba adalah perlekatan mikroorganisme pada benda padat atau tersuspensi media pendukung. Imobilisasi mempunyai keuntungan dalam mengaktifkan high konsentrasi biomassa yang harus dipertahankan dalam reaktor untuk jangka waktu lama. Meskipun praktis semua mikroorganisme mempunyai potensi untuk melekat pada media pendukung melalui produksi polimer ekstraseluler yang memungkinkan fisik-keterikatan kimia, baru belakangan ini penerapan teknologi seluler proses penyerapan digunakan dalam skala yang lebih luas dan optimal di berbagai bidang proses bioteknologi dan pengolahan limbah (Torresi *et al.*, 2018). Perlekatan tersebut dipengaruhi oleh interaksi antar sel, yaitu dengan adanya molekul polimer pada permukaan dan komposisi medium (Falås *et al.*, 2012).

REPRESENTASI SKEMATIS BIOFILM



Gambar 9.7 Skema Biofilm

Biofilm mengandung senyawa yang diperlukan untuk perkembangan bakteri, seperti bahan organik, oksigen dan mikronutrien, diserap ke permukaan. Setelah selanjutnya, mereka diangkut melalui biofilm melalui mekanisme difusi, dimana mereka dimetabolisme oleh mikroorganisme. Padatan koloid atau tersuspensi tidak dapat berdifusi melalui biofilm dan perlu dihidrolisis menjadi molekul yang lebih kecil. Produk metabolisme akhir diangkut dalam arah yang berlawanan, ke cairan fase (Falås *et al.*, 2012). Gambar 9.7 mengilustrasikan prinsip proses biofilm dalam pengolahan air limbah.

Dalam reaktor aerobik, oksigen dikonsumsi saat menembus biofilm, hingga kondisi anoksik atau anaerobik tercapai. Oleh karena itu, lapisan luar yang mengandung oksigen dan lapisan dalam yang kekurangan oksigen dapat ditemukan. Konsentrasi oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen / DO*) lah yang menentukan faktor dalam pembentukan lapisan. Reduksi nitrat akan terjadi pada keadaan anoksik lapisan. Pada kondisi anaerobik akan terjadi pembentukan asam organik dan pengurangan sulfat. Koeksistensi antara kondisi aerobik, anoksik, dan anaerobik merupakan karakteristik penting dari sistem biofilm (von Sperling, 2008).

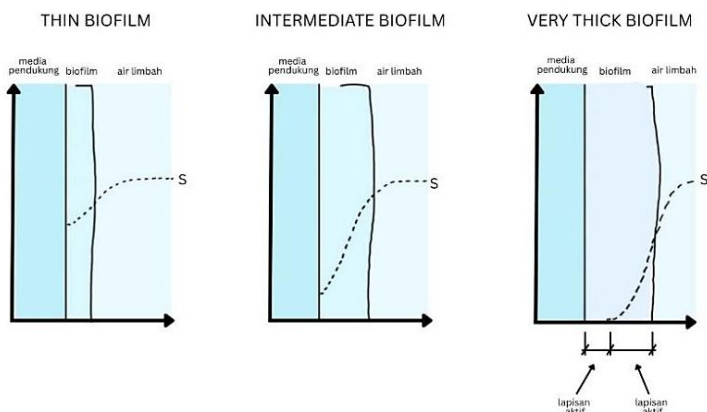
Proses pembentukan biofilm terjadi pada tiga tahap. Tabel 9.6 menyajikan karakteristik utama dari ketiga tahap (berhubungan dengan ketebalan biofilm).

Tabel 9.6 Tahapan pembentukan biofilm

Ketebalan biofilm	Karakteristik
Tipis	- Filmnya tipis dan seringkali tidak menutupi seluruh permukaan media pendukungnya - Pertumbuhan bakteri mengikuti laju logaritmik - Semua mikroorganisme tumbuh pada kondisi yang sama, dan pertumbuhannya mirip dengan biomassa yang tersuspensi
Menengah	- Ketebalan film menjadi lebih besar - Laju pertumbuhan bakteri menjadi konstan - Ketebalan lapisan aktif tetap tidak berubah, terlepas dari itu peningkatan ketebalan total biofilm - Jika persediaan bahan organik terbatas, maka mikroorganisme mengadopsi metabolisme yang cukup hanya untuk bertahan hidup, tetapi tanpa pertumbuhan - Apabila persediaan bahan organik lebih rendah dari kebutuhan pemeliharaan, ketebalan film berkurang
Tebal	- Ketebalan biofilm mencapai tingkat yang sangat tinggi - Pertumbuhan mikroba dilawan dengan pembusukan organisme, dengan penyerapan oleh organisme

Ketebalan biofilm	Karakteristik
	lain dan dengan pencukuran menekan
	- Bagian dari biofilm dapat copot dari media pendukung
	- Jika biofilm terus tumbuh tanpa tercabut darinya media pendukung, penyumbatan akan terjadi

GRADIEN KONSENTRASI SUBSTRAT PADA BIOFILM



Gambar 9.8 Gradien Konsentrasi Substrat dalam Biofilm

Ketika menganalisis pertumbuhan tersuspensi dan pertumbuhan melekat dalam pengolahan air, perbandingan antara waktu penahanan hidrolis dan waktu penggandaan sel adalah aspek yang sangat penting. Dalam sistem pertumbuhan tersuspensi, waktu tinggal hidrolis (waktu rata-rata molekul air tetap berada dalam sistem) harus lebih besar daripada waktu penggandaan mikroorganisme, yaitu waktu yang diperlukan untuk menghasilkan sel-sel baru. Jika waktu tinggal hidrolis kurang dari waktu penggandaan sel, bakteri “tersapu” keluar dari sistem. Ini merupakan faktor pembatas dalam menentukan ukuran reaktor biologis, mengingat reaktor tersebut volume dan

waktu penahanan berhubungan langsung ($\text{waktu penahanan} = \text{volume/aliran}$).

Dalam kasus sistem dengan biofilm, waktu tinggal hidrolis bisa lebih singkat daripada waktu penggandaan sel, tanpa terjadinya pencucian sel, karena fakta tersebut bahwa bakteri menempel pada media pendukung. Oleh karena itu, hal ini dimungkinkan untuk dilakukan mengadopsi volume yang lebih rendah untuk reaktor.

Biomassa yang tersuspensi memiliki kepadatan yang mendekati limbah dan bergerak sendiri dalam arah dan kecepatan yang hampir sama dengan air limbah di dalamnya reaktor. Akibatnya, biomassa tetap terkena fraksi cairan yang sama untuk periode yang lebih lama, menyebabkan konsentrasi substrat yang rendah di lingkungan tersebut dari sel. Dengan konsentrasi substrat yang rendah, aktivitas bakteri dan tingkat penghilangan substrat juga lebih rendah. Hanya pada jarak tertentu dari sel tersebut konsentrasi substrat lebih tinggi. Mengingat ketergantungan antar substrat konsentrasi dan aktivitas mikroba, pentingnya diwakili oleh pencampuran tingkat dalam reaktor menjadi jelas (Falås *et al.*, 2013).

Dalam sistem biomassa melekat, kepadatan media pembawa dan biomassa sangat berbeda dengan massa jenis cairan di dalam reaktor, sehingga memungkinkan terjadinya gradien kecepatan antara cairan dan lapisan luar biofilm. Akibatnya, sel terus-menerus terpapar pada substrat baru, dan berpotensi meningkatkan aktivitas mereka. Namun, jika ketebalan biofilm sangat tinggi, konsumsi substrat di sepanjang biofilm akan kekurangan substrat, yang mengurangi aktivitas mereka. Dalam kondisi ini, keterikatan dengan media pendukung berkurang dan biomassa dapat copot dari media pembawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Falås, P. *et al.* (2012) 'Suspended biofilm carrier and activated sludge removal of acidic pharmaceuticals', *Water Research*. Pergamon, 46(4), pp. 1167–1175. doi: 10.1016/J.WATRES.2011.12.003.
- Falås, P. *et al.* (2013) 'Micropollutant removal by attached and suspended growth in a hybrid biofilm-activated sludge process', *Water Research*. Pergamon, 47(13), pp. 4498–4506. doi: 10.1016/J.WATRES.2013.05.010.
- Gonzalez-Gil, L. *et al.* (2018) 'Role of methanogenesis on the biotransformation of organic micropollutants during anaerobic digestion', *Science of the Total Environment*, 622–623. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.004.
- Holkar, C. R. *et al.* (2016) 'A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches', *Journal of Environmental Management*. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.090.
- Jewell, K. S. *et al.* (2016) 'New insights into the transformation of trimethoprim during biological wastewater treatment', *Water Research*. Elsevier Ltd, 88, pp. 550–557. doi: 10.1016/j.watres.2015.10.026.
- Joss, A. *et al.* (2006) 'Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme', *Water Research*. Pergamon, 40(8), pp. 1686–1696. doi: 10.1016/J.WATRES.2006.02.014.
- Laureni, M. *et al.* (2016) 'Mainstream partial nitrification and anammox: Long-term process stability and effluent quality at low temperatures', *Water Research*. Elsevier Ltd, 101, pp. 628–639. doi: 10.1016/j.watres.2016.05.005.
- Liu, Q. *et al.* (2010) 'Application of MBR for hospital wastewater treatment in China', *Desalination*. Elsevier, 250(2), pp. 605–608. doi: 10.1016/J.DESAL.2009.09.033.

- Lohani, S. P., Chhetri, A. and Khanal, S. N. (2015) 'A simple anaerobic system for onsite treatment of domestic wastewater', *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9(4), pp. 292–300. doi: 10.5897/AJEST2014.1848.
- Menkiti, M. C. and Ezemagu, I. G. (2015) 'Sludge characterization and treatment of produced water(PW) using Tympanotonos Fuscatus coagulant (TFC)', *Petroleum*, 1(1). doi: 10.1016/j.petlm.2015.03.004.
- Morris, J. *et al.* (2019) *BIOLOGY HOW LIFE WORKS*. 3rd edn. W. H. Freeman and Company. New York.
- Prahsantika, M., Harahap, S. and Purwanto, E. (2020) 'Pengaruh Penggunaan Biofilter dengan EM4 untuk Mengurangi Fosfat dan MBAS pada Limbah Cair Laundry', *Jurnal Sumberdaya dan Lingkungan Akuatik*, 1(2), pp. 93–102.
- Sharma, M. K., Khursheed, A. and Kazmi, A. A. (2014) 'Modified septic tank-anaerobic filter unit as a two-stage onsite domestic wastewater treatment system', *Environmental Technology (United Kingdom)*, 35(17), pp. 2183–2193. doi: 10.1080/09593330.2014.896950.
- Torresi, E. *et al.* (2018) 'Reactor staging influences microbial community composition and diversity of denitrifying MBBRs- Implications on pharmaceutical removal', *Water Research*, 138. doi: 10.1016/j.watres.2018.03.014.
- Torresi, E. *et al.* (2019) 'Removal of micropollutants during biological phosphorus removal: Impact of redox conditions in MBBR', *Science of the Total Environment*, 663. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.283.
- von Sperling, M. (2008) *Basic principles of wastewater treatment, Choice Reviews Online*. IWA London. doi: 10.5860/CHOICE.45-2632.

BAB

10

MIKROORGANISME UNTUK MEMBERSIHKAN POLUTAN

Dr. Sulistiowati, S.Si., M.Si.

A. Mikroorganisme sebagai Agen Bioremediator

Bioremediasi merujuk pada penggunaan organisme hidup untuk mendegradasi, menghilangkan, atau menetralkan polutan dari lingkungan sekitar (Ghazaryan et al. 2024). Proses ini memanfaatkan agen biologis seperti bakteri, jamur, alga, dan juga virus. Mikroorganisme tersebut memecah polutan menjadi bentuk yang kurang berbahaya, atau bahkan memineralisasinya menjadi senyawa non-toksik seperti H_2O dan CO_2 (Ayilara & Babalola, 2023). Jenis polutan yang dipecah baik organik maupun anorganik (Andrady, 2011). Mikroorganisme memainkan peran penting dalam bioremediasi berkat kemampuan metaboliknya yang luar biasa untuk memanfaatkan polutan sebagai sumber energi atau karbon, mengubahnya menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Metabolit sekunder mikroorganisme tersebut menghasilkan enzim yang berperan dalam proses degradasi polutan (Saez *et al.*, 2025).

Mikroorganisme memiliki jalur metabolik yang beragam, sebuah keunggulan biologis yang memungkinkan mereka untuk mendegradasi berbagai jenis polutan. Melalui proses metabolisme yang unik, mereka mampu memecah ikatan kimia pada senyawa-senyawa beracun seperti logam berat, hidrokarbon minyak bumi, pestisida, pewarna tekstil, dan zat berbahaya lainnya. Kemampuan ini menjadi fondasi penting dalam bioremediasi, di mana mikroba secara efektif mengubah polutan-polutan tersebut menjadi molekul yang lebih sederhana

dan tidak berbahaya bagi lingkungan. Keragaman jalur metabolik ini memastikan bahwa mikroorganisme dapat beradaptasi dan berperan sebagai agen pembersih alami di berbagai kondisi lingkungan yang terkontaminasi.

Degradasi polutan sebagian besar terjadi melalui proses enzimatis. Enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroba, seperti hidrolase, lipase, dan esterase, memainkan peran penting dalam memecah polutan-polutan kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan tidak beracun. Mekanisme ini adalah inti dari bioremediasi, di mana mikroorganisme bertindak sebagai "pabrik" mini yang menggunakan katalis biologis ini untuk membersihkan lingkungan dari kontaminan. Efektivitas proses ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan yang optimal, yang memungkinkan enzim-enzim tersebut bekerja secara efisien.

Kondisi lingkungan, seperti suhu, pH, dan kadar oksigen, memegang peranan krusial karena memengaruhi aktivitas metabolisme mikroorganisme (Gonzalez & Aranda, 2023). Selain itu, ketersediaan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor harus memadai agar mikroba dapat tumbuh dan berkembang biak dengan optimal. Karakteristik polutan itu sendiri, termasuk konsentrasi dan toksisitasnya, juga menjadi penentu. Semakin tinggi konsentrasinya, semakin sulit proses degradasi berlangsung. Oleh karena itu, keberhasilan bioremediasi tidak hanya bergantung pada keberadaan mikroorganisme, tetapi juga pada manajemen kondisi lingkungan yang cermat dan adaptif.

Disisi lain, mikroorganisme dapat berkembang biak dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk kondisi ekstrem, berkat aktivitas metabolisme yang kuat (Thakur et al. 2022). Kemampuan beradaptasi ini membuatnya efektif dalam berbagai konteks bioremediasi. Mereka bisa bertahan dan berfungsi dalam kondisi suhu yang sangat panas atau dingin, pH yang sangat asam atau basa, dan bahkan di lingkungan dengan kadar garam atau tekanan yang tinggi.

B. Mekanisme Degradasi Polutan

Mekanisme degradasi polutan melalui 3 proses:

1. Biodegradasi

Mikroorganisme secara enzimatik mendegradasi polutan, mengubahnya menjadi zat yang kurang berbahaya. Proses ini melibatkan pemecahan molekul organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana, yang pada akhirnya menghasilkan CO₂, H₂O, dan biomassa (Ayilara & Babalola, 2023). Proses ini pada dasarnya adalah bagaimana mikroba membersihkan lingkungan dari kontaminan. Mereka menggunakan enzim sebagai alat biologis untuk memecah ikatan kimia yang kuat pada polutan. Misalnya, enzim hidrolase dapat memecah polutan organik yang larut dalam air, sementara enzim oksidase dapat mengurai senyawa-senyawa yang lebih kompleks. Melalui serangkaian reaksi biokimia, mikroorganisme mengubah senyawa beracun tersebut menjadi bahan yang dapat digunakan sebagai sumber energi atau bahan pembangun sel, sehingga secara efektif menghilangkan polutan dari lingkungan sambil terus tumbuh dan berkembang biak.

2. Bioakumulasi dan Biosorpsi

Beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan unik untuk menumpuk dan menyimpan polutan di dalam sel mereka, sebuah mekanisme yang dikenal sebagai bioakumulasi dan biosorpsi (Filote *et al.*, 2021). Proses ini secara efektif mengurangi konsentrasi zat beracun di lingkungan sekitar, baik di air maupun di tanah, tanpa harus mengurai polutan tersebut. Mikroba bertindak seperti spons biologis, menjebak dan menahan polutan seperti logam berat, sehingga menjauhkan zat-zat berbahaya ini dari rantai makanan dan ekosistem. Kemampuan alami ini menjadi salah satu pilar penting dalam teknologi bioremediasi, khususnya untuk membersihkan kontaminan yang sulit dipecah, seperti merkuri dan kadmium.

3. Biotransformasi

Mikroorganisme memiliki kemampuan untuk mengubah polutan menjadi bentuk yang kurang beracun melalui serangkaian proses metabolik, yang dapat melibatkan oksidasi, reduksi, atau hidrolisis (Ebsa *et al.*, 2024). Mekanisme ini sangat penting dalam bioremediasi, terutama untuk polutan yang sulit dipecah secara langsung. Sebagai contoh, beberapa mikroba dapat mengurangi senyawa beracun seperti kromium heksavalen (Cr^{6+}) menjadi kromium trivalen (Cr^{3+}) yang tidak terlalu berbahaya. Proses biotransformasi ini tidak hanya mengurangi tingkat toksisitas polutan, tetapi juga mengubahnya menjadi bentuk yang lebih stabil dan tidak mudah menyebar di lingkungan.

C. Teknik dan Strategi

1. Biostimulasi

Biostimulasi adalah strategi bioremediasi yang bertujuan untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme alami (indigenous) yang sudah ada di lokasi tercemar (Andreolli *et al.*, 2015). Proses ini dilakukan dengan menambahkan nutrisi, seperti nitrogen dan fosfor, atau zat lain yang dapat merangsang pertumbuhan dan metabolisme mikroorganisme tersebut. Dengan menyediakan kondisi lingkungan yang optimal, populasi mikroba lokal dapat tumbuh lebih cepat dan menjadi lebih efisien dalam memecah polutan. Pendekatan ini sering kali lebih disukai karena biaya yang relatif rendah dan risiko yang minimal, mengingat tidak ada mikroorganisme asing yang dimasukkan ke dalam ekosistem.

2. Bioaugmentasi

Bioaugmentasi adalah strategi bioremediasi yang melibatkan pengenalan strain mikroorganisme tertentu yang dikenal memiliki kemampuan degradasi tinggi ke lokasi yang terkontaminasi (Andreolli *et al.*, 2015). Pendekatan ini sering digunakan ketika populasi mikroorganisme alami di area tersebut tidak memadai atau tidak mampu

mendegradasi polutan secara efektif. Dengan menambahkan mikroba "spesialis" ini, proses pembersihan dapat dipercepat dan ditingkatkan secara signifikan. Namun, keberhasilan bioaugmentasi bergantung pada kemampuan mikroorganisme yang diintroduksi untuk bertahan hidup, beradaptasi, dan bersaing dengan populasi mikroba asli di lingkungan baru mereka.

3. Imobilisasi

Imobilisasi adalah proses mengikat atau menjebak mikroorganisme pada suatu bahan pendukung, seperti matriks gel, manik-manik polimer, atau serat (Liu *et al.*, 2022). Tujuan utama dari metode ini adalah untuk meningkatkan efisiensi mikroorganisme dalam mendegradasi polutan dengan menyediakan lingkungan yang stabil dan menjaga beban biomassa yang lebih tinggi. Dengan terimobilisasi, mikroorganisme tidak akan mudah terbawa arus air atau tertimbun, sehingga aktivitas pembersihannya dapat berlangsung secara terus-menerus dan terkontrol. Strategi ini sangat efektif dalam sistem pengolahan air limbah atau bioremediasi *in situ*, karena memungkinkan mikroba bekerja pada konsentrasi polutan yang lebih tinggi tanpa mengalami stres.

D. Jenis – Jenis Mikroorganisme dan Aplikasinya

Adapun jenis – jenis mikroorganisme dan aplikasinya terdapat pada tabel 10.1 berikut.

Tabel 10.1 Jenis mikroorganisme dan aplikasinya

No.	Mikroorganisme	Pengaplikasiannya	Referensi
1.	<i>Pseudomonas putida</i>	Efektif dalam menguraikan berbagai jenis polutan organik seperti polutan akuakultur.	(Angraen et. al. 2025)

No.	Mikroorganisme	Pengaplikasiannya	Referensi
2.	<i>Dechloromonas aromatica</i>	Dikenal karena kemampuannya untuk mendegradasi senyawa aromatik.	(Salinero <i>et al.</i> , 2009)
3.	<i>Methylibium Petroleiphilum</i>	Spesialis dalam memecah hidrokarbon minyak bumi	(Kane <i>et al.</i> , 2007)
4.	<i>Enterobacter</i> spp.	Mampu mendegradasi logam berat limbah industri	(Kelany <i>et al.</i> , 2023)
5.	<i>Alcaligenes</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Mycobacterium</i>	Mampu secara efektif menguraikan hidrokarbon	(Sayqal dan Ahmed, 2021)
6.	<i>Trichoderma</i> spp.	Digunakan untuk menguraikan kontaminan organik dan logam berat.	(Sayqal dan Ahmed, 2021)
7.	Microalgae dan cyanobacteria	Digunakan dalam konsorsium bersama bakteri untuk meningkatkan degradasi limbah cair industri.	(Calatrava <i>et al.</i> , 2024)

E. Tantangan

Berikut adalah tantangan yang dihadapi dalam penggunaan mikroorganisme sebagai agen bioremediator:

1. Memahami Interaksi Kompleks Antara Mikroba dan Polutan

Interaksi mikroba dengan polutan bersifat kompleks dan multifaset, dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan operasional (Iqbal *et al.*, 2023). Interaksi ini sangat penting untuk biodegradasi polutan, termasuk kontaminan

baru seperti obat-obatan, produk perawatan pribadi, dan mikroplastik, yang tidak dapat dihilangkan secara efektif oleh proses pengolahan limbah air tradisional.

2. Tantangan dalam Mengendalikan Kondisi Lingkungan

Mengendalikan kondisi lingkungan di lapangan menimbulkan tantangan yang signifikan. Faktor-faktor seperti suhu, pH, dan waktu retensi hidrolik dapat mempengaruhi komposisi dan aktivitas komunitas mikroba, sehingga memengaruhi kinerja sistem pengolahan limbah cair secara keseluruhan (ElNaker et. al., 2018). Misalnya, gangguan suhu dapat mengubah profil komunitas mikroba dan kinerja proses dalam reaktor biogas, menyoroti pentingnya menjaga kondisi yang stabil. Selain itu, variasi aliran dan komposisi limbah dapat menyebabkan masalah operasional seperti pembilasan lumpur dan penurunan efisiensi pengolahan.

F. Biodegradasi Kontaminan Baru

Biodegradasi kontaminan baru merupakan bidang penelitian yang kritis karena sifatnya yang persisten dan toksik. Metode tradisional seperti filtrasi dan oksidasi seringkali tidak memadai, menyebabkan mineralisasi yang tidak lengkap dan potensi kontaminasi lingkungan (Rajak, 2025). Teknologi pengolahan canggih, seperti reaktor biologi membran dan proses oksidasi canggih, menunjukkan potensi namun terhambat oleh biaya tinggi dan kebutuhan energi yang besar. Bioremediasi, yang memanfaatkan rekayasa mikroba, menawarkan pendekatan yang lebih berkelanjutan dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk mendegradasi polutan kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrady, A. L. (2011) 'Microplastics in the marine environment', *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), pp. 1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
- Andreolli, M. *et al.* (2015) 'Bioaugmentation and biostimulation as strategies for the bioremediation of a burned woodland soil contaminated by toxic hydrocarbons: A comparative study', *Journal of Environmental Management*, 153, pp. 121–131. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.02.007.
- Angraeni, A. T., Amelia, N. and Hala, Y. (2025) 'The Role of *Pseudomonas Putida* in Bioremediation: a Review', *JISIP (Jurnal Ilmu Sosial dan Pendidikan)*, 9(3), p. 1193. doi: 10.58258/jisip.v9i3.8794.
- Ayilara, M. S. and Babalola, O. O. (2023) 'Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms', *Frontiers in Agronomy*, 5(May), pp. 1–15. doi: 10.3389/fagro.2023.1183691.
- Calatrava, V., Ballester, D. G. and Dubini, A. (2024) 'Microalgae for bioremediation: advances, challenges, and public perception on genetic engineering', *BMC Plant Biology*, 24(1). doi: 10.1186/s12870-024-05995-5.
- Ebsa, G. *et al.* (2024) 'The role and mechanisms of microbes in dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and its residues bioremediation', *Biotechnology Reports*, 42(December 2023). doi: 10.1016/j.btre.2024.e00835.
- ElNaker, N. A., Yousef, A. F. and Hasan, S. W. (2018) 'Effect of hydraulic retention time on microbial community structure in wastewater treatment electro-bioreactors', *MicrobiologyOpen*, 7(4), pp. 1–16. doi: 10.1002/mbo3.590.

- Filote, C. *et al.* (2021) 'Sustainable application of biosorption and bioaccumulation of persistent pollutants in wastewater treatment: Current practice', *Processes*, 9(10), pp. 1–38. doi: 10.3390/pr9101696.
- Ghazaryan, K., Verma, A., Rawat, S., Rajput, P., Minkina, T., Mandzhieva, S., Elshikh, M. S., Chena, S., Singh, R. K., Ragab El-Ramady, H., & Singh, A. (2024). Implementing Sustainable Nano-Bioremediation for Emerging Pollutants: An Environmentally Friendly Remediation Strategy. In V. Rajput (Ed.), *Nanotechnology Applications and Innovations for Improved Soil Health* (pp. 316-332). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1471-5.ch016>
- Gonzalez, J. M. and Aranda, B. (2023) 'Microbial Growth under Limiting Conditions-Future Perspectives', *Microorganisms*, 11(7), pp. 1–21. doi: 10.3390/microorganisms11071641.
- Iqbal, B. *et al.* (2023) 'Advancing environmental sustainability through microbial reprogramming in growth improvement, stress alleviation, and phytoremediation', *Plant Stress*, 10(October), p. 100283. doi: 10.1016/j.stress.2023.100283.
- Kane, S. R. *et al.* (2007) 'Whole-genome analysis of the methyl tert-butyl ether-degrading beta-proteobacterium *Methylibium petroleiphilum* PM1', *Journal of Bacteriology*, 189(5), pp. 1931–1945. doi: 10.1128/JB.01259-06.
- Kelany, M. S. *et al.* (2023) 'Bioremediation of industrial wastewater heavy metals using solo and consortium *Enterobacter* spp.', *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11). doi: 10.1007/s10661-023-11951-x.
- Liu, D. *et al.* (2022) 'Immobilization of Biomass Materials for Removal of Refractory Organic Pollutants from Wastewater', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21). doi: 10.3390/ijerph192113830.

- Rajak, P. (2025) 'Green nanomaterial-based sustainable analysis of contaminant-remediation in wastewater: A bird's-eye view on recent advances and limitations', *Sustainable Chemistry for the Environment*, 10(March). doi: 10.1016/j.scenv.2025.100238.
- Saez, J. M. *et al.* (2025) 'Enhancing environmental decontamination and sustainable production through synergistic and complementary interactions of actinobacteria and fungi', *Heliyon*, 11(3), p. e42135. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42135.
- Salinero, K. K. *et al.* (2009) 'Metabolic analysis of the soil microbe *Dechloromonas aromatica* str. RCB: Indications of a surprisingly complex life-style and cryptic anaerobic pathways for aromatic degradation', *BMC Genomics*, 10, pp. 1–23. doi: 10.1186/1471-2164-10-351.
- Sayqal, A. and Ahmed, O. B. (2021) 'Advances in Heavy Metal Bioremediation: An Overview', *Applied Bionics and Biomechanics*, 2021. doi: 10.1155/2021/1609149.
- Thakur, N., Singh, S. P. and Zhang, C. (2022) 'Microorganisms under extreme environments and their applications', *Current Research in Microbial Sciences*, 3(May), p. 100141. doi: 10.1016/j.crmicr.2022.100141.

BAB

11

MIKROORGANISME DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN

Bina Rachma Permatasari, S.KM., MKM.

A. Pendahuluan

Perubahan lingkungan yang disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti urbanisasi, industrialisasi, dan penggunaan bahan kimia sintetis, telah menciptakan tantangan besar bagi kualitas udara, air, dan tanah. Untuk mengatasi permasalahan ini, mikroorganisme termasuk bakteri, jamur, dan alga dimanfaatkan dalam proses bioremediasi, yaitu metode pengurangan atau penghilangan polutan melalui aktivitas biologis mereka. Keunggulan penggunaan mikroba antara lain adalah laju pertumbuhan yang cepat serta kemudahan untuk dimodifikasi secara ekologis maupun bioteknologi (Ayilara dan Babalola, 2023).

Selain dimanfaatkan dalam bioremediasi, mikroorganisme juga memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan siklus nutrisi global, seperti siklus karbon dan nitrogen. Diketahui bahwa semua senyawa organik secara alami dapat diuraikan oleh mikroba, meskipun senyawa buatan seperti plastik dan pestisida lebih sulit terdegradasi. Sebagai contoh, proses fiksasi nitrogen yang hanya dapat dilakukan oleh bakteri tertentu menghasilkan amonia yang bermanfaat bagi tanaman, sehingga membantu mempertahankan kesuburan tanah pada sistem pertanian (Gupta dkk, 2016).

Secara umum, bioteknologi lingkungan dapat diartikan sebagai pemanfaatan sistem biologis, khususnya komunitas mikroba, untuk melindungi dan memulihkan kualitas

lingkungan. Penerapan konsep ini mencakup pengolahan limbah, pemulihan sumber daya, dan bioremediasi. Beberapa ahli bahkan menegaskan bahwa inti dari bioteknologi lingkungan modern adalah pengelolaan komunitas mikroba agar dapat memberikan berbagai manfaat bagi masyarakat (Ely dkk, 2025).

Kemajuan terbaru di bidang ini meliputi teknik manipulasi komunitas mikroba melalui pendekatan ekologi mikroba. Salah satu contohnya adalah penggunaan *biofilm*, yaitu struktur mikroba kompleks yang mampu mengikat sekaligus menguraikan beragam polutan. Biofilm telah terbukti sangat efektif dalam pengolahan air limbah dan juga dalam menyerap logam berat seperti timbal, seng, serta kadmium.

B. Mekanisme Kerja Mikroorganisme

Mekanisme kerja mikroorganisme dapat dipahami melalui berbagai aspek fisiologis dan biokimia yang memengaruhi cara mereka bertahan hidup, berkembang biak, serta berinteraksi dengan lingkungannya. Pemahaman ini mencakup proses pada tingkat sel, molekul, hingga peran mereka di ekosistem. Berikut adalah uraian mekanisme tersebut dalam beberapa kategori utama menurut Suryani, (2022) :

1. Interaksi dengan Membran Sel dan Dinding Se

Senyawa antimikroba seperti saponin bekerja dengan menyisipkan aglikon ke dalam membran lipid bilayer mikroorganisme. Interaksi ini memungkinkan saponin mengikat kolesterol dan membentuk kompleks yang menyebabkan lisis sel akibat kebocoran ion kalium. Sementara itu, tanin bertindak sebagai agen antibakteri dengan mempresipitasi protein dan menghambat kerja DNA topoisomerase, sehingga pembentukan sel bakteri terganggu. Tanin juga mampu mengikat ion besi yang dibutuhkan mikroorganisme, sehingga mengganggu jalannya proses metabolisme.

2. Transportasi dan Permeabilitas Membran

Membran sel mikroorganisme tersusun atas fosfolipid dan protein yang memungkinkan perpindahan molekul melalui dua mekanisme utama: difusi pasif (osmosis) dan difusi aktif yang membutuhkan energi serta protein pembawa. Pada bakteri, terdapat kompartemen periplasma yang berisi protein pengikat solut, enzim hidrolitik, dan protein transportir. Komponen ini berfungsi mengatur tekanan osmosis, menguraikan senyawa, dan menjalankan reaksi redoks.

3. Sintesis dan Replikasi Molekul Biologis

Proses sintesis protein di ribosom mikroorganisme melibatkan dua subunit dan molekul RNA, dan menjadi sasaran penghambatan oleh antibiotik seperti streptomisin yang dapat mengganggu fungsi ribosom sehingga sintesis protein gagal. Selain itu, beberapa senyawa antimikroba mampu menghambat enzim DNA girase yang sangat penting dalam replikasi DNA, sehingga proses perbanyakan materi genetik mikroorganisme terhenti.

4. Proses Metabolik, Enzimatik, dan Peran Ekologis

Dalam aktivitas metabolisme atau fermentasi, mikroorganisme menguraikan makromolekul seperti protein menjadi asam amino dan gula melalui bantuan enzim seperti protease dan amilase. Proses ini sangat penting untuk pertumbuhan dan kelangsungan hidup mikroorganisme. Beberapa mikroorganisme juga mampu melakukan rekombinasi DNA yang menghasilkan organisme hasil rekayasa genetika (GMO). Di lingkungan, bakteri dan fungi memiliki peran penting dalam menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang dapat dimanfaatkan oleh organisme lain, sehingga membantu menjaga keseimbangan siklus materi di alam.

C. Klasifikasi Mikroorganisme dalam Bioteknologi Lingkungan

Dalam bioteknologi lingkungan, mikroorganisme dapat dikelompokkan berdasarkan struktur sel dan materi genetiknya menjadi dua kategori utama.

1. Prokariotik: Mikroorganisme yang tidak memiliki membran inti, misalnya bakteri dan archaea.
2. Eukariotik: Mikroorganisme yang memiliki membran inti, meliputi jamur (kapang dan khamir) serta alga.

Jenis-Jenis Mikroorganisme yang Digunakan dalam Bioteknologi Lingkungan berdasarkan Arna, dkk (2023) :

1. Bakteri

- a. Peran: Sering dimanfaatkan dalam pengolahan limbah, bioremediasi, dan produksi bioenzim.
- b. Contoh: Spesies yang mampu menguraikan polutan seperti hidrokarbon dan logam berat.
- c. Karakteristik: Bersifat uniseluler, tidak memiliki membran inti, dan dapat bereproduksi dengan cepat.

2. Jamur (Fungi)

- a. Peran: Berperan dalam dekomposisi bahan organik dan proses bioremediasi, terutama jenis kapang.
- b. Karakteristik: Bersifat eukariotik dan dapat berbentuk uniseluler maupun multiseluler.

3. Alga Peran:

- a. Dimanfaatkan dalam pembuatan biofuel, sebagai indikator kualitas lingkungan, serta membantu pengolahan limbah.
- b. Karakteristik: Eukariotik dan mampu melakukan fotosintesis.

4. Protozoa dan Mikroorganisme Lainnya

- a. Umumnya terdapat pada sistem pengolahan limbah aerob maupun anaerob, seperti proses lumpur aktif dan trickling filter.
- b. Berperan penting dalam siklus materi dan proses pengolahan biologis.

D. Aplikasi Mikroorganisme dalam Bioteknologi Lingkungan

Pemanfaatan mikroorganisme dalam bioteknologi lingkungan mencakup berbagai bidang yang berkontribusi pada perbaikan kualitas lingkungan, peningkatan produktivitas pertanian, serta pengurangan dampak negatif aktivitas manusia terhadap alam. Melalui kemampuan alami mereka dalam mendegradasi bahan organik, memfiksasi unsur hara, dan berinteraksi dengan tanaman maupun polutan, mikroorganisme menjadi salah satu solusi berkelanjutan untuk menjaga keseimbangan ekosistem. Berikut adalah beberapa bentuk penerapannya di berbagai sektor :

1. Pengolahan dan Pengendalian Limbah

Bakteri dan jamur dimanfaatkan dalam teknik bioremediasi untuk mengatasi pencemaran tanah, air, dan udara. Melalui proses ini, mikroba menguraikan polutan menjadi senyawa yang aman, sehingga kondisi lingkungan dapat dipulihkan. Bentuk bioremediasi meliputi biostimulasi, bioaugmentasi, biofilter, bioreaktor, bioslurry, bioventing, composting, dan landfarming. Selain itu, teknik fitoremediasi memanfaatkan tanaman yang bersinergi dengan mikroorganisme untuk mengolah bahan pencemar di tanah maupun air (Darmayani dkk, 2021).

2. Produksi Bioplastik Ramah Lingkungan

Beberapa mikroorganisme digunakan untuk memproduksi plastik biodegradable seperti polihidroksibutirat (PHB) dan polihidroksi alkanat (PHA). Plastik jenis ini dapat diuraikan secara alami oleh mikroba di tanah, sehingga mengurangi pencemaran yang biasanya diakibatkan oleh plastik konvensional (Darmayani dkk, 2021).

3. Peningkatan Kesuburan Tanah dan Produktivitas Tanaman

Mikroorganisme tanah seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Trichoderma*, dan mikoriza berperan dalam fiksasi nitrogen, dekomposisi bahan organik, dan membentuk simbiosis yang menguntungkan dengan akar tanaman. Selain itu, mikroba menghasilkan senyawa bioaktif

yang dapat melindungi tanaman dari patogen dan tekanan lingkungan. Penerapannya dalam bentuk pupuk hayati dan biopestisida menjadi alternatif ramah lingkungan untuk pertanian berkelanjutan (Zendrato dan Lase, 2025).

4. Pengelolaan Limbah Pertanian dan Peningkatan Fungsi Ekosistem Tanah

Penggunaan mikroorganisme dalam proses pengomposan dan fermentasi limbah pertanian membantu meningkatkan ketersediaan unsur hara serta memperbaiki struktur tanah. Beberapa mikroba juga menghasilkan senyawa organik volatil (VOC) yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman, misalnya meningkatkan panjang akar. Dengan demikian, mikroorganisme berperan tidak hanya dalam penguraian bahan organik tetapi juga dalam peningkatan fisiologi tanaman dan fungsi ekosistem tanah (Gulo dkk, 2024).

5. Peran dalam Pengendalian Hayati

Mikroorganisme seperti *Trichoderma* spp. dan *Bacillus thuringiensis* (Bt) dimanfaatkan sebagai agen biopestisida untuk mengendalikan hama dan patogen tanaman secara efektif. Metode ini lebih aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia dibandingkan penggunaan pestisida kimia, sekaligus membantu mengurangi ketergantungan pada bahan sintetis yang berpotensi mencemari lingkungan (Zendrato dan Lase, 2025).

E. Teknologi dan Inovasi

Bioteknologi lingkungan saat ini banyak memanfaatkan teknik bioremediasi sebagai solusi yang ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran. Pendekatan ini memanfaatkan mikroorganisme, tanaman, atau enzim untuk menguraikan dan menetralkan polutan berbahaya pada tanah, air, maupun udara.

Dibandingkan metode fisik atau kimia yang sering memerlukan biaya tinggi dan berpotensi menimbulkan dampak samping, bioremediasi dinilai lebih aman, efisien, dan berkelanjutan. Dalam praktiknya, metode ini mencakup

beberapa strategi, seperti biostimulasi (penambahan nutrisi untuk merangsang pertumbuhan mikroba lokal), bioaugmentasi (penambahan mikroorganisme dari luar yang memiliki kemampuan degradasi tinggi), serta fitoremediasi (pemanfaatan kombinasi tanaman dan mikroorganisme untuk mengolah bahan pencemar) (Isnaeni dkk, 2024).

Berdasarkan metode pelaksanaannya, bioremediasi dapat dilakukan secara *in situ* maupun *ex situ*. Metode *in situ* berarti proses pembersihan dilakukan langsung di lokasi pencemaran tanpa memindahkan media tercemar, biasanya dengan teknik aerobik seperti biostimulasi dan bioaugmentasi. Sebaliknya, metode *ex situ* memerlukan pemindahan tanah atau air yang tercemar ke lokasi lain, seperti ke bioreaktor, area pengomposan, atau sistem biopiles, sehingga proses pengolahan dapat lebih terkendali. Pemilihan metode sangat dipengaruhi oleh tingkat pencemaran, karakteristik lokasi, dan ketersediaan fasilitas (Daeli dan Lase, 2025).

Salah satu inovasi yang terus berkembang adalah penggunaan biostimulan. Biostimulan meliputi pupuk hayati, pupuk NPK, atau bahan organik lain yang dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme dalam tanah. Dengan meningkatnya populasi dan aktivitas mikroba, proses degradasi kontaminan dapat berjalan lebih cepat, sehingga pemulihan kualitas lingkungan menjadi lebih efektif (Dewi dkk, 2024).

Selain itu, pendekatan yang mengutamakan mikroorganisme lokal (*indigenous*) kini semakin banyak diterapkan. Mikroba lokal umumnya telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan setempat, sehingga mampu bekerja lebih optimal dan tahan terhadap variasi suhu, pH, maupun kelembapan yang ada di lokasi. Penggunaan mikroba lokal juga sejalan dengan kebijakan pengelolaan lingkungan yang mendukung keberlanjutan ekosistem mikroba asli (Dewi dkk, 2024).

Pengembangan teknologi pendukung juga menjadi bagian penting dalam meningkatkan efektivitas bioremediasi. Teknologi seperti bioreaktor memungkinkan pengendalian

kondisi degradasi secara presisi, sementara bioventing membantu menyuplai oksigen ke tanah untuk mempercepat proses pembersihan polutan. Kombinasi metode fitoremediasi dengan rekayasa bioteknologi juga membuka peluang baru untuk mengolah limbah dengan memadukan kemampuan penyerapan tanaman dan aktivitas degradasi mikroba, sehingga proses remediasi dapat berlangsung lebih cepat dan efisien (Daeli dan Lase, 2025).

F. Studi Kasus

Studi kasus ini membahas berbagai penerapan bioremediasi di lapangan sebagai solusi pengendalian pencemaran lingkungan melalui pemanfaatan mikroorganisme. Pendekatan ini terbukti efektif untuk menguraikan bahan pencemar berbahaya menjadi senyawa yang lebih aman tanpa menimbulkan dampak negatif tambahan. Setiap kasus yang dibahas menunjukkan variasi teknik, jenis mikroba, dan kondisi lingkungan yang memengaruhi keberhasilan proses remediasi.

Pada tanah pertanian yang tercemar pestisida, bioremediasi memanfaatkan mikroorganisme yang mampu memecah residu kimia melalui proses metabolisme. Salah satu contoh adalah *P. indica* yang dapat mendegradasi insektisida imidakloprid melalui jalur hidrosilasi sehingga menghasilkan metabolit yang tidak berbahaya. Teknik ini dapat dilakukan secara *in situ*, yaitu langsung di lokasi pencemaran, maupun *ex situ* dengan memindahkan media tercemar ke lokasi pengolahan. Metode yang umum digunakan meliputi biostimulasi untuk merangsang mikroba lokal dan bioaugmentasi untuk menambah populasi mikroba dari luar (Daeli dan Lase, 2025).

Kasus pencemaran logam berat timbal (Pb) pada lahan tumpukan sampah menunjukkan potensi bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi. Bakteri dari genus *Bacillus* yang diisolasi dari lokasi tersebut mampu bertahan pada lingkungan dengan konsentrasi Pb tinggi sekaligus menurunkan kadar logam tersebut sebesar 35–69%. Keberhasilan ini menegaskan

pentingnya memanfaatkan mikroorganisme lokal yang telah beradaptasi secara alami terhadap kondisi lingkungan setempat (Widiatno dkk, 2020).

Penerapan bioremediasi juga terlihat pada kasus pencemaran solar, di mana bakteri *Pseudomonas aeruginosa* yang menghasilkan enzim alkana hidroksilase dapat memecah hidrokarbon toksik dalam bahan bakar tersebut. Penggunaan bioreaktor kolom dengan pengaturan variabel seperti suhu, pH, dan aerasi terbukti meningkatkan efektivitas degradasi. Hal ini menunjukkan bahwa penggabungan teknologi pendukung dengan mikroorganisme dapat menghasilkan pengolahan limbah minyak yang lebih cepat dan ramah lingkungan.

Studi kasus lain berfokus pada polutan organik persisten (*Persistent Organic Pollutants/POPs*) yang sulit terurai di lingkungan. Keberhasilan bioremediasi terhadap polutan jenis ini sangat bergantung pada pemilihan mikroba yang tepat serta pengaturan kondisi lingkungan optimal, termasuk ketersediaan nutrisi, oksigen, suhu, dan pH. Teknik biostimulasi dan bioaugmentasi umum diterapkan, di mana mikroba dari lokasi tercemar diisolasi di laboratorium, diperbanyak, dan dikembalikan untuk mempercepat degradasi tanpa bahan kimia berbahaya.

Dalam ekosistem pesisir, pencemaran minyak pada sedimen pantai dapat direduksi melalui teknik bioaugmentasi menggunakan bakteri *Alcanivorax* sp. TE-9. Iklim tropis Indonesia yang hangat dan lembap menjadi faktor pendukung penting karena mempercepat pertumbuhan mikroba pengurai minyak. Kondisi ini membuat proses pemulihan lingkungan laut berlangsung lebih efektif, sekaligus menunjukkan bahwa faktor iklim dan kondisi geografis dapat menjadi penentu keberhasilan bioremediasi di wilayah pesisir (Umroh, 2011).

DAFTAR PUSTAKA

- Arna, Y.D., Bataragoa, E., Purnamasari, Y., Suwarja, S., Dewi, A.P., Hamidatul'Aliyah, S., Astuti, R.A.W., Maulina, N.T.A., Yulyani, S.R., Barung, E.N. and Nurjannah, N.F., (2023). *BIOTEKNOLOGI MIKROBIA*.
- Ayilara, M.S. and Babalola, O.O., 2023. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, 5, p.1183691.
- Daeli, D.E.J. and Lase, N.K., 2025. Pemanfaatan Mikrobiologi dalam Bioremediasi Tanah Pertanian Tercemar Pestisida: Kajian Literatur. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), pp.37-52.
- Darmayani, S., Hidana, R., Sa'diyah, A., Isrianto, P.L., Hidayati, H., Jumiarni, D., Hafsari, A.R., Latumahina, F.S., Setyowati, E., Estikomah, S.A. and Kurniati, S., 2021. *Bioteknologi teori dan aplikasi*.
- Dewi, E.R.S., Nurwahyunani, A., Sari, E.L., Nissa, F.K., AlfinaSeptiana, M., Andriani, D.R. and Azuhro, V., 2024. TEKNIK BIOREMEDIASI SEBAGAI SOLUSI DALAM UPAYA PENGENDALIAN PENCEMARAN LINGKUNGAN: LITERATUR REVIEW. *HUMANITIS: Jurnal Homaniora, Sosial dan Bisnis*, 2(1), pp.124-135.
- Ely, A., Coburn, J., Moore, D., Parker, K., Smith, R. and Calvert, J. (2025). *Exploring environmental biotechnology as a field*.
- Gulo, S.S., Gea, R. and Lase, N.K., 2024. Penggunaan Mikroorganisme Dalam Pengelolaan Limbah Pertanian Untuk Meningkatkan Kesuburan Tanah. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 1(2), pp.88-93.
- Gupta, A., Gupta, R. and Singh, R.L., 2016. Microbes and environment. In Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future (pp. 43-84). *Singapore: Springer Singapore*.

- Isnaeni, I., Calvinia, A.B., Ardiana, A.D., Azzahra, C.S., Santosa, N.R., Miladya, N.F. and Anwar, N.Z., 2024. Bioremediasi Cemaran Tanah Menggunakan Biostimulant. *Camellia: Clinical, Pharmaceutical, Analytical and Pharmacy Community Journal*, 3(2), pp.192-204.
- Suryani, Y., 2022. *Fisiologi mikroorganisme*.
- UMROH, U., 2011. BIOREMIDIASI PENCEMARAN MINYAK di SEDIMEN PANTAI BALONGAN, INDRAMAYU dengan MENGGUNAKAN BAKTERI *Alcanivorax* sp. TE-9 SKALA LABORATORIUM. *Akuatik: Jurnal Sumberdaya Perairan*, 5(2).
- Widiatmono, B.R., Susanawati, L.D. and Agustianingrum, R., 2020. Bioremediasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Bakteri Indigenous Pada Tanah Tercemar Air Lindi (Leachate). *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 6(3), pp.11-18.
- Zendrato, E.T.A. and Lase, N.K., 2025. Peran Mikroorganisme dalam Meningkatkan Produktivitas Tanaman: Pendekatan Bioteknologi Berbasis Mikrobiologi Pertanian. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), pp.142-151.

TENTANG PENULIS



Seftiwan Pratami Djasfar, M.Si. menempuh pendidikan Magister bidang Mikrobiologi di Institut Pertanian Bogor. Saat ini menjabat sebagai Dosen Mikrobiologi di Fakultas Kedokteran UPN Veteran Jakarta. Beberapa buku yang sudah diterbitkan adalah Buku Ajar Mikrobiologi dan Parasitologi, Mikologi, Pengenalan Instrumentasi Laboratorium untuk

Mahasiswa, Bakteriologi untuk Mahasiswa Kesehatan, Analisis Makanan dan Minuman, Antituberkulosis dari Bakteri Endofit, Mikrobiologi, Biologi Medik, Entomologi dan Pengendalian Vektor Penyakit, Bakteriologi 2, Patogen Infeksi, dll. Email penulis: seftiwandjasfar@upnvj.ac.id



Narwati, S.Si., M.Kes Lahir di Muntok sebuah kota kecil yang berada di kepulauan Bangka Belitung pada 09 Juli 1973. Tercatat sebagai lulusan Sarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Adibuana serta lulusan Pasca Sarjana Fakultas Kedokteran Program Studi Ilmu Kedokteran Dasar Universitas Airlangga Surabaya dengan

peminatan Mikrobiologi Kedokteran. Penulis merupakan anak ketiga dari lima bersaudara. Saat ini Penulis aktif bekerja sebagai dosen di Politeknik Kesehatan Kemenkes Surabaya. Sebagai seorang akademisi, penulis berdedikasi dibidang Tri darma Perguruan Tinggi yang memenuhi kewajiban pengajaran, penelitian, serta pengabdian masyarakat. Mata kuliah yang diampu diantaranya Mikrobiologi Lingkungan, Penyehatan Makanan Minuman, Sanitasi Pemukiman dan Teknik Pengambilan Sampel. Beberapa buku ber-ISBN telah dirilis penulis baik buku ajar maupun monograf sebagai bentuk luaran penelitian. Sebagai seorang peneliti, penulis telah beberapa kali memperoleh dana

Hibah Penelitian Kementerian Kesehatan Republik Indonesia sejak tahun 2016 hingga 2025 dan diterbitkan ke jurnal Internasional.
Email :narwati@poltekkes-surabaya.ac.id



dr. Ronald Aprianto Parubak, Sp.MK lahir di Surabaya, pada 30 April 1986. Ia tercatat sebagai lulusan Universitas Wijaya Kusuma Surabaya untuk Sarjana Kedokteran dan Profesi dokter, kemudian melanjutkan Pendidikan Dokter Spesialis Mikrobiologi Klinik di FK Universitas Brawijaya. Pria yang kerap disapa Ronald ini adalah anak dari pasangan Calvyn Parubak (ayah) dan Paulina Bara (ibu). Ronald Aprianto Parubak saat ini menjadi dosen tetap di Institut Ilmu Kesehatan Bhakti Wiyata dan menjadi Ketua Komite Pencegahan dan Pengendalian Infeksi di RS Gigi dan Mulut Bhakti Wiyata Kediri.
Email :ronald.aprianto@iik.ac.id



apt. Muhammad Akmal A Sukara, S. Farm., M. Si Dosen Program Studi S1 Farmasi Fakultas Farmasi Universitas Megarezky Makassar Penulis lahir di Gowa tanggal 11 Mei 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi S1 farmasi Fakultas Farmasi Universitas Megarezky. Penulis Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Farmasi UIN Alauddin Makassar tahun 2011 kemudian melanjutkan Profesi Apoteker dan S2 Farmasi pada Fakultas Farmasi Universitas Hasanuddin Makassar. Pria yang kerap disapa Akmal ini adalah anak dari pasangan Armin Sukara (ayah) dan Ismawati (ibu). Besar Harapan penulis dengan adanya buku ini bisa memberi manfaat kepada para pembaca.



drh. Dicky Andiarsa, M.Ked. lahir di Surabaya, pada 5 April 1979. Pendidikan S1 dan S2 penulis diselesaikan di Universitas Airlangga Surabaya. Penulis telah menjalani profesi sebagai peneliti kesehatan di Kemenkes RI pada tahun 2011-2022, kemudian di BRIN pada tahun 2022-2025, dan menjadi tenaga dosen di Universitas Lambung Mangkurat pada bulan Juli tahun 2025 hingga sekarang. Fokus penelitian penulis adalah pengendalian penyakit infeksi terutama zoonosis, mikrobiologi, parasitologi, entomologi, epidemiologi, dan biostatistik.
Email: andiarsa@gmail.com; andiarsa@ulm.ac.id



apt. Mitha Dwi Puspitasari, M.Farm lahir di Sleman pada tanggal 19 Mei 1988. Menyelesaikan pendidikan Sarjana Farmasi, Profesi Apoteker, dan Magister Farmasi di Universitas Islam Indonesia. Memiliki pengalaman sebagai apoteker praktisi fasilitas pelayanan kefarmasian. Aktif dalam organisasi profesi Ikatan Apoteker Indonesia (IAI). Saat ini, penulis sebagai akademisi di Universitas Alma Ata Fakultas Ilmu Kedokteran dan Ilmu-ilmu Kesehatan Email :mithadp@almaata.ac.id



Apt. Wiwit Zuriati Uno, S.Farm., M.Si lahir di Limboto Kab. Gorontalo, pada 4 Juni 1993 adalah seorang Dosen di Universitas Negeri Gorontalo pada Fakultas Olahraga dan Kesehatan, Jurusan Farmas. Gelar sarjana diperolehnya dari Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi Makassar pada Tahun 2014 kemudian melanjutkan pendidikan S2 di Pascasarjana Universitas Hasanuddin dibidang Sains Farmasi dan berhasil memperoleh gelar Magister Sains pada tahun 2017. Kemudian melanjutkan studi Pendidikan Profesi Apoteker di Universitas Setia

Budi, Solo dan berhasil memperoleh gelar Apoteker pada Tahun 2022. Pada tahun 2018 menjadi Dosen di Fakultas Olahraga dan Kesehatan (FOK), Jurusan Farmasi dalam Bidang Kompetensi Biologi Farmasi. Wanita yang kerap disapa Wiwit ini adalah anak dari pasangan Alm. Prof. Dr. Hamzah B Uno, M.Pd (ayah) dan Dr. Nina Lamatenggo, M.Pd (ibu) selain mengajar di jurusan Farmasi UNG, Wiwit menjadi Dosen Pendamping Pada Program Kreativitas Mahasiswa dibidang Kewirausahaan yang diselenggarakan oleh Simbelmawa dan lolos pendanaan di tahun 2024. Selain itu, aktif di beberapa organisasi seperti Pengurus Daerah PAFI Gorontalo dan Pengurus Cabang IAI Gorontalo. Email: wiwit@ung.ac.id



Siti Raudah, S.Si., M.Si. Lahir di Tanah Grogot Kalimantan Timur, pada 21 Desember 1985. Penulis menempuh pendidikan kuliah pada Program Studi Biologi Strata-1 pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Samarinda Tahun 2007 dan Pendidikan Magister Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas

Mulawarman Tahun 2017. Penulis sebagai pengajar di Program Studi Teknologi Laboratorium Medis Institut Teknologi Kesehatan dan Sains Wiyata Husada Samarinda sejak tahun 2010 – sekarang. Penulis mengajar matakuliah K3 Laboratorium Kesehatan, Mikrobiologi, Bakteriologi Klinik dan Lingkungan. Penulis aktif dalam melakukan penelitian dengan peminatan biokimia – bakteriologi dan Kesehatan Klinis serta lingkungan. Email: sitiraudah@itkeswhs.ac.id



Dr. Ir. Iva Rustanti Eri, MT. Lahir di Surabaya, 17 September 1969. Mulai tahun 1995 sampai sekarang mendedikasikan diri sebagai Dosen di Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Surabaya, dengan pangkat jabatan fungsional sebagai Associate Profesor (Asisten Professor) Mengawali pendidikan tingginya di Fakultas Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh

Nopember (ITS) Surabaya dan lulus sebagai sarjana Teknik Kimia tahun 1991. Selanjutnya menyelesaikan pendidikan Magister dan Doktoral di Dept Teknik Lingkungan ITS, Aktif pada kegiatan ilmiah sebagai invited speaker, fasilitator pelatihan peningkatan kompetensi tenaga kesehatan lingkungan/ teknik lingkungan. Rutinitas penelitian dilakukan dengan berbagai skema penelitian dengan peminatan yang difokuskan pada teknologi air dan limbah cair, sanitasi perkotaan, pembuangan limbah padat dan biomaterial. Karya ilmiahnya telah banyak dipublikasikan pada jurnal nasional dan jurnal internasional bereputasi dan juga dalam bentuk buku ber-ISBN dan diterbitkan oleh beberapa penerbit, dan sebagai peer review pada publikasi internasional bereputasi teknologi air limbah. Pengalaman dalam perencanaan pengelolaan limbah cair, air minum dan daur ulang air sejak tahun 2015 dan memiliki Sertifikat sebagai Perencana Ahli Pengolahan Air Limbah

Email: ivarust.eri@poltekkes-surabaya.ac.id



Dr. Sulistiowati, S.Si, M.Si, yang lahir di Kendal pada 30 Mei 1995, meraih gelar sarjana dalam bidang Ilmu Kelautan dari Universitas Diponegoro pada tahun 2018. Ia melanjutkan pendidikan pascasarjana di IPB University, menyelesaikan program magister pada tahun 2021 dan doktor pada tahun 2024. Wanita yang akrab disapa Sulis ini merupakan putri dari

Bapak H. Abdul Dyabir dan Ibu Hj. Djumiah. Saat ini, Dr. Sulistiowati menjabat sebagai dosen tetap di Program Studi Manajemen Sumberdaya Akuatik, Departemen Perikanan, Fakultas

Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Di samping tugas mengajarnya, ia aktif dalam riset, publikasi, dan penulisan buku, dengan fokus keahlian di bidang pengendalian pencemaran perikanan dan kelautan. Anda dapat menghubunginya melalui email: sulistiowati95@ugm.ac.id.



Bina Rachma Permatasari, SKM, MKM lahir di Jakarta pada tanggal 20 Maret 1985. Ia tercatat sebagai lulusan DIII dan DIV Politeknik Kesehatan Jakarta II jurusan Kesehatan Lingkungan dan Epidemiologi Kesehatan Lingkungan. Pendidikan S1 dan S2 di lanjutkan di Universitas Indonesia. Wanita yang kerap di panggil Bina memulai riwayat pekerjaannya di

PT Etos Indonusa, lalu mendapatkan SK Kedinasan oleh Kementerian Kesehatan dengan penempatan di puskesmas Kabupaten Natuna Kepulauan Riau. Pada tahun 2020 melanjutkan kedinasan di Politeknik Kesehatan Jakarta II sampai dengan sekarang. Email : bina@poltekkesjkt2.ac.id