

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Penulis

Muhammad Faizal
Fathurrohim
Andi Indrawati
Mujahidah Basarang
Andi Fatmawati
Dodi Satriawan
I Wayan Suanda
Ni'matul Murtafi'ah
Waode Rustiah
Nur Anny Suryaningsih
Taufieq
Rahmawati
Ahmad Zil Fauzi



MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

**Muhammad Faizal Fathurrohim
Andi Indrawati
Mujahidah Basarang
Andi Fatmawati
Dodi Satriawan
I Wayan Suanda
Ni'matul Murtafi'ah
Waode Rustiah
Nur Anny Suryaningsih Taufieq
Rahmawati
Ahmad Zil Fauzi**



PT GLOBAL EKSEKUTIF TEKNOLOGI

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Penulis :

Muhammad Faizal Fathurrohman
Andi Indrawati
Mujahidah Basarang
Andi Fatmawati
Dodi Satriawan
I Wayan Suanda
Ni'matul Murtafi'ah
Waode Rustiah
Nur Anny Suryaningsih Taufieq
Rahmawati
Ahmad Zil Fauzi

ISBN : 978-623-198-315-2

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

Penyunting: Mila Sari, M.Si.

Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penerbit : PT GLOBAL EKSEKUTIF TEKNOLOGI

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jl. Pasir Sebelah No. 30 RT 002 RW 001
Kelurahan Pasie Nan Tigo Kecamatan Koto Tengah
Padang Sumatera Barat
Website : www.globaleksekutifteknologi.co.id
Email : globaleksekutifteknologi@gmail.com

Cetakan pertama, Mei 2023

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

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan judul Mikrobiologi Lingkungan dapat diselesaikan dengan kerjasama tim penulis. Buku ini berisi tentang tentang ruang lingkup dan sejarah mikrobiologi lingkungan, keanekaragaman mikroba dan bentuk interaksinya pada lingkungan, pertumbuhan mikroba, metabolisme mikroba, mikroba tanah dan siklus biogeokimia, metode pengambilan sampel dan kultur mikroba dari lingkungan, mikroba dan polutan organik, mikroba dan logam berat, bioremediasi, bioenergi, isu global keterkaitan aktivitas manusia dan pengaruhnya terhadap mikroorganisme.

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

Padang, Mei 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
BAB 1 RUANG LINGKUP DAN SEJARAH MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN	
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Sejarah Mikrobiologi Lingkungan	3
1.3 Bioremediasi	6
1.4 Teknologi EM (<i>Effective microorganism</i>)	8
1.5 Bio Augmentasi	10
1.6 Perananan Bakteri Pada Mikrobiologi Lingkungan	11
DAFTAR PUSTAKA	14
BAB 2 KEANEKARAGAMAN MIKROBA DAN BENTUK INTERAKSINYA PADA LINGKUNGAN	
2.1 Pendahuluan	17
2.2 Struktur dan Ukuran Mikroorganisme	18
2.3 Keanekaragaman Mikroba	21
2.4 Bentuk Interaksi Mikroba dengan Lingkungan	28
2.4.1 Interaksi Menguntungkan (<i>Beneficial</i>)	29
2.4.2 Interaksi Merugikan (<i>Detrimental/harmful</i>)	31
2.4.3 Netralisme	32
DAFTAR PUSTAKA	33
BAB 3 PERTUMBUHAN MIKROBA	
3.1 Pendahuluan	35
3.2 Laju Pertumbuhan	36
3.3 Kurva Pertumbuhan	37
3.3.1 Fase lamban (<i>lag</i>)	37
3.3.2 Fase Eksponensial	38
3.3.3 Fase Stasioner	38
3.3.4 Fase Penurunan	38
3.4 Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan	39
3.4.1 Kebutuhan Nutrisi	39
3.4.2 Faktor Fisik	42
3.5 Metode Pengukuran Pertumbuhan Mikroorganisme	45
3.5.1 Penghitungan Jumlah Sel secara Mikroskopis	45
3.5.2 Perhitungan Kultur di Cawan Petri	46
3.5.3 Turbidimetri	47
DAFTAR PUSTAKA	49
BAB 4 METABOLISME MIKROBA	
4.1 Pendahuluan	51
4.2 Pengertian Metabolisme	51
4.3 Klasifikasi Mikroba Berdasarkan Sumber Karbon dan Energi	53
4.4 Enzim	54

4.4.1 Struktur dan Fungsi Enzim.....	54
4.4.2 Faktor Penghambat Kerja Enzim	58
4.5 Katabolisme.....	61
4.5.1. Katabolisme Karbohidrat.....	61
4.5.2. Katabolisme Lipid dan Protein	68
4.6 Respirasi Sel.....	70
4.7 Fermentasi.....	73
4.8 Fotosintesis	79
DAFTAR PUSTAKA.....	84
BAB 5 MIKROBA TANAH DAN SIKLUS BIOGEOKIMIA	
5.1 Pendahuluan	85
5.2 Tanah Merupakan Laboratorium Biologi.....	86
5.3 Mikroba Tanah.....	87
5.4 Bakteri	88
5.5 Peranan Mikroba Tanah	90
5.5.1 Biofertilizer	91
5.5.2 Biodekomposer.....	92
5.5.3 Bioamelioran	92
5.5.4 Daur Biogeokimia	93
DAFTAR PUSTAKA.....	97
BAB 6 METODE PENGAMBILAN SAMPEL DAN KULTUR MIKROBA DARI LINGKUNGAN	
6.1 Pendahuluan	99
6.2 Pengambilan Sampel.....	100
6.2.1. Sampel pada Tanah.....	101
6.2.2 Sampel Air.....	104
6.3. Metode Kultur Murni.....	105
6.4 Swab (<i>Cutting Bud</i>)	108
6.5 Metode Cuplikan Endofit.....	109
6.6 Metode Seri Pengenceran (<i>Plating Methode</i>)	111
DAFTAR PUSTAKA.....	114
BAB 7 MIKROBA DAN POLUTAN ORGANIK	
7.1 Pendahuluan	117
7.2 Polutan.....	118
7.3 Mikroba	120
7.3.1 Jenis Polutan sebagai Substrat Pertumbuhan Bakteri Agen Bioremediasi	121
7.3.2 Aplikasi Mikroba Dalam Degradasi Polutan	122
7.3.3 Biodegradasi Bahan Polutan.....	125
DAFTAR PUSTAKA.....	127
BAB 8 MIKROBA DAN LOGAM BERAT	
8.1 Pendahuluan	129
8.2 Mikroba	130

8.3 Logam Berat	132
8.4 Pencemaran Logam Berat	133
8.5 Penggunaan Bakteri untuk Mereduksi Logam Berat	136
8.6 Mekanisme Pemisahan Logam oleh Mikroorganisme	139

DAFTAR PUSTAKA.....141

BAB 9 BIOREMEDIASI

9.1 Pendahuluan	143
9.2 Tipe-Tipe Bioremediasi	144
9.2.1 Bioremediasi In Situ	144
9.2.2 Bioremediasi Ex Situ	146
9.3 Teknik Bioremediasi	146
9.3.1 Bioaugmentasi	146
9.3.2 Biofilter	147
9.3.3 Bioreaktor	147
9.3.5 Bioventing	148
9.3.6 Biopile	148
9.3.7 Pengomposan	148
9.4 Organisme yang Terlibat dalam Proses Bioremediasi	150
9.5 Aplikasi Bioremediasi	151
9.6 Penutup	156

DAFTAR PUSTAKA.....157

BAB 10 BIOENERGI

10.1 Pendahuluan	159
10.2 Jenis Bioenergi	163
10.2.1 Bioenergi Padat (Biomassa)	165
10.2.2 Bioenergi Cair (Biofuel)	166
10.2.3 Bioenergi Gas (Biogas)	166
10.3 Kegunaan Bioenergi	167
10.4 Biomassa	172
10.4.1 Karakteristik Biomassa	174
10.4.2 Komposisi Biomassa	176
10.4.3 Pengolahan Biomassa (Karbonisasi dan Biokimia)	179
10.5 Biofuel	180
10.6 Biogas	187
10.6.1 Bahan Baku Penghasil Biogas	188
10.6.2 Proses Pembentukan Biogas	189
10.6.3 Cara Pembuatan Biogas	191

DAFTAR PUSTAKA.....194

BAB 11 ISU GLOBAL KETERKAITAN AKTIVITAS MANUSIA DAN PENGARUHNYA TERHADAP MIKROORGANISME

11.1 Pendahuluan	197
11.1.1 Definisi Aktivitas Manusia	198
11.1.2 Pentingnya Memahami Hubungan dengan Mikroorganisme	198
11.2 Mikroorganisme dan Peranannya dalam Lingkungan	199

11.2.1 Mikroorganisme dalam Ekosistem.....	200
11.2.2 Interaksi Mikroorganisme dengan Aktivitas Manusia	205
11.3 Aktivitas Manusia dan Dampaknya Terhadap Mikroorganisme.....	206
11.3.1 Penggundulan Hutan / Deforestasi.....	207
11.3.2 Polusi	208
11.3.3 Perubahan Iklim	210
DAFTAR PUSTAKA.....	213
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Fanny Angelina Eilshemius	4
Gambar 1.2. Proses Bioremediasi.....	7
Gambar 1.3 Produk EM4	9
Gambar 1.4 Proses augmentasi mikroba	11
Gambar 2.1. Perbedaan Struktur Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik.....	21
Gambar 2.2. Ragam Bentuk Virus.....	23
Gambar 2.3. Sel bakteri dengan struktur halus pili dan fimbriae	25
Gambar 2.4. Jamur Mikroskopik	26
Gambar 2.5. Jenis-Jenis Protozoa.....	27
Gambar 2.6. Kelompok Alga: a) Ganggang Hijau-Biru; b) Spirogyra; c) Ulothrix; d) Chlamydomonas	28
Gambar 3.1. Kurva Pertumbuhan Bakteri	37
Gambar 3.2. Pengaruh Suhu terhadap Kecepatan Pertumbuhan.....	43
Gambar 3.3. Penghitungan Jumlah Sel secara Langsung.....	46
Gambar 3.4. Prosedur Pengenceran Berseri-Agar Lempeng	47
Gambar 3.5. Pengukuran Pertumbuhan Mikroba Berdasarkan Kekeruhan.....	48
Gambar 4.1. Metabolisme meliputi katabolisme dan anabolisme. Jalur anabolik membutuhkan energi untuk mensintesis molekul yang lebih besar. Jalur katabolik menghasilkan energi dengan memecah molekul yang lebih besar. Kedua jenis jalur ini diperlukan untuk menjaga keseimbangan energi sel	52
Gambar 4.2. Enzim menurunkan energi aktivasi reaksi kimia	56
Gambar 4.3. Pengikatan koenzim atau kofaktor pada apoenzim sering kali diperlukan untuk membentuk holoenzim yang aktif.....	58
Gambar 4.4. (a) Pengikatan inhibitor alosterik mengurangi aktivitas enzim, tetapi pengikatan aktivator alosterik meningkatkan aktivitas enzim. (b) Penghambatan umpan balik, di mana produk akhir jalur berfungsi sebagai penghambat non-kompetitif terhadap enzim di awal jalur, merupakan mekanisme penting regulasi alosterik dalam sel.....	60
Gambar 4.5. Fase investasi energi dari jalur glikolisis Embden- Meyerhof-Parnas menggunakan dua molekul ATP untuk memfosforilasi glukosa, membentuk dua molekul gliseraldehid 3-fosfat (G3P). Fase pembayaran energi memanfaatkan energi dalam molekul G3P, menghasilkan empat molekul ATP, dua molekul NADH, dan dua piruvat.....	63
Gambar 4.6. ATP yang dibuat selama glikolisis adalah hasil dari fosforilasi tingkat substrat. Salah satu dari dua reaksi	

enzimatik dalam fase hasil energi dari glikolisis Embden Meyerhof-Parnas yang menghasilkan ATP dengan cara ini ditunjukkan di sini.....	64
Gambar 4.7. Siklus Krebs, juga dikenal sebagai siklus asam sitrat, dirangkum di sini. Perhatikan asetil dua karbon yang masuk menghasilkan keluaran utama per putaran berupa dua CO ₂ , tiga NADH, satu FADH ₂ , dan satu molekul ATP (atau GTP) yang dibuat oleh fosforilasi tingkat substrat. Diperlukan dua putaran siklus Krebs untuk memproses semua karbon dari satu molekul glukosa.....	67
Gambar 4.8. Banyak organisme menggunakan zat antara dari siklus Krebs, seperti asam amino, asam lemak, dan nukleotida, sebagai bahan penyusun biosintesis	67
Gambar 4.9. Hasil maksimum ATP secara teoritis dari berbagai proses selama respirasi aerobik lengkap satu molekul glukosa.....	73
Gambar 4.10. Reaksi kimia dari fermentasi alkohol ditunjukkan di sini	76
Gambar 4.11. Reaksi fotosintesis yang bergantung pada cahaya (kiri) mengubah energi cahaya menjadi energi kimia, membentuk ATP dan NADPH. Produk ini digunakan oleh reaksi yang tidak bergantung pada cahaya untuk memfiksasi CO ₂ , menghasilkan molekul karbon organik	79
Gambar 4.12. (a) Fotosintesis pada eukariota berlangsung di dalam kloroplas, yang mengandung tilakoid yang ditumpuk menjadi grana. (b) Prokariota fotosintetik memiliki daerah lipatan pada membran plasma yang berfungsi seperti tilakoid. (kredit: data batang skala dari Matt Russell).....	81
Gambar 5.1 Dua Golongan Organisme Tanah	87
Gambar 5.2 Golongan Flora (Tumbuhan) yang Terdapat Didalam Tanah.....	88
Gambar 5.3 Kegunaan Bakteri Bagi Tanah	89
Gambar 5.4 Ion yang dapat Dioksidasi dan Direduksi oleh Bakteri.....	89
Gambar 5.5 Jenis Bakteri yang Bermanfaat bagi Tanah	90
Gambar 5.6 Peran Mikroba Tanah	91
Gambar 5.7 Peran Biofertilizer pada Mikrobial Tanah	91
Gambar 5.8. Peran Biodekomposer pada Mikrobial Tanah	92
Gambar 5.9. Unsur dalam Daur Biogeokimia	93
Gambar 5.10. Bakteri yang Berperan didalam Daur Fosfat	94
Gambar 5.11. Bakteri yang Berperan didalam Daur Sulfur	95
Gambar 6.1. Pengambilan Sampel rizosfer tanaman Bambu dan Cool Box bertingkat atau serial dilution	102

Gambar 6.2. Pengenceran Sampel Tanah Kohe Sapi dekat Akar Tanaman	103
Gambar 6.3. Koloni Mikroba Tumbuh pada Media	105
Gambar 6.4. Teknik Sebar	106
Gambar 6.5. Teknik Gores	107
Gambar 6.6. Teknik Tabur	107
Gambar 6.7. Tahapan Isolasi Mikroba untuk mendapatkan Mikroba Murni	108
Gambar 6.8. Pengambilan Sampel dari Bagian Tanaman untuk isolasi	110
Gambar 6.9. Jamur Hasil Pemurnian	111
Gambar 6.10. Seri Pengenceran secara Bertingkat	113
Gambar 7.1. Proses Self-Purification di sungai yang diadopsi pada IPAL	123
Gambar 7.2. Proses Isolasi, identifikasi dan Perbanyakkan Inokulum	124
Gambar 7.3. Perbanyakkan inokulum Skala Pilot Fermentasi Vitamin B12 Menggunakan <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	125
Gambar 8.1. Proses bioakumulasi senyawa logam berat oleh bakteri ...	134
Gambar 9.1 Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 5 hari	153
Gambar 9.2. Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 10 hari	154
Gambar 9.3 Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 15 hari	154
Gambar 9.4. Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 20 hari	155
Gambar 10.1 Skelma Pelmanfaatan Bioelnelrgi	169
Gambar 10.2 Telknologi Konvelrsi Biomassa	170
Gambar 10.3 Biopowelr dari pelmbakaran Biomassa	171
Gambar 10.4. Biopowelr dari Palm Oil Mills Elffluelnt	171
Gambar 10.5. Skelmatik Combinel Helat Powelr (CHP)	172
Gambar 10.6. Contoh Limbah/Relsidu Pelrtanian	177
Gambar 10.8 Kelmiri selbagai salah satu Bahan Baku Biofuell	182
Gambar 10.9 Relaksi Transelstelrifikasi Minyak Nabati melnjadi Biodielsell	183
Gambar 10.10 Prosels Pelmbuatan Biodielsell dari Minyak Nabati	185
Gambar 10.11 Kooran Telrtnak Selbagai Bahan Baku Biogas	189

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Bioakumulasi dan biotransformasi senyawa organik oleh bakteri.....	8
Tabel 1.2 Bakteri pendegradasi logam berat	13
Tabel 2.1. Karakteristik Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik	20
Tabel 3.1 Unsur-unsur yang Ditemukan dalam Organisme Hidup.....	40
Tabel 3.2. Faktor Pertumbuhan Mikroba	41
Tabel 4.1. Hasil maksimum ATP secara teoritis dari berbagai proses selama respirasi aerobik lengkap satu molekul glukosa...	73
Tabel 4.2. Perbandingan Respirasi Versus Fermentasi	75
Tabel 4.3. Jalur Fermentasi Umum	73
Tabel 10.1 Karakteristik Bioenergi dibanding dengan Energi baru Terbarukan lainnya.....	164
Tabel 10.2 Potensial Belbelrapa Limbah Pertanian Pelnghasil Biomassa di Indonesia.....	178
Tabel 10.3 Standar Biodiesel Menurut ASTM D6751	186
Tabel 10.4 Potensi Produksi Kotoran Peternakan.....	192

BAB 1

RUANG LINGKUP DAN SEJARAH MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Oleh Muhammad Faizal Fathurrohlim

1.1 Pendahuluan

Langkah besar telah dibuat dalam memperluas pengetahuan kita di bidang genetika, evolusi, dan keanekaragaman, namun kita masih belum memiliki gagasan yang jelas tentang bagaimana pengetahuan ini dapat diintegrasikan ke dalam pemahaman dan pengendalian mikroorganisme di lingkungan atau bahkan bagaimana membiakkan banyak mikroorganisme. Mikrobiologi lingkungan mungkin paling erat kaitannya dengan bidang ekologi mikroba. Ilmu ini terdiri dari studi tentang interaksi mikroorganisme dalam suatu lingkungan, baik itu udara, air, atau tanah. Perbedaan utama antara dua bidang adalah mikrobiologi lingkungan adalah bidang terapan di mana pertanyaan pendorongnya adalah bagaimana kita dapat menggunakan pemahaman kita tentang mikroorganisme di lingkungan untuk memberi manfaat bagi masyarakat? Akibatnya, subjek yang tercakup dalam buku teks ini tidak sama dengan yang tercakup dalam teks tradisional tentang ekologi mikroba. Ilmu mikrobiologi lingkungan dapat mempengaruhi begitu banyak aspek kehidupan dengan mudah dikaitkan antar dengan lingkungan. Bidang mikrobiologi lingkungan berinteraksi dengan sejumlah subspecialisasi yang berbeda, termasuk tanah, akuatik, dan aeromikrobiologi, serta bioremediasi, kualitas air, kesehatan kerja dan pengendalian infeksi, keamanan pangan, dan mikrobiologi industri.

Dalam mikrobiologi lingkungan modern, patogen dan bioremediasi tetap menjadi dasar bidang ini. Kedua kasus bidang

studi ini telah sangat ditingkatkan melalui penerapan genetika molekuler dan bioteknologi. Misalnya, pengembangan dan penilaian metode baru untuk mendeteksi dan menghilangkan patogen dalam persediaan air dan makanan kita, serta lingkungan dalam ruangan yang kita tinggali saat ini, telah menjadi sangat penting bagi kesehatan masyarakat dengan pertumbuhan populasi global.

Upaya kebersihan manusia dan lingkungan memiliki dampak terbesar dalam mengurangi penderitaan manusia selama satu abad terakhir. Hal berlaku karena kita melihat evolusi bentuk baru dan lebih ganas dari patogen yang ditularkan melalui lingkungan. Hal ini dilatarbelakangi oleh kekhawatiran akan penyebaran SARS dan potensi penyebaran flu burung yang cepat. Pengembangan vaksin seringkali tidak cukup cepat untuk menjamin perlindungan sehingga ahli mikrobiologi lingkungan harus siap mengembangkan metode yang lebih baik untuk mengurangi atau menghentikan penyebaran agen ini ke seluruh lingkungan.

Mikrobiologi lingkungan berkaitan dengan peran mikroorganisme dalam mendukung lingkungan yang berkembang, dan layak huni. Mikrobiologi lingkungan membantu untuk mengetahui sifat dan fungsi populasi mikroba yang berada di semua bagian biosfer yaitu udara, air, dan tanah. Mikroba diketahui mempengaruhi lingkungan baik secara negatif maupun positif, karena kontaminasi mereka dapat menyebabkan masalah kesehatan yang serius di satu sisi, sedangkan berbagai kegiatan kesejahteraan seperti degradasi bahan organik, menjadi sumber nutrisi dalam rantai makanan, daur ulang nutrisi, dan bioremediasi. polutan juga terkait dengan mereka di sisi lain. Di satu sisi, kepentingan praktis mereka menjadikan mereka alat khusus di tangan ahli mikrobiologi lingkungan untuk mengurangi dampak buruk dari berbagai masalah lingkungan (Sharma, et al., 2022).

Potensi degradasi mikroba memberi mereka tempat dalam mengolah air limbah, mengandung kotoran organik dan anorganik yang berasal dari arena publik dan industri di mana mineral, nutrisi, dan sejumlah produk sampingan ramah lingkungan lainnya juga dihasilkan. Spesies mikroba seperti *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, dan *Wolinella* adalah beberapa di antara spesies yang biasanya terlibat dalam proses degradasi limbah berbahaya yang terus ditambahkan ke lingkungan, sehingga memastikan keamanan dan kelangsungan yang terakhir. Selain itu, kemampuan degradasi mereka juga membantu mereka untuk secara efektif menghadapi dan mengatasi masalah tumpahan minyak di perairan laut yang mengakibatkan kerusakan ekologis yang lebih sedikit. Manipulasi mikroba di masa sekarang telah mendapatkan tempat yang cukup penting dalam kehidupan kita di mana disiplin mikrobiologi lingkungan ini berkontribusi dengan mengungkap semua kemungkinan pemanfaatan mikroba untuk keuntungan kita.

1.2 Sejarah Mikrobiologi Lingkungan

Mikrobiologi lingkungan adalah studi tentang mikroorganisme yang ada di lingkungan alami atau buatan. Asal usul penelitian ilmiah di bidang ini terletak pada pengamatan Antony van Leewenhoeck yang diterbitkan pada tahun 1677. Van Leewenhoeck menggunakan mikroskop ciptaannya sendiri untuk menemukan apa yang disebutnya "animalcula", atau "binatang kecil" yang hidup dan berkembang biak di air hujan, air sumur, air laut, dan air dari pencairan salju. Selama berabad-abad, perluasan pengetahuan kita tentang mikroorganisme lingkungan telah didasarkan pada pengamatan dan eksperimen yang semakin rinci, di mana kita telah dibantu oleh kemajuan dalam mikroskop dan pengembangan alat biokimia dan matematika. Namun, banyak dari topik individu yang sejak itu kita kenali dan karakterisasi dengan lebih baik dalam mikrobiologi lingkungan pada awalnya dijelaskan dalam publikasi van Leewenhoeck (Mitchell and Gu, 2001).

Fanny Angelina Eilshemius lahir pada tahun 1850 dari keluarga imigran Belanda. Pada tahun 1874 menikah dengan dokter Jerman, Walther Hesse yang bekerja pada laboratorium Koch pada tahun 1881. Hesse mempelajari bakteri yang berhubungan dengan kesehatan masyarakat dan metabolisme bakteri dibantu oleh istrinya. Ketika itu media untuk pertumbuhan bakteri menggunakan gelatin sebagai bahan pematat, kesulitan timbul ketika Hesse ingin mengetahui jumlah mikroba udara pada saat musim panas karena gelatin meleleh. Eilshemius mendapatkan informasi dari tetangganya, seorang migran dari Jawa saat di New York, bahwa mereka membuat puding dari agar yang tidak meleleh meskipun udara sangat panas. Eilshemius mengusulkan untuk mencoba menggunakan agar sebagai agen pematat dan ternyata hasilnya sangat memuaskan. Agar menjadi pengganti gelatin yang menakjubkan karena beberapa nilai komparatif yang dimiliki, yaitu:

1. tidak beracun;
2. meleleh pada suhu 100 C dan membeku pada suhu sekitar 45 C;
3. tidak bersifat toksik pada organisme lain;
4. stabil pada suhu sterilisasi;
5. secara fisiologis cukup tahan karena jarang ada mikroba mampu menghidrolisis agar.



Gambar 1.1. Fanny Angelina Eilshemius

Sumber: mujeresconciencia.com

Dengan ditemukannya agar sebagai agen pematat media pertumbuhan mikroba, maka perkembangan mikrobiologi semakin pesat. Pada era tahun 70-an mikrobiologi lingkungan

mulai diperkenalkan dengan fokus perhatian pada kesehatan masyarakat dan lingkungan. Ilmu ini berkembang karena adanya masalah lingkungan dan kesehatan yang melibatkan mikroorganisme. Sebelum periode 1970, penyebaran penyakit melalui air, udara, dan makanan marak terjadi. Akibatnya, bidang ilmu ini melahirkan metode desinfeksi dan penyaringan sumber air sebelum dikonsumsi.

Hal ini terus berkembang hingga mencakup bidang yang luas dan berkaitan dengan bidang ilmu lainnya. Adapun yang paling erat kaitannya yaitu ekologi mikroba. Meskipun erat kaitannya, tetapi kedua bidang ilmu tersebut memiliki sudut pandang dan tujuan yang berbeda. Perbedaan utama antara ekologi mikroba dan mikrobiologi lingkungan yaitu bahwa mikrobiologi lingkungan merupakan ilmu terapan yang mengacu pada kenyataan bagaimana kita memahami manfaat kehadiran mikroba di alam.

Berdasarkan hal tersebut secara spesifik Hurst et al., (1997) mendefinisikan bahwa mikrobiologi lingkungan merupakan studi tentang keberadaan mikroba pada lingkungan alami maupun buatan. Adapun ekologi mikroba yaitu ilmu yang mempelajari interrelasi atau interaksi antara mikroba dengan lingkungannya baik lingkungan biotik maupun abiotik. Menurut Maier et al., (1999) mikrobiologi lingkungan didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari pengaruh penerapan mikroba pada lingkungan, aktivitas, kesehatan, dan kesejahteraan manusia. Dengan demikian mikrobiologi lingkungan harus dapat menerima keterlibatan manusia dalam mengatur dan memanipulasi aktivitas mikroba.

Bourquin pada tahun 1990 dengan mengambil bahan yang tercemar kemudian diolah di dalam reaktor. Penelitian Bourquin ini menggunakan bioreaktor untuk mengolah lumpur atau air tanah di North Dakota, Amerika Serikat (AS) yang tercemar berat oleh 2,4-D dan zat-zat lain akibat kebakaran gudang penyimpanan pestisida. Pada penelitian ini bakteri *Alcaligenes eutrophus*, nitrogen, dan fosfor dimasukkan ke dalam reaktor untuk mempercepat biodegradasi polutan organik. Selama penelitian ini sekitar 11.000 meter kubik tanah dan bahan padat lain serta

24 juta liter air tanah dapat dilenyapkan polutannya, sehingga lokasi yang telah dibioremediasi tersebut dapat dimanfaatkan kembali.

Seiring dengan berjalannya waktu mikrobiologi telah mengalami perkembangan yang pesat menjadi beragam ilmu, antara lain virologi, bakteriologi, mikologi, mikrobiologi pangan, mikrobiologi tanah, dan mikrobiologi industri. Ilmu tersebut mempelajari mikroorganisme secara spesifik, rinci, dan menurut pemanfaatannya. Berbagai sifat mikroorganisme yang menjadikan dasar seringnya digunakan sebagai model penelitian di bidang genetika adalah memiliki sifat sangat sederhana, berkembangbiakan sangat cepat, dan adanya berbagai variasi metabolisme. Pada saat ini penelitian berkaitan dengan mikroorganisme dilakukan secara intensif untuk mengetahui dasar fenomena biologi.

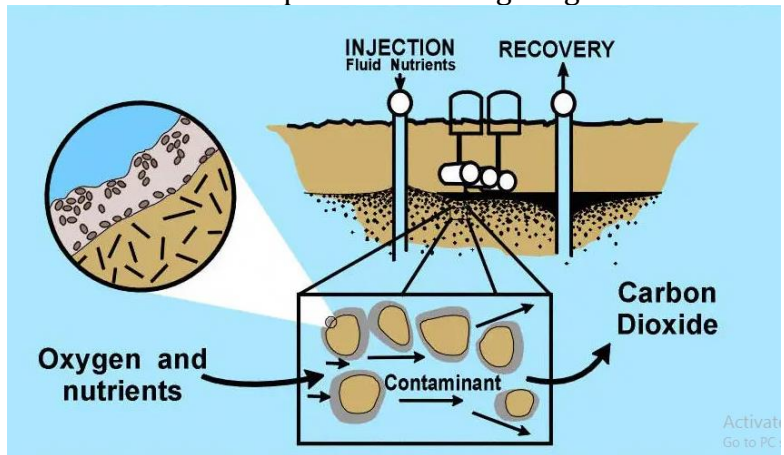
Pada awal perkembangannya mikrobiologi lingkungan, berfokus pada kualitas air dan ancaman kehadiran mikroba patogen, dengan demikian tinjauan utamanya adalah dalam konteks perlindungan kesehatan masyarakat. Dengan perkembangan yang terjadi di berbagai aspek kehidupan manusia, maka mikrobiologi lingkungan berkembang antara lain, meliputi mikrobiologi tanah, air, dan udara, bioremediasi, kualitas air, kontrol penyakit dan kesehatan, keamanan pangan serta industri.

1.3 Bioremediasi

Bioremediasi merupakan penggunaan mikroorganisme yang telah dipilih untuk ditumbuhkan pada polutan tertentu sebagai upaya untuk menurunkan kadar polutan tersebut. Pada saat proses bioremediasi berlangsung, enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi struktur polutan beracun menjadi tidak kompleks sehingga menjadi metabolit yang tidak beracun dan berbahaya (Priadie, 2012). Pemerintah Indonesia telah mempunyai payung hukum yang mengatur standar baku kegiatan bioremediasi dalam mengatasi permasalahan lingkungan akibat kegiatan pertambangan dan

perminyakan serta bentuk pencemaran lainnya (logam berat dan pestisida).

Kementerian Lingkungan Hidup, Kep Men LH No.128 tahun 2003, mengatur tentang tatacara dan persyaratan teknis pengelolaan limbah minyak bumi dan tanah yang terkontaminasi oleh minyak bumi secara biologis dengan menggunakan mikroba lokal. Mikroorganisme dari kelompok bakteri, khamir, dan kapang merupakan kelompok utama yang berperan penting dalam bioremediasi limbah pencemar di lingkungan.



Gambar 1.2. Proses Bioremediasi

Sumber: Jurnalpost.com

Proses utama pada bioremediasi adalah biodegradasi, biotransformasi dan biokatalis. Saat bioremediasi terjadi, enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi polutan beracun dengan mengubah struktur kimia polutan tersebut. Enzim mempercepat proses tersebut dengan cara menurunkan energi aktivasi, yaitu energi yang dibutuhkan untuk memulai suatu reaksi. Pada proses ini terjadi biotransformasi atau biodegradasi senyawa toksik menjadi senyawa yang kurang toksik atau tidak toksik. Pada Tabel 1.1 bakteri yang dapat melakukan proses bioakumulasi dan biotransformasi terhadap bahan kimia beracun.

Tabel 1.1 Bioakumulasi dan biotransformasi senyawa organik oleh bakteri

Bakteri	Kimia Beracun
<i>Bacillus sp</i>	Cresol, fenol, aromatik, alkana rantai panjang.
<i>Pseudomonas sp</i>	Benzen, antrasin, hidrokarbon, PCBs
<i>Flavobacterium sp</i>	Aromatik
<i>Azotobacter sp</i>	Aromatik
<i>Xanthomonas sp</i>	Hidrokarbon, Hidrokarbon polisiklik
<i>Nocardia sp</i>	Hidrokarbon
<i>Streptomyces sp</i>	Fenosiasetat, Hidrokarbon halogen, diazinon
<i>Mycobacterium sp</i>	Aromatik, hidrokarbon benzen bercabang, siklofarafin

Sumber: Evitasari et., al (2020)

1.4 Teknologi EM (*Effective microorganism*)

Effective Microorganisms (EM) merupakan kultur campuran dari mikroorganisme yang menguntungkan bagi petumbuhan tanaman. EM4 yang dikenal saat ini adalah EM4 yang diaplikasikan sebagai inokulan untuk meningkatkan keanekaragaman dan populasi mikroorganisme di dalam tanah dan tanaman, yang selanjutnya dapat meningkatkan kesehatan, pertumbuhan, kuantitas dan kualitas produksi tanaman. Pencampuran bahan organik seperti pupuk kandang atau limbah rumah tangga dan limbah pertanian dengan EM4 merupakan pupuk organik yang sangat efektif untuk meningkatkan produksi pertanian. Campuran ini disamping dapat digunakan sebagai

stater mikroorganisme yang menguntungkan yang ada didalam tanah juga dapat memberikan respon positif terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Wididana, 1994).

Tanah yang sehat dan air bersih terpelihara oleh keragaman dan keseimbangan komunitas mikroorganisme di dalamnya. Misalnya, bila keseimbangan mikroorganisme di dalam tanah terganggu, tanah akan menjadi miskin dan tanaman tidak dapat tumbuh dengan baik. Namun, jika mikroorganisme asli diaktifkan, kondisi tanah akan membaik. Ketika mikrobiologi tanah seimbang, tanaman akan sehat, sehingga lebih tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh stresor seperti penyakit atau serangga berbahaya.



Gambar 1.3 Produk EM4
Sumber: pakolesonline.com

Di sungai yang tercemar, spesies yang tidak dapat bertahan hidup di lingkungan yang terdegradasi mati dan ekosistem menjadi terdegradasi. Sebaliknya, jika keragaman mikroorganisme kaya, kemampuan memurnikan diri alami meningkat dan air bersih akan kembali. Alasan EM dapat menyelesaikan masalah yang dilakukannya adalah karena EM mengembalikan keseimbangan mikroorganisme yang sehat dalam ekosistem, sehingga meningkatkan kemampuan pemurnian dirinya.

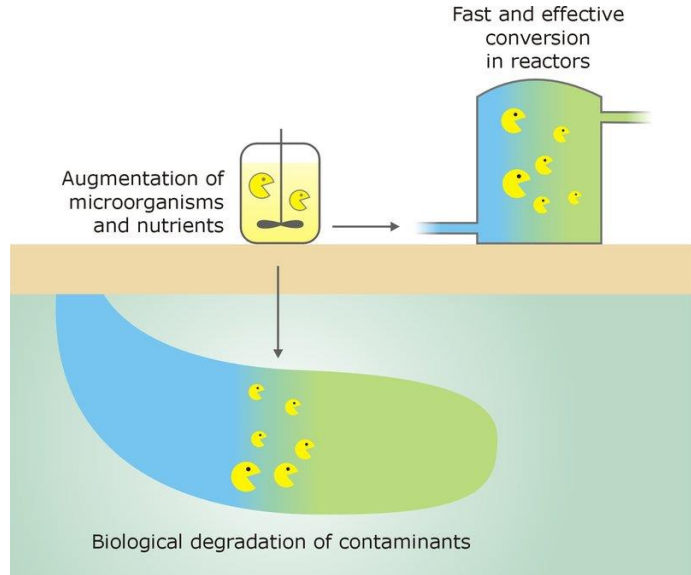
EM, yang memperlakukan mikroorganisme sebagai agregat, dikembangkan jauh sebelum ilmu mikrobioma menarik

perhatian dunia dan keefektifannya telah dibuktikan selama tiga dekade di seluruh dunia pada lahan di daerah tropis dan beriklim dingin. Efek menguntungkan dari EM dihasilkan ketika kelompok mikroorganisme di EM 1, termasuk bakteri asam laktat, ragi dan bakteri fototropik, mengaktifkan mikroorganisme asli di lingkungan dan memanfaatkan kekuatan intrinsiknya.

1.5 Bio Augmentasi

Bio augmentasi merupakan salah satu mekanisme biodegradasi. Mikroorganisme (alami/eksotis/rekayasa) yang memiliki kemampuan metabolisme spesifik di lokasi yang terkontaminasi untuk membantu meningkatkan degradasi limbah. Oleh karena itu, bioaugmentasi sesuai dengan peningkatan kumpulan gen dan dengan keragaman genetik.

Pada prinsipnya keragaman genetik ini dapat ditingkatkan dengan menambah keragaman mikroba. Proses ini dapat ditingkatkan dengan penambahan mikroorganisme secara terus menerus ke bioreaktor untuk pengolahan air tanah di atas tanah. Inokulan komersial dari biakan yang diperkaya yang terdiri dari satu atau lebih spesies mikroba telah berhasil digunakan untuk menjajah lingkungan yang terkontaminasi di mana komunitas mikroba intrinsik bekerja pada logam. Untuk meningkatkan pertumbuhan populasi mikroorganisme alami dengan cepat dan meningkatkan degradasi mikroorganisme kontaminan sangat diperlukan. Mikroba dikumpulkan dari lokasi remediasi, dikultur secara terpisah, dimodifikasi secara genetik dan dikembalikan ke lokasi. Paling umum, proses ini digunakan dalam pengolahan air limbah kota untuk menghidupkan kembali bioreaktor lumpur aktif. Jika tanah dan air tanah terkontaminasi dengan etana terklorinasi, seperti tetrakloro etilen dan trikloroetilen, bioaugmentasi digunakan untuk memastikan bahwa mikroorganisme *in situ* dapat sepenuhnya mendegradasi kontaminan ini menjadi etilen dan klorida yang sifatnya tidak beracun. Bioaugmentasi dilakukan di lingkungan yang terkontaminasi minyak sebagai strategi alternatif untuk bioremediasi (Tegene and Tenkegna, 2020).



Gambar 1.4 Proses augmentasi mikroba
Sumber: bioclearearth.com

Bioaugmentasi dapat digunakan tidak hanya untuk membersihkan kontaminasi, tetapi juga dapat diterapkan untuk merangsang kesehatan dan kualitas tanah. Selain itu, bioaugmentasi dapat meningkatkan proses produksi, fermentasi, dan filter biologis.

1.6 Perananan Bakteri Pada Mikrobiologi Lingkungan

Mikrobiologi lingkungan juga meneliti bagaimana mikroba dapat digunakan untuk memecahkan masalah global. Misalnya, seorang ahli mikrobiologi lingkungan dapat mempelajari penggunaan mikroba untuk membersihkan tumpahan minyak atau area terkontaminasi lainnya atau menggunakan organisme yang tumbuh subur di elemen tertentu untuk membuat obat, tabir surya topikal, dan larutan pemurnian air.

Mikroorganisme memiliki peranan dalam memecahkan, mengurangi, bahkan menghilangkan bahaya polutan di lingkungan. Pemanfaatan mikroba sangat menguntungkan dalam pengelolaan lingkungan sebab bentuknya yang kecil, cepat berkembang biak, sangat mudah tersebar di alam dan dapat bertahan hidup di luar inang. Mikroba baik bakteri maupun jamur sangat penting dalam melakukan penguraian sehingga dapat mengurangi pencemaran yang ada di lingkungan.

Efek mikroba pada lingkungannya dapat bermanfaat atau berbahaya atau tidak terlihat sehubungan dengan tindakan atau pengamatan manusia. Pengaruh paling signifikan dari mikroba di bumi adalah kemampuannya untuk mendaur ulang unsur-unsur utama yang membentuk semua sistem kehidupan, terutama karbon, oksigen, dan nitrogen (N). Produksi primer melibatkan organisme fotosintetik yang mengambil CO_2 dari atmosfer dan mengubahnya menjadi bahan organik (seluler). Proses ini juga disebut fiksasi CO_2 , dan ini menyumbang sebagian besar karbon organik yang tersedia untuk sintesis bahan sel. Dekomposisi atau biodegradasi menghasilkan penguraian bahan organik kompleks menjadi bentuk karbon lain yang dapat digunakan oleh organisme lain. Tidak ada senyawa organik alami yang tidak dapat diurai oleh beberapa mikroba, meskipun beberapa senyawa sintetik seperti teflon, plastik, insektisida, dan pestisida terurai sangat lambat atau tidak terurai sama sekali.

Melalui proses metabolisme mikroba fermentasi dan respirasi, molekul organik akhirnya dipecah menjadi CO_2 yang dikembalikan ke atmosfer untuk proses produksi primer yang berkelanjutan. Fiksasi nitrogen biologis adalah proses yang hanya ditemukan pada beberapa bakteri yang menghilangkan N_2 dari atmosfer dan mengubahnya menjadi amonia (NH_3), untuk digunakan oleh tumbuhan dan hewan. Fiksasi nitrogen juga menghasilkan pengisian kembali nitrogen tanah yang dihilangkan oleh proses pertanian. Sehingga seiring dengan semua manfaat tersebut, mikroba sangat berperan dalam menjaga kelestarian lingkungan. Salah satu peranan penting mikroba adalah dalam mendegradasi logam berat.

Tabel 1.2 Bakteri pendegradasi logam berat

Bakteri	Logam Berat
<i>Bacillus sp</i>	Cu, Zn
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	U, Cu, Ni, Cr
<i>Aerococcus sp</i>	Pb, Cr, Cd
<i>Aeromonas sp</i>	Cr
<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	Pb, Cr, Cd
<i>Citrobacter sp</i>	Cd, U, Pb

Sumber: Evitasari et., al (2020)

Dari sudut pandang toksikologi, logam berat dapat dibagi dalam 2 jenis, yang pertama adalah logam berat esensial, dimana keberadaannya dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme hidup, namun dalam jumlah yang berlebihan dapat beracun. Contoh logam berat ini adalah Zn, Cu, Fe, Co, Mn dan lain sebagainya. Jenis kedua adalah logam berat tidak esensial atau beracun, dimana keberadaannya dalam tubuh belum diketahui manfaatnya atau bahkan dapat bersifat racun, seperti Hg, Cd, Pb, Cr dan lain-lain. Logam berat ini dapat mempengaruhi kesehatan bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh. Pada Tabel 2,1 merupakan bakteri yang dapat mendegradasi logam berat. Selain itu, kapang (*Penicillium chrysogenum*, *Rhizopus stolonifer* dan *Aspergillus oryzae*) dan khamir, *Saccharomyces cerevisiae*) mampu melakukan remediasi terhadap logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Evitasari., Sukono, G. A. B., Hikmawan, F. R., and Satriawan, D. 2020. Karakter Organisme Biologis Dalam Bioremediasi-Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan*. Vol. 2 (2): 33 – 39. Doi: 10.35970/jppl.v2i2.350
- Gupta, A. Gupta, R. Singh, RL. 2016. *Microbes and Environment. Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*. Nature Public Health Emergency Collection. pp: 15:43–84. doi: 10.1007/978-981-10-1866-4_3
- Jekti, D. S. D. 2018. Peranan Mikroba Dalam Pengelolaan Lingkungan. *Prosiding Seminar Pendidikan Biologi*. 1 – 9.
- Maier, M.R., Pepper, I.L., & Gerba, C.P. 1999. *Environmental Microbiology*. Sandiego: Prentice-Hall.
- Maier, R. M., Pepper, I. L., and Gerba, C. P. 2009. *Environmental Micobiology*. Elsevier Public health Emergency Collection. 3 – 7. doi: 10.1016/B978-0-12-370519-8.00001-8.
- Mitchell, R., and Gu, J. D. 2001. *Environmental Microbiology Second Edition*. American Society for Microbiology. Washington DC.
- Priadie, B. 2012. Teknik Bioremediasi Sebagai Alternatif Dalam Upaya Pengendalian Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. Vol. 10 (1): 38 – 48.
- Sharma, D., Bhardwaj, S., Pujari, M., Bhardwaj, R., and Kapoor, D. 2022. *Environmental Microbiology: Introduction and Scope, Environmental Microbiology: Advanced Research and Multidisciplinary Applications*. doi.org/10.2174/9781681089584122010003
- Suhendrayatna. 2001. Bioremoval logam berat dengan menggunakan mikroorganisme. Suatu kajian kepustakaan (heavy metal bioremoval by microorganism: a literature study. Synergy forum- ppi Tokyo institute of technology

- Tegene, B. C., and Tenkegna, T. A. 2020. Mode of Action, Mechanism and Role of Microbes in Bioremediation Service for Environmental Pollution Management. *Journal of Biotechnology and Bioinformatics Research*. Vol. 2 (3): 1 – 18.
[doi.org/10.47363/JBBR/2020\(2\)118](https://doi.org/10.47363/JBBR/2020(2)118).
- Wididana, G.N. 1994. Application of Effective Microorganism (EM) and Bokashi on Natural Farming. *Bulletin Kyusei Nature Farming*. Vol. 03 (2): 47 – 54.

BAB 2

KEANEKARAGAMAN MIKROBA DAN BENTUK INTERAKSINYA PADA LINGKUNGAN

Oleh Andi Indrawati

2.1 Pendahuluan

Mikroorganisme atau mikroba merupakan organisme yang berukuran sangat kecil (diameter kurang dari 0,1 mm) yang tidak tampak oleh kasat mata, hanya bisa diamati dengan menggunakan mikroskop. Di alam, mikroorganisme terdapat dimana-mana, baik di dalam air, tanah, udara dan juga pada jaringan tubuh manusia (baik pada kulit maupun selaput lendir). Dalam kehidupan sehari-hari, mikroorganisme mempunyai peranan yang amat besar, terutama dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan juga dalam bidang kesehatan. Peranan mikroorganisme di alam ada yang menguntungkan dan ada yang merugikan.

Mikroba juga berfungsi sebagai dekomposer dalam siklus makanan di alam, dengan demikian mikroba dapat dimanfaatkan untuk mengatasi masalah pencemaran lingkungan. Pengelolaan lingkungan dengan memanfaatkan mikroba sangat menguntungkan, karena bentuknya yang kecil, berkembang biak dengan cepat, mampu bertahan hidup di luar inang dan sangat mudah tersebar di alam (Soelistya and Jekti, 2018).

2.2 Struktur dan Ukuran Mikroorganisme

Berdasarkan jumlah sel penyusun tubuh, mikroorganisme terdiri atas dua jenis, yaitu uniseluler (satu sel) dan multiseluler (banyak sel). Sedangkan berdasarkan tipe sel, mikroorganisme terbagi atas sel prokariotik dan sel eukariotik. Kedua tipe sel ini mempunyai persamaan yakni sama-sama memiliki susunan kimiawi yang serupa, tersusun atas karbohidrat, lipid, protein, dan asam nukleat, melakukan proses metabolisme makanan menggunakan reaksi kimia, membentuk protein, dan menyimpan energi. Adapun perbedaan sel prokariotik dengan sel eukariotik terletak pada struktur dinding sel dan membran sel, serta ada tidaknya organel sel, yaitu struktur seluler yang terspesialisasi dengan fungsi yang spesifik (Padoli, 2016).

Baik prokariot maupun eukariot memiliki komponen-komponen sel sebagai berikut:

- 1) Membran sel, yang bersifat selektif dan berperan sebagai barier
- 2) Sitosol, terdapat di dalam sel, berbentuk semifluida, seperti jelly, sebagai tempat tersuspensinya semua komponen sel
- 3) Kromosom, sebagai pembawa gen yang terangkai di dalam DNA
- 4) Ribosom, yang berfungsi sebagai tempat sintesis protein (Nurhayati and Darmawati, 2017).

a. Sel Prokariotik

Sel prokariotik mampu beradaptasi dan bertahan hidup pada kondisi yang tidak menguntungkan. Umumnya prokariot memiliki ukuran sel yang lebih kecil dari eukariot, yakni berkisar 0,5-2,0 μm , lebih kecil dari eritrosit manusia (sekitar 7,5 μm). Prokariot tersusun atas sel tunggal (uniseluler) dan memiliki materi genetik berupa DNA yang belum terbungkus oleh membran nukleus, tetapi hanya berupa massa dengan derajat kekentalan yang lebih tinggi dibandingkan kekentalan sitoplasma disekitarnya, sehingga disebut sebagai nukleoid. Selain itu, prokariot juga dikatakan sebagai sel yang belum mempunyai inti yang jelas (Prayitno and Hidayati, 2017).

Sel prokariotik tidak mempunyai organela, tetapi mempunyai sistem membran dalam dinding selnya, sehingga struktur selnya dikatakan masih sangat sederhana. Memiliki membran sel dan sitoplasma sebagai tempat berlangsungnya aktivitas sel (Nurhayati and Darmawati, 2017). Sel prokariotik terdiri atas suatu struktur permukaan termasuk membran plasma dan komponen dinding sel, kapsul, lapisan lendir (slime), sitoplasma, dan materi genetik (DNA). Yang termasuk sel prokariotik adalah Archaea (Archaeobacteria) dan Bacteria (Eubacteria). Sebagian sel prokariotik ada yang memiliki pigmen fotosintesis seperti ditemukan pada *Cyanobacteria* (Irianto, 2008; Padoli, 2016).

Kelompok Prokariotik terbagi atas:

1) Archaea (Archaeobacteria)

Perbedaan Archaea dengan kelompok prokariot lainnya terletak pada molekul rRNA 16S-nya, ciri morfologi dan fisiologinya. Membran selnya mengandung eter yang berangkai dengan lipid dan berikatan dengan gliserol, dinding sel mengandung D-asam amino, asam muramat serta peptidoglikan. Metabolismenya bersifat kemoorganotrof dan ada juga yang ototrof. Salah satu contoh Archaea yaitu: bakteri metanogenik (*Methanococcus*, *Methanobacillus*, dan *Methanosarcina*), yang bisa membentuk metana melalui reduksi CO₂ dan bersifat anaerob obligat dengan menggunakan elektron dari hasil oksidasi hidrogen atau senyawa organik sederhana (metanol dan asetat).

2) Bacteria (Eubacteria)

Kelompok ini dikenal dengan bakteri yang hidup bebas di alam, bersifat saprofitik, parasitic, fotosintetik, ataupun patogenik pada organisme lainnya. Umumnya melakukan pembelahan biner atau transversal (Irianto, 2008).

b. Sel Eukariotik

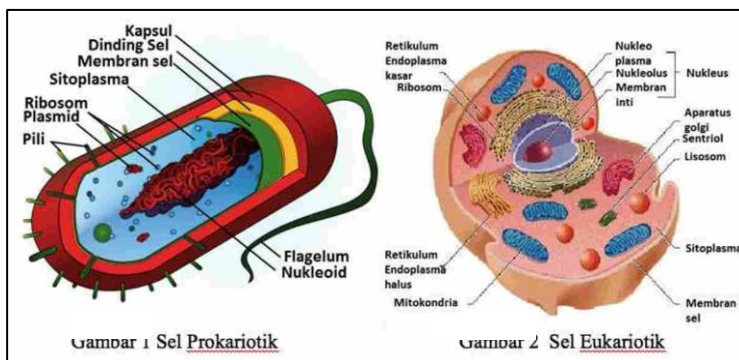
Sel eukariotik memiliki inti sel yang dikelilingi oleh membran dan mempunyai organel yang lebih lengkap seperti mitokondria, ribosom, retikulum endoplasma (RE), lisosom, apparatus (badan) golgi, nukleus, kloroplas, peroksisom, vakuola, dan lain-lain. Organel dan komponen sel lainnya berada pada sitosol bersama dengan nukleus disebut protoplasma. Organisme yang tergolong prokariot adalah protista, fungi, tanaman, dan hewan (Padoli, 2016; Prayitno and Hidayati, 2017).

Tabel 2.1. Karakteristik Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik

Karakteristik	Sel Prokariotik	Sel Eukariotik
Ukuran sel	Diameter sel 1-10 μm	Diameter sel 10-100 μm (sel sperma terpisah dari ekornya, berukuran lebih kecil)
Struktur Sitoplasma	Sederhana	Terstruktur dengan adanya membran intraseluler dan sitoskeleton
Inti sel	Tanpa inti sejati disebut nukleoid	Dengan inti sejati disebut nukleus
DNA (bahan gen)	Berbentuk sirkuler, bercampur dengan sitoplasma	Berbentuk <i>double heliks</i> dengan protein histon, terdapat pada mitokondria, inti sel dan kloroplas (tumbuhan)
Sintesis RNA/Protein	Berlangsung di sitoplasma	Sintesis RNA berlangsung di dalam inti, dan sintesis protein di sitoplasma
Organel Sel	Tidak ada (kecuali ribosom)	Ada
Ribosom	70 S	80 S
Pergerakan Sel	Memiliki flagela yang tersusun atas protein flagelin	Memiliki flagela dan silia yang tersusun atas protein tubulin
Alat Respirasi	Mesosom	Mitokondria
Kloroplas	Tidak ada	Terdapat pada alga dan tanaman

Karakteristik	Sel Prokariotik	Sel Eukariotik
Organisasi	Uniseluler	Umumnya multiseluler, namun ada juga yang uniseluler
Pembelahan Sel	Pembelahan biner	Mitosis dan sitoskeleton
Jenis Organisme	Bakteri, alga hijau biru	Protista, fungi, alga, tanaman, hewan

Sumber: (Padoli, 2016; Sastry Apurba Sankar and K. Sandhya Bhat, 2018)



Gambar 2.1. Perbedaan Struktur Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik

(Sumber: <https://www.pelajaran.co.id/struktur-sel-pengertian-sel-prokariotik-dan-sel-eukariotik-lengkap/>)

Mikroorganisme disebut juga sebagai jasad renik karena ukurannya yang sangat kecil (mikron= μ atau milimikron= $m\mu$). Untuk lebih jelasnya, perhatikan ukuran panjang berikut:

-1 meter (m) = 1000 milimeter (mm)

-1 mm = 1000 mikron (μ)

-1 μ = 1000 milimikron ($m\mu$)

Ukuran jasad renik tergantung dari jenis dan fase pertumbuhannya. Mikroorganisme dapat diukur menggunakan obyek mikrometer dan okuler mikrometer (Padoli, 2016).

2.3 Keanekaragaman Mikroba

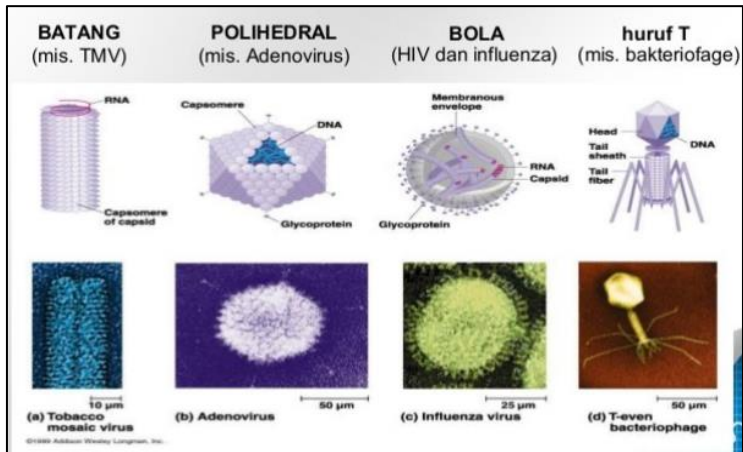
Keanekaragaman mikroorganisme atau mikroba yang terdapat di alam sangat banyak, yang digolongkan ke dalam virus,

bakteri, archaea, fungi, protozoa, dan alga mikroskopis. Virus, bakteri, dan archaea termasuk golongan prokariota, sedangkan fungi, protozoa, dan alga mikroskopis termasuk golongan eukariota (Padoli, 2016).

a. Virus

Virus merupakan partikel kecil dengan diameter berukuran 20-300 nm, mampu menginfeksi organisme lain seperti bakteri, protozoa, jamur, alga, tumbuhan, hewan, maupun manusia. Virus dikatakan sebagai benda tidak hidup, karena hanya mampu hidup pada sel inang hidup, sehingga disebut sebagai parasit obligat intraseluler. Virus hanya memiliki kapsid, yaitu berupa lapisan eksternal dan mengandung asam nukleat (DNA atau RNA saja) serta enzim. Enzim yang dikandung virus sedikit atau bahkan tidak memiliki enzim. Asam nukleat diselubungi oleh protein pelindung, yaitu berupa selubung yang terdiri atas protein, lipid, dan glikoprotein. Asam nukleat dapat ditransfer ke sel lainnya dengan adanya sintesis dari struktur yang terspesialisasi. Virus dikatakan aseluler karena tidak mempunyai sitoplasma, nukleus, dan organel. Virus memiliki virion, yaitu sebuah partikel virus yang didalamnya terdapat asam nukleat (DNA atau RNA saja), kapsid, dan pembungkus eksternal atau amplop.

Virus dapat menginfeksi organisme lainnya dengan istilah bakteriofaga atau faga yang digunakan untuk virus yang menginvasi sel-sel prokariotik. Infeksi virus bisa memberikan efek yang kecil ataupun tidak memberikan efek sama sekali pada sel penjamu, tetapi bisa juga mengakibatkan kerusakan ataupun kematian sel. Virus yang menyebabkan penyakit pada manusia dapat diketahui keberadaannya berdasarkan tempat perkembangbiakannya saat menginfeksi, misal: pada saluran pencernaan, saluran pernapasan, kulit, mukosa genitalis atau plasenta. Bentuk virus ada yang bulat (bola), polyhedral, batang, dan ada yang seperti huruf T (Prayitno and Hidayati, 2017; Suprobowati and Kurniati, 2018).



Gambar 2.2. Ragam Bentuk Virus

(Sumber: <https://www.merdeka.com/jatim/mengenal-bentuk-virus-dari-variasi-ukuran-dan-komposisi-kimiawinya-klm.html?page=4>)

b. Bakteri

Bakteri adalah mikroorganisme yang mempunyai dinding sel. Adanya kandungan dinding sel ini bakteri dimasukkan dalam kelompok tumbuhan. Namun berdasarkan klasifikasi makhluk hidup dengan sistem 5 dunia, maka bakteri dimasukkan ke dalam dunia monera. Struktur sel bakteri mencakup struktur bagian luar dan bagian dalam, antara lain: flagellum, pilus, fimbriae, kapsul, dinding sel, membran sel, mesosom, ribosom, nukleoid, dan spora. Bentuk sel bakteri ada yang bulat (coccus), batang (basil), dan spiral.

Dinding sel bakteri memiliki struktur yang keras dan kaku, berperan sebagai pelindung dan memberikan kekakuan. Dinding sel yang kaku karena adanya kandungan peptidoglikan sebagai komponen utama, yang terdiri dari molekul N-acetyl muramic acid (NAM) dan N-acetyl glucosamine (NAG). Pada bagian tertentu dinding sel terdapat juga LPS yang bersifat imunogenik dan berperan sebagai faktor virulensi. Bakteri Gram positif memiliki peptidoglikan yang lebih tebal dan mengandung asam teikoat, sedangkan bakteri Gram negatif memiliki lapisan peptidoglikan yang lebih tipis, terdapat bagian tambahan seperti:

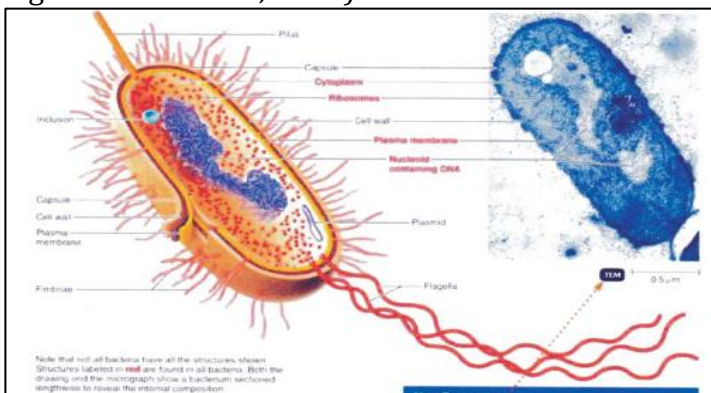
- 1) membran luar
- 2) lipopolisakarida (LPS) yang terdiri dari:
 - a) Lipid A atau endotoksin,
 - b) Inti polisakarida,
 - c) Rantai samping O (Sastry Apurba Sankar and K. Sandhya Bhat, 2018).

Peranan bakteri bagi makhluk hidup lainnya ada yang menguntungkan dan ada yang merugikan, misalnya:

- a. Bidang kesehatan; bakteri berperan menguraikan sisa-sisa pencernaan makanan dalam usus besar manusia.
- b. Bidang pangan; bakteri digunakan dalam industri makanan (contoh pada pembuatan *nata de coco*).
- c. Bidang lingkungan; bakteri dimanfaatkan sebagai pengurai senyawa organik yang terdapat dalam lingkungan agar siklus materi dan energi berjalan lancar.
- d. Bidang bioteknologibakteri, misalnya dalam menghasilkan insulin.

Adapun bakteri yang dapat merugikan makhluk hidup lainnya, antara lain:

- a. Bakteri-bakteri patogen yang dapat menimbulkan berbagai penyakit infeksi, baik oleh bakteri Gram positif maupun bakteri Gram negatif.
- b. Bakteri-bakteri yang menyebabkan kerusakan bahan pangan (Boleng Didimus Tanah, 2015).



Gambar 2.3. Sel bakteri dengan struktur halus pili dan fimbriae
(Sumber: Boleng Didimus Tanah, 2015).

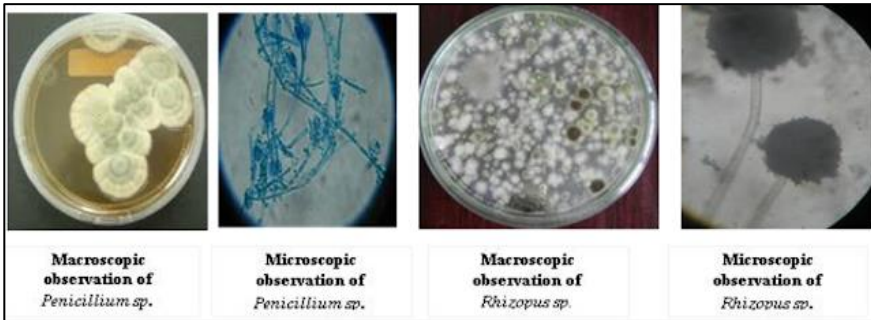
c. Fungi

Fungi termasuk organisme eukariotik dengan bentuk yang beragam dan bersifat saprofit. Fungi mempunyai inti sel dan organella yang bermembran, serta tubuh berbentuk filamen, yang disebut hifa. Selanjutnya hifa ini akan tumbuh membentuk jaringan yang dinamakan miselium.

Berdasarkan bentuk morfologinya, ada empat kelompok utama fungi, yaitu:

1. Yeast (Ragi); bentuk selnya bulat hingga oval, bereproduksi dengan bertunas, misalnya: *Saccharomyces cerevisiae* dan *Cryptococcus neoformans*
2. Yeast like (Seperti ragi); selnya ada sebagai ragi dengan *pseudohyphae*, misalnya: *Candida*
3. Molds (Jamur); selnya tumbuh menjadi filamen bercabang panjang sekitar 2–10 μm yang disebut hifa, misalnya: *Dermatofita*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Mucor*, dan lain-lain.
4. Jamur Dimorfik: ada yang sebagai jamur (bentuk hifa) di lingkungan pada suhu sekitar 25°C dan sebagai ragi di jaringan manusia pada suhu tubuh (37°C), contoh:
 - *Histoplasma capsulatum*, *Blastomyces dermatitidis*, *Coccidioides*, *Paracoccidioides*.
 - *Penicillium marneffe* dan *Sporothrix schenckii*.

Fungi bersifat heterotrof (kemoorganotrof). Nutrien diabsorpsi dari lingkungan di luar tubuhnya dan mengekskresi enzim-enzim hidrolisis dengan konsentrasi tinggi disekeliling makanannya. Enzim-enzim tersebut memecah senyawa-senyawa kompleks menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana, hingga jamur mampu mengabsorpsi senyawa organik ke dalam tubuh dan menggunakannya (Prayitno and Hidayati, 2017; Sastry Apurba Sankar and K. Sandhya Bhat, 2018).

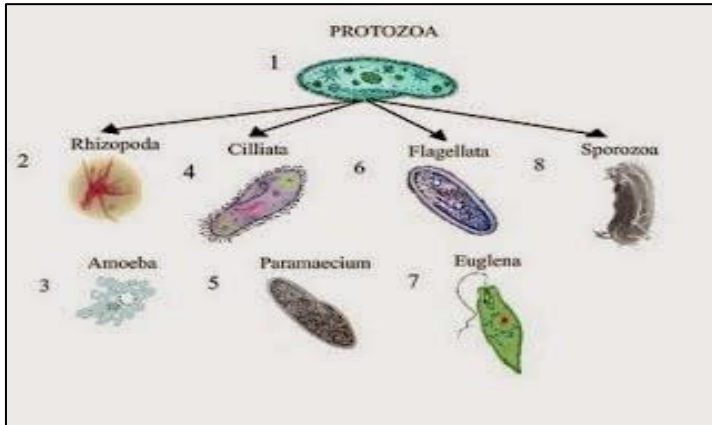


Gambar 2.4. Jamur Mikroskopik

(Sumber: <https://www.referensibiologi.com/2019/02/praktikum-mikologi-pengenalan-mikroskopik-jamur.html>)

d. Protozoa

Protozoa disebut juga sebagai protista mirip hewan, umumnya uniseluler, namun beberapa berbentuk koloni. Protozoa bersifat heterotroph, umumnya hidup bebas, namun ada juga yang komensalis (hidup dalam/pada organisme tanpa merugikan), serta beberapa parasit. Kebanyakan protozoa hidup di lingkungan berair dan kering jika kondisi lingkungan tidak menguntungkan. Beberapa protozoa dilindungi oleh partikel luar yang keras. Umumnya bergerak dengan alat gerak, namun ada juga yang tidak mempunyai alat gerak. Oleh karena itu, protozoa dikelompokkan berdasarkan ada tidaknya alat gerak. Klasifikasi protozoa dibagi atas 4 kelas, yakni: Mastigophora, Sarcodina, Sporozoa (Apicomplexa), dan Ciliata (Ciliophora) (Prayitno and Hidayati, 2017).



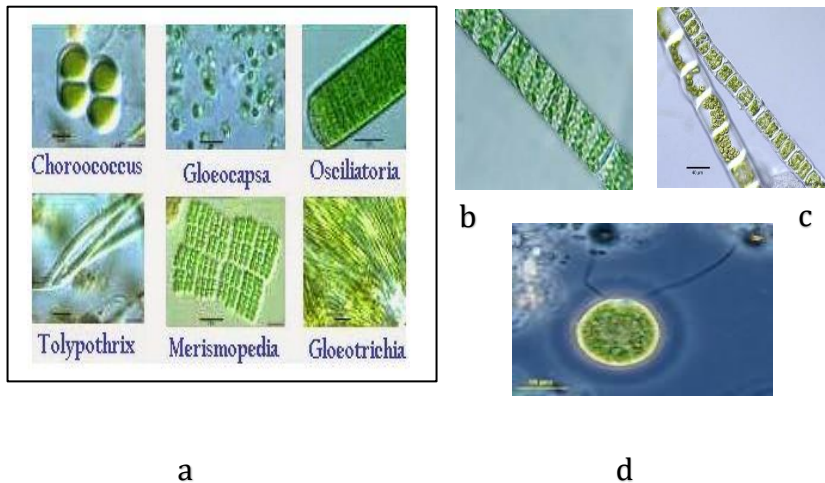
Gambar 2.5. Jenis-Jenis Protozoa

(Sumber: <https://www.medrec07.com/2015/01/defenisi-mikrobiologi-dan-parasitologi.html>)

e. Algae

Kelompok Algae ada dua, yakni: algae prokariotik (*blue green algae*) dan algae eukariotik. Algae prokariotik disebut juga protista, uniseluler, mampu berfotosintesis dan membelah diri. Sedangkan algae eukariotik dapat uniseluler ataupun multiseluler, motil dengan flagella atau non motil. Umumnya algae mempunyai dinding sel yang tersusun atas selulosa, ada juga yang mengandung silika atau kalsium karbonat. Inti sel dan organel dibungkus oleh membran. Alga sebagai organisme fotosintetik mempunyai beragam bentuk dan warna dengan adanya kloroplas yang mengandung berbagai pigmen warna, seperti klorofil (pigmen hijau), pigmen kuning, merah, dan coklat. Ukuran panjangnya bervariasi dari 1 μm sampai 100 meter. Alga ada yang uniseluler/mikroalga dengan struktur sederhana, namun ada juga multiseluler/makroalga yang memiliki struktur kompleks dan berkoloni. Alga memiliki dinding sel yang kompleks dan membran tipis yang fleksibel disebut *pellicle*, bergerak dengan flagel, meluncur atau mengikuti arah cahaya untuk dapat berfotosintesis. Alga berperan sebagai produsen akuatik dan penghasil oksigen dimuka bumi. Pengelompokkan algae berdasarkan bentuk, pigmen dan

habitat. Contoh algae: *Clamydomonas*, *Spirogyra* sp, *Euglena* sp, *Diatomae* sp, *Volvox globator*, dan lain-lainnya (Irianto, 2008; Prayitno and Hidayati, 2017).



Gambar 2.6. Kelompok Alga: a) Ganggang Hijau-Biru; b) *Spirogyra*; c) *Ulothrix*; d) *Clamydomonas*

(Sumber: <https://toptenid.com/kelompok-alga-biru-yang-dapat-mengikat-nitrogen-bersimbiosis-dengan-tumbuhan-biji-adalah>; <https://aulyarohmana16.wordpress.com/2014/12/12/pengenalan-alga/>)

2.4 Bentuk Interaksi Mikroba dengan Lingkungan

Mikroorganisme atau mikroba yang terdapat di alam melakukan interaksi atau asosiasi dengan sesama mikroorganisme ataupun organisme lainnya dalam suatu keseimbangan ekologis. Umumnya mikroba cenderung dihubungkan dengan penyakit, infeksi, serta pembusukan. Namun kenyataannya sebagian besar mikroba bisa memberikan kontribusi yang berarti bagi keseimbangan ekosistem lingkungan hidup, khususnya bagi kesejahteraan manusia (Padoli, 2016). Pada hubungan tersebut terbentuk suatu pola interaksi spesifik yang dikenal dengan symbiosis (*sym*=bersama, *bios*=hidup). Interaksi dan interrelasi antara organisme ini ada yang saling

menguntungkan (bersimbiosis) dan ada juga yang merugikan (antagonistik).

Bentuk interaksi diantara organisme atau populasi dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- a. Interaksi Positif atau Menguntungkan (*beneficial*):
 - 1) saling menguntungkan (*mutualism*)
 - 2) komensalisme (*commensalism*)
 - 3) proto-koperasi (*proto-cooperation*)
- b. Interaksi Negatif atau Merugikan (*detrimental/harmful*):
 - 1) amensalisme (*amensalism*)
 - 2) bersaing (*competition*)
 - 3) parasit (*parasitism*)
 - 4) predasi (*predation*)
- c. Netralisme

2.4.1 Interaksi Menguntungkan (*Beneficial*)

1) Mutualisme (*symbiosis*)

Interaksi mutualisme merupakan asosiasi atau interaksi yang saling menguntungkan diantara dua populasi atau disebut simbiosis. Simbiosis mutualistik ini sifatnya sangat spesifik dan memerlukan kedekatan fisik, sehingga tidak dapat digantikan oleh spesies lain, contoh antara lain:

- a) Lichens (lumut kerak) merupakan asosiasi antara ganggang atau bakteri biru hijau (*Blue Green Algae*=BGA) atau *Cyanobacteria* dengan fungi. Ganggang terlindung dari cekaman hifa fungi, sedangkan fungi mendapatkan nutrisi dari BGA karena mampu menambat Nitrogen (N) dari udara.
- b) Simbiosis Rhizobia-Legum (*Rhizobium-legume association*). Pada hubungan ini, bakteri terlindung dari cekaman lingkungan serta mendapatkan nutrisi dari tanaman inang (*micro symbiont*), sedangkan tanaman inang (*macro symbiont*) memperoleh nutrisi berupa Nitrogen (N) dari hasil penambatan N oleh *Rhizobium*. Simbiosis antara *Rhizobium* dengan tanaman legum yang membentuk bintil (nodula) pada akar tanaman oleh

kelompok bacteria Rizobia, dan bintil pada batang (*stem nodulation*) oleh bakteri *Azorhizobium* sp pada tanaman *Sesbanita* sp.

- c) Mikoriza merupakan bentuk simbiosis mutualistik antara perakaran tumbuhan tingkat tinggi dengan cendawan tanah (Basidiomycetes, Ascomycetes dan Zygomycetes). Tumbuhan inang memperoleh air, nutrisi, proteksi biologis dan lain-lainnya, sedangkan cendawan mendapatkan fotosintat sebagai sumber karbon.

2) Komensalisme

Komensalisme merupakan bentuk interaksi yang menguntungkan satu pihak (populasi A), namun pihak lain (populasi B) tidak dirugikan atau diuntungkan. Contoh: populasi anaerob fakultatif menggunakan oksigen dan menurunkan tekanan oksigen sehingga terbentuk habitat yang cocok untuk pertumbuhan mikroba anaerob obligat. Mikroba ini memperoleh keuntungan dari aktivitas organisme fakultatif dan perubahan lingkungan, sedangkan organisme fakultatif tidak diuntungkan ataupun dirugikan.

3) Proto-koperasi (*Proto-cooperation*)

Proto-koperasi merupakan hubungan mutualistik antara dua spesies/partner yang bersifat non obligatori, yang dikenal sebagai mutualisme fakultatif. Bentuk asosiasi ini yang menguntungkan dalam ekosistem pertanian antara lain:

- a) sinergisme antara cendawan mikoriza (CMA) dengan tanaman legum dan *Rhizobium*.
- b) sinergisme antara mikroba pelarut fosfat dengan legum (*Phospahte Solubilize Microbe-legume plants*) dan *Rhizobium*.
- c) sinergisme antara perakaran tanaman dengan PGPR (*plant growth promoting rhizobacteria*) di rhizofir.

2.4.2 Interaksi Merugikan (*Detrimental/harmful*)

Dalam ekosistem, interaksi ini berperan penting dalam meningkatkan populasi dari suatu biota yang diuntungkan serta menurunkan populasi organisme yang dirugikan.

Bentuk-bentuk interaksi merugikan (negatif) sebagai berikut:

1) Kompetisi

Kompetisi dapat terjadi apabila dua populasi menggunakan tempat dan sumber makanan yang sama, atau memperebutkan kebutuhan yang sama. Kompetisi ini menyebabkan terjadinya pemisahan ekologis dari populasi yang sangat berdekatan (*related population*).

2) Amensalisme

Amensalisme adalah interaksi yang terjadi dimana satu populasi mikroba menghasilkan senyawa toksin misalnya: antibiotik, atau gas berbahaya seperti: ethylene, HCN, nitrit, atau gas lainnya, bisa menghambat pertumbuhan populasi biota yang lain.

Misalnya, produksi asam laktat atau senyawa sejenis dapat menghambat pertumbuhan bakteri. *Escherichia coli* tidak bisa tumbuh dalam rumen disebabkan adanya asam lemak volatile yang diproduksi oleh mikroba anaerobik. Etanol yang dihasilkan oleh ragi dapat mencegah atau mengurangi pertumbuhan populasi bakteri lain dalam anggur.

3) Parasitisme

Parasitisme adalah interaksi negatif yang terjadi pada dua jenis organisme yang berbeda, dimana organisme yang kecil hidup parasit dalam tubuh organisme lain yang dijadikan sebagai inang (host). Aktivitas parasit sangat tergantung pada inangnya. Dalam interaksi ini menguntungkan bagi parasit, tetapi merugikan bagi inang. Interaksi parasitisme akan menyebabkan terjadinya penurunan kepadatan populasi inang, serta memungkinkan adanya akumulasi dan pembaharuan sumber makanan dalam suatu ekosistem.

Resistensi inang terhadap masuknya parasit, dapat dikelompokkan atas:

- a) Resistensi non-spesifik (alamiah), adalah resistensi mekanisme pertahanan alamiah yang melindungi inang dari berbagai macam parasit.
- b) Resistensi spesifik, adalah mekanisme pertahanan yang telah dikembangkan untuk merespon suatu parasit tertentu (kekebalan).

4) Predasi

Predasi adalah bentuk interaksi negatif antara dua jenis organisme yang berbeda. Adanya predator (organisme pemangsa) yang secara langsung membunuh dan memakan mangsanya untuk memperoleh energi dan nutrisi yang dibutuhkan untuk kelangsungan hidupnya. Predasi khususnya terjadi jika satu organisme (disebut predator memakan organisme lain). Misalnya: 1) Jamur tanah pemangsa (*predatory soil fungi*), yaitu species of *Arthrobotrytis* and *Dactylella* yang memangsa nematoda (*nematode trapping fungi*), dan 2) Protozoa pemangsa bakteri atau *bacteriophages* dapat dikategorikan sebagai predator bakteri.

2.4.3 Netralisme

Hubungan netralisme menunjukkan tidak adanya interaksi antara dua populasi mikroba, atau interaksi antara dua spesies biota yang tidak saling mempengaruhi. Bentuk interaksi ini terjadi karena populasi mikroba dengan kemampuan metabolik yang sangat berbeda menempati tempat (niche) yang berbeda pula atau berjauhan. Netralisme terjadi di antara dua populasi jika keduanya berada di luar habitat alami. Misal, populasi *Allochthonous* (*non indigenous*) lebih bisa berinteraksi dengan mikroba *Autochthonous* (*indigenous*) daripada dengan mikroba *non indigenous* lain. Pada dasarnya netralisme selalu berkaitan dengan aktivitas metabolisme (Irianto, 2008; Simarmata, 2012).

DAFTAR PUSTAKA

- Boleng Didimus Tanah (2015) *Bakteriologi Konsep-Konsep Dasar*. 1st edn. Malang: UMM Press. <http://ummpress.umm.ac.id>.
- Irianto, A. (2008) 'Tinjauan Umum Mikrobiologi Lingkungan', in *Mikrobiologi Lingkungan*. Jakarta: Universitas Terbuka, pp. 1–41. <http://repository.ut.ac.id/id/eprint/4410> (Accessed: 15 March 2023).
- Nurhayati, B. and Darmawati, S. (2017) *Biologi Sel dan Molekuler*. Pusdik SDM Kesehatan, Kementerian Kesehatan RI.
- Padoli (2016) *Mikrobiologi dan Parasitologi Keperawatan*. Jakarta Selatan: Pusdik SDM Kesehatan, Kementerian Kesehatan RI.
- Prayitno, T.A. and Hidayati, N. (2017) *Pengantar Mikrobiologi*. Malang: Media Nusa Creative.
- Sastry Apurba Sankar and K. Sandhya Bhat (2018) *Review of Microbiology & Immunology*. 6th edn. India: Jaypee Brothers Medical Publisher (P) Ltd.
- Simarmata, T. (2012) *Ekologi Biota Tanah*. 1st edn. Bandung: Prisma Press Proaktama.
- Soelistya, D. and Jekti, D. (2018) 'Peranan Mikroba Dalam Pengelolaan Lingkungan', in *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi*.
- Suprobawati, O.D. and Kurniati, I. (2018) *Virologi*. 1st edn. Pusdik SDM Kesehatan, Kementerian Kesehatan RI.

BAB 3

PERTUMBUHAN MIKROBA

Oleh Mujahidah Basarang

3.1 Pendahuluan

Pertumbuhan didefinisikan sebagai pertambahan bagian-bagian penyusun tubuh suatu sel hidup secara teratur. Pertambahan komponen ini akan diikuti penambahan jumlah sel sebagai konsekuensi pertumbuhan. Berdasarkan definisi ini, maka pertambahan ukuran tubuh organisme karena bertambahnya jumlah air yang diserap sel tubuh atau penumpukan lemak atau polisakarida tidak dapat diartikan sebagai pertumbuhan (Brooks, Carroll, Butel, Morse, & Mietzner, 2012).

Pertumbuhan pada organisme multiseluler (banyak sel) berbeda dengan pertumbuhan organisme bersel satu atau uniseluler. Pertumbuhan organisme multiseluler diikuti peningkatan jumlah sel penyusun organisme sehingga ukuran organisme menjadi lebih besar (Waluyo, 2016). Pertumbuhan organisme uniseluler seperti mikroba, memiliki karakteristik tersendiri. Pertumbuhan mikroba sama dengan reproduksi, yaitu pertambahan jumlah individu yang menyusun suatu populasi. Tersedianya nutrisi dan kondisi lingkungan yang sesuai akan mendukung keberlangsungan pertumbuhan mikroba. Perbanyakkan sel ini akan berlangsung cepat sehingga dalam waktu singkat didapatkan jumlah mikroba yang sangat banyak. Pertambahan biomassa atau jumlah sel ini memungkinkan dilakukan pengukuran pertumbuhan (Carroll, Butel, Morse, & Timothy, 2016).

3.2 Laju Pertumbuhan

Organisme uniseluler membelah dengan pembelahan biner (*binary fission*). Setiap sel tumbuh diawali dengan replikasi materi genetik kemudian sel membelah menjadi dua sel anak yang identik. Dua sel membelah menjadi empat sel, empat sel membelah menjadi delapan dan seterusnya. Hal ini menyebabkan pertambahan populasi secara geometrik:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 2^2 \rightarrow 2^3 \rightarrow 2^4 \rightarrow 2^5 \dots 2^n$$

atau dengan perhitungan sederhana:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 16 \rightarrow 32 \dots \text{dan seterusnya}$$

(Hogg, 2005).

Jangka waktu yang dibutuhkan sel untuk menggandakan diri dua kali lipat dinamakan waktu generasi. Waktu generasi mikroba berbeda-beda tergantung dari spesiesnya. Waktu generasi *Escherichia coli* 20 menit, *Mycobacterium tuberculosis* 20 jam, *Mycobacterium leprae* 20 hari (Sastry & K, 2016). Sedangkan *Candida albicans* 3.2 jam jika kultur yang berasal dari sel-sel pada fase pertumbuhan yang sama dan 1.7-3.6 jam jika kultur yang berasal dari sel-sel pada fase pertumbuhan yang berbeda (Dabrowa, Landau, & Newcomer, 1968).

Waktu generasi suatu mikroba dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$G = \frac{t}{3.3 \log \left(\frac{b}{B} \right)}$$

Keterangan:

G = waktu generasi

t = selang waktu antara pengukuran jumlah sel di dalam populasi fase log B dan kemudian lagi pada suatu titik waktu kemudian (b)

B = populasi awal

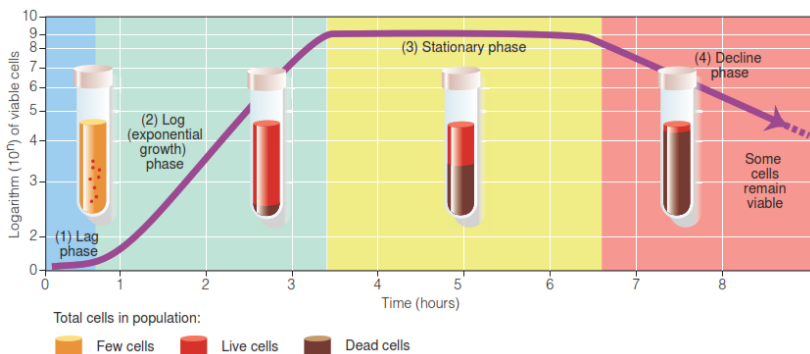
B = populasi setelah waktu t

Log = log 10

3.3 = faktor konversi (Waluyo, 2016)

3.3 Kurva Pertumbuhan

Dari suatu kultur, sel-sel bakteri diinokulasikan pada sebuah medium cair yang memiliki volume tetap. Medium diinkubasi hingga jenuh dan dilakukan pengukuran sel-sel viabel (hidup) secara berkala. Hasil pengukuran ini dibuat dalam bentuk kurva dan memperlihatkan fase-fase yang menggambarkan perubahan dari populasi bakteri dari waktu ke waktu. Kurva pertumbuhan memperlihatkan 4 fase (Carroll, Butel, Morse, & Timothy, 2016).



Gambar 3.1. Kurva Pertumbuhan Bakteri
(Pommerville, 2011)

3.3.1 Fase lamban (*lag*)

Fase lamban merupakan fase pertama pada kurva pertumbuhan. Fase ini tidak menunjukkan pertumbuhan. Bakteri menyesuaikan diri dengan lingkungan yang baru, namun tidak

semua akan bertahan karena ketidakmampuan beradaptasi dengan lingkungan yang baru menyebabkan kematian sebagian sel. Panjang fase ini bergantung pada aktivitas metabolisme sel (Pommerville, 2011). Metabolisme dipercepat menyebabkan biosintesis makromolekul seluler dengan cepat, terutama enzim-enzim yang disiapkan untuk fase berikutnya. Massa sel bertambah karena komponen sel bertambah dua kali (Cappucino & Natalie, 2013).

3.3.2 Fase Eksponensial

Pada fase eksponensial, semua sel mengalami pembelahan biner dan waktu generasi tergantung pada spesies dan kondisi lingkungan yang ada. Populasi menggandakan jumlah secara teratur dan grafik naik dalam garis lurus pada skala logaritmik (Pommerville, 2011). Pada fase ini dikenal waktu generasi yaitu waktu yang dibutuhkan bagi populasi untuk menggandakan jumlahnya (Cappucino & Natalie, 2013).

3.3.3 Fase Stasioner

Fase ini dikenal juga dengan fase tetap. Jumlah mikroba yang hidup tidak lagi mengalami kenaikan atau peningkatan jumlah karena jumlah sel yang menggandakan diri setara dengan jumlah sel yang mengalami kematian. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya nutrisi penting dan penumpukan hasil akhir metabolisme sel-sel bakteri yang bersifat racun di dalam media (Cappucino & Natalie, 2013). Faktor lain seperti kurangnya suplai oksigen juga memungkinkan (Pommerville, 2011).

3.3.4 Fase Penurunan

Fase ini disebut juga fase kematian. Hal ini terjadi karena jumlah nutrisi semakin berkurang, hasil metabolisme toksik semakin meningkat. Mikroorganisme mati dengan laju yang cepat dan seragam. Secara teoritis semua mikroba harus mati, meskipun hanya kelompok kecil saja, beberapa organisme yang sangat resisten ditemukan tetap hidup untuk jangka waktu yang tidak ditentukan (Cappucino & Natalie, 2013). Organisme yang

hidup ini adalah sel hidup, tetapi tidak dapat dikultur atau *viable but not culturable* (VBNC). Sel-sel ini tumbuh menggunakan nutrisi yang dilepaskan dari sel-sel yang mati dan melisis (Carroll, Butel, Morse, & Timothy, 2016).

3.4 Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan

Mikroorganisme yang mengalami pertumbuhan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu kebutuhan nutrisi dan faktor fisik (Cappucino & Natalie, 2013).

3.4.1 Kebutuhan Nutrisi

Pertumbuhan mikroba sangat dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi. Nutrisi untuk pertumbuhan mikroba haruslah mengandung semua unsur yang diperlukan untuk sintesis biologis organisme-organisme yang baru. Nutrisi akan diasimilasi oleh mikroba pada proses metabolisme untuk membuat bahan seluler dan memperoleh energi (Brooks, Carroll, Butel, Morse, & Mietzner, 2012).

Mikroorganisme di alam sangat beragam sehingga kebutuhan nutrisinya pun bervariasi, namun secara umum dapat dikelompokkan menjadi makronutrien dan mikronutrien (tabel 3.1). Karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), fosfor (P), potasium (K), sodium (Na), klorin (Cl), kalsium (Ca), magnesium (Mg) dan besi (Fe) merupakan makronutrien yang dibutuhkan mikroba dalam jumlah banyak. Sedangkan kebutuhan mikronutrien adalah unsur yang dibutuhkan dalam jumlah yang terbatas, yaitu tembaga (Cu), mangan (Mn), kobalt (Co), seng (Zn), molibdenum (Mo), nikel (Ni), dan faktor tumbuh (Hogg, 2005).

Tabel 3.1 Unsur-unsur yang Ditemukan dalam Organisme Hidup

Unsur	Bentuk yang Tersedia	Kegunaan pada Sistem Biologi
Makronutrien		
Karbon (C)	CO ₂ , senyawa organik	Komponen molekul organik, CO ₂
Hidrogen (H)	H ₂ O, senyawa organik	Komponen molekul biologi, H ⁺ dilepaskan oleh asam
Oksigen (O)	O ₂ , H ₂ O, senyawa organik	Komponen molekul biologi ; dibutuhkan untuk metabolisme aerob
Nitrogen (N)	NH ₃ , NO ₃ ⁻ , N ₂ , senyawa N organik	Komponen protein, asam nukleat
Sulfur (S)	H ₂ S, SO ₄ ²⁻ , senyawa S organik	Komponen protein ; sumber energi untuk beberapa bakteri
Fosfor (P)	PO ₄ ³⁻	Ditemukan pada asam nukleat, ATP, fosfolipid
Potasium (K)	Dalam larutan sebagai K ⁺	Ion intraseluler yang penting
Sodium (Na)	Dalam larutan sebagai Na ⁺	Ion ekstraseluler yang penting
Klorin (Cl)	Dalam larutan sebagai Cl ⁻	Ion ekstraseluler yang penting
Kalsium (Ca)	Dalam larutan sebagai Ca ²⁺	Pengatur proses seluler
Magnesium (Mg)	Dalam larutan sebagai Mg ²⁺	Koenzim pada beberapa enzim
Besi (Fe)	Dalam larutan sebagai Fe ²⁺ atau Fe ³⁺ atau sebagai FeS, Fe(OH ₃), dll	Membawa oksigen ; sumber energi beberapa bakteri
Mikronutrien (dibutuhkan dalam konsentrasi rendah)		
Tembaga (Cu)	Dalam larutan sebagai Cu ⁺ , Cu ²⁺	Koenzim ; penghambat pertumbuhan mikroba
Mangan (Mn)	Dalam larutan sebagai Mn ²⁺	Koenzim
Kobal (Co)	Dalam larutan sebagai Co ²⁺	Vitamin B12

Unsur	Bentuk yang Tersedia	Kegunaan pada Sistem Biologi
Seng (Zn)	Dalam larutan sebagai Zn^{2+}	Koenzim ; penghambat pertumbuhan mikroba
Molibdenum (Mo)	Dalam larutan sebagai Mo^{2+}	Koenzim
Nikel (Ni)	Dalam larutan sebagai Ni^{2+}	Koenzim

Sumber : (Hogg, 2005)

Kebutuhan utama dan paling penting semua struktur dan fungsi seluler berasal dari karbon. Berdasarkan kebutuhan akan karbon, mikroorganisme dapat dikelompokkan menjadi mikroorganisme **autotrof** (sumber karbon berupa senyawa anorganik, seperti karbondioksida), **heterotrof** (sumber karbon berupa senyawa organik, seperti glukosa), **kemolitotrof** (sumber energi dari senyawa kimia, sumber elektron dari molekul anorganik) (Carroll, Butel, Morse, & Timothy, 2016).

Nitrogen adalah penyusun makromolekul seluler, utamanya protein-protein, asam nukleat, dan senyawa lain. 5% berat kering sel bakteri disusun oleh nitrogen. Protein memiliki fungsi sebagai molekul-molekul struktural membentuk sel, dan molekul fungsional (enzim-enzim) pada aktivitas metabolik sel. Asam nukleat berupa DNA dan RNA berperan dalam sintesis protein di dalam sel (Cappucino & Natalie, 2013).

Sulfur merupakan komponen penyusun beberapa asam amino yang menyusun protein, membentuk bagian struktur koenzim. Beberapa bakteri autotrof mengoksidasi sulfur menjadi sulfat (SO_4^{2-}). Sebagian besar mikroorganisme mereduksi sulfat menjadi hidrogen sulfida (H_2S). Sebagian mikroba dapat mengasimilasi H_2S secara langsung pada media pertumbuhan.

Fosfat (PO_4^{3-}) selalu diasimilasi sebagai fosfat anorganik bebas. Fosfat diperlukan sebagai komponen ATP, asam nukleat, dan koenzim-koenzim seperti NAD, NADP dan flavin. Hasil metabolisme berupa fosfolipid, lipid A, asam teikoat sebagai

penyusun dinding sel, polisakarida kapsul, dan beberapa protein memilik struktur terfosforilasi.

Sumber mineral dibutuhkan mikroba dalam pertumbuhan meskipun dalam jumlah yang sedikit. Sehingga pada media pembiakan perlu disediakan sumber-sumber mineral dalam bentuk ion kalium (K^+), magnesium (Mg^{2+}), kalsium (Ca^{2+}) dan besi (Fe^{2+}). Banyak mineral lain juga diperlukan seperti mangan (Mn^{2+}), molibdenum (Mo^{2+}), kobal (Co^{2+}), tembaga (Cu^{2+}) dan seng (Zn^{2+}). Berbagai mineral penting untuk proses aktivitas seluler berupa osmoregulasi, pengaturan aktivitas enzim dan transpor elektron (Brooks, Carroll, Butel, Morse, & Mietzner, 2012).

Faktor pertumbuhan merupakan komponen yang tidak dapat diproduksi atau disintesis sendiri oleh mikroorganisme namun harus dimiliki mikroorganisme untuk dapat bertumbuh.

Tabel 3.2. Faktor Pertumbuhan Mikroba

Faktor Pertumbuhan	Fungsi
Asam amino	Penyusun protein
<i>p</i> -Aminobenzoic acid	Prekursor asam folat, terlibat dalam sintesis asam nukleat
Niasin (asam nikotinat)	Prekursor NAD^+ dan $NADP^+$
Purin dan pirimidin	Komponen asam nukleat
Piridoksin (vitamin B_6)	Sintesis asam amino
Riboflavin (vitamin B_2)	Prekursor FAD

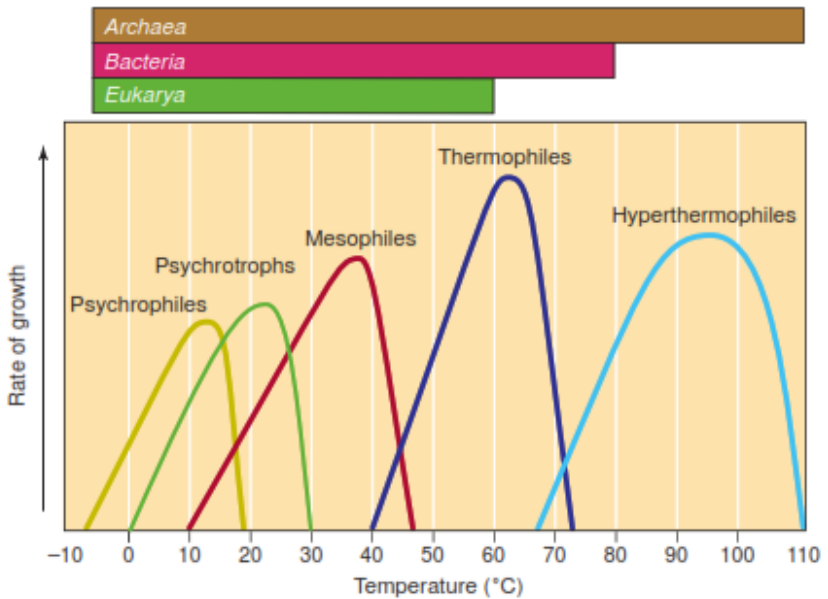
Sumber : (Hogg, 2005)

3.4.2 Faktor Fisik

Suhu

Suhu memegang peranan penting dalam proses pertumbuhan mikroba. Kenaikan suhu lingkungan optimum akan meningkatkan kecepatan reaksi kimia melalui kerja enzim. Suhu yang rendah akan menghambat kerja enzim dan akan berakibat pada terhambatnya metabolisme. Suhu tinggi juga akan

menghentikan kerja enzim karena enzim akan mengalami koagulasi hingga terjadinya denaturasi pada enzim yang termolabil (Cappucino & Natalie, 2013). Kisaran suhu optimal mikroorganisme untuk pertumbuhan yang beragam. **Psikrofilik** adalah kelompok mikroorganisme yang tumbuh paling baik pada suhu rendah, yaitu -5 sampai 30° C dengan suhu optimum 10-20° C. **Mesofilik** adalah kelompok mikroorganisme yang tumbuh paling baik pada suhu 10-45° C dengan suhu optimum 20-40° C. termofilik adalah kelompok mikroorganisme yang hidup pada suhu tinggi, yaitu 25-80° C dengan suhu optimum 50-60° C (Suharto & Chatim, 1994).



Gambar 3.2. Pengaruh Suhu terhadap Kecepatan Pertumbuhan
Sumber : (Pommerville, 2011)

Suhu panas yang ekstrim juga akan membunuh mikroorganisme, demikian juga dengan suhu dingin yang ekstrim dapat membunuh mikroorganisme melalui fenomena syok dingin (*cold shock*).

pH

pH lingkungan akan mempengaruhi aktifitas enzimatis sel-sel. Mikroorganisme memiliki kisaran pH optimal yang berbeda berdasarkan spesiesnya. Sebagian besar organisme bersifat **neutrofil**, tumbuh baik pada pH 6,5-7,5, namun ada pula jenis **asidofil**, memiliki pH optimum 3-6, dan lainnya **alkalofil**, memilih pH optimal hingga 10,5. Mikroorganisme mengatur pH internalnya terhadap kisaran nilai pH eksternal dengan memompa proton keluar atau masuk sel tersebut (Brooks, Carroll, Butel, Morse, & Mietzner, 2012). Kebanyakan bakteri bersifat neutrofil, namun bakteri asam asetat dan bakteri yang mengoksidasi sulfur dapat hidup pada pH 8,5. Khamir menyukai pH 4-5, yaitu pH yang menghambat pertumbuhan bakteri namun khamir dapat tumbuh pada kisaran pH 2,5-8,5. Sedangkan kapang mempunyai pH optimum 5,7 namun dapat hidup pada pH 3,0-8,5 (Waluyo, 2016).

Aerasi

Kebutuhan gas pada sebagian besar mikroba adalah oksigen. Oksigen berperan sebagai akseptor hidrogen bagi bakteri aerob obligat. Organisme fakultatif mampu hidup secara aerobik maupun anaerobik. Sedangkan organisme anaerob obligat menggunakan sistem respirasi anaerob atau fermentasi, sehingga memerlukan substansi selain oksigen sebagai akseptor hidrogen (Carroll, Butel, Morse, & Timothy, 2016).

Tekanan Osmotik

Meskipun dalam derajat yang lebih kecil, tekanan osmotik dan konsentrasi garam perlu diperhatikan. Utamanya pembiakan organisme halofilik yang memerlukan garam konsentrasi tinggi dan organisme osmofilik yang memerlukan tekanan osmotik tinggi (Brooks, Carroll, Butel, Morse, & Mietzner, 2012).

3.5 Metode Pengukuran Pertumbuhan Mikroorganisme

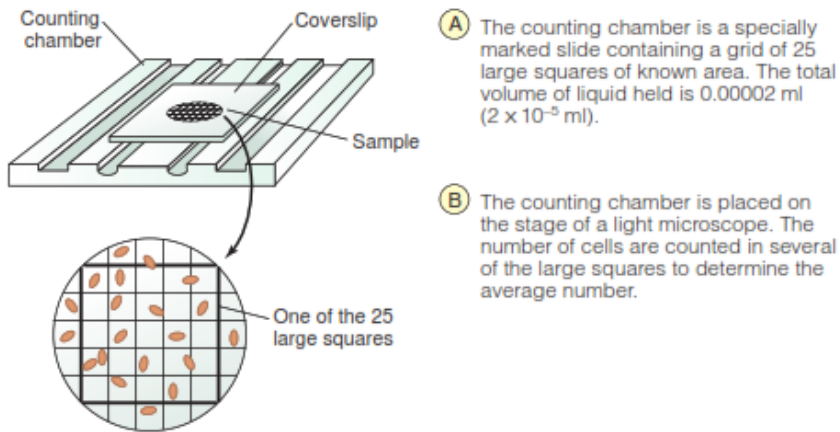
Pengukuran pertumbuhan mikroorganisme dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode berikut:

1. Penghitungan jumlah sel, yaitu perhitungan mikroskopis, perhitungan kultur di cawan petri, *Most Probable Number* (MPN).
2. Perhitungan massa sel secara langsung, yaitu cara volumetrik, cara gravimetrik, dan turbidimetri (kekeruhan)
3. Perhitungan massa sel secara tidak langsung, yaitu analisis komponen sel (protein, DNA, ATP, dan sebagainya), analisis produk katabolisme (metabolit primer, metabolit sekunder), dan analisis konsumsi nutrisi (karbon, nitrogen, oksigen, asam amino, mineral, dan sebagainya).

Cara Hitungan Mikroskopik

3.5.1 Penghitungan Jumlah Sel secara Mikroskopis

Penghitungan jumlah sel secara mikroskopi dapat dilakukan dengan bantuan bilik hitung *hemocytometer*. Pada bilik hitung terdapat kotak-kotak skala, setiap ukuran skala seluas 1mm^2 terdapat 25 buah kotak besar dengan luas $0,04\text{ mm}^2$, dan setiap kotak besar terdiri dari 16 kotak-kotak kecil. Tinggi sampel yang terletak di antara kaca benda dan kaca penutup adalah $0,02\text{ mm}$. Jumlah sel dalam beberapa kotak besar dapat dihitung, kemudian dihitung jumlah sel rata-rata dalam kotak besar (Waluyo, 2016).



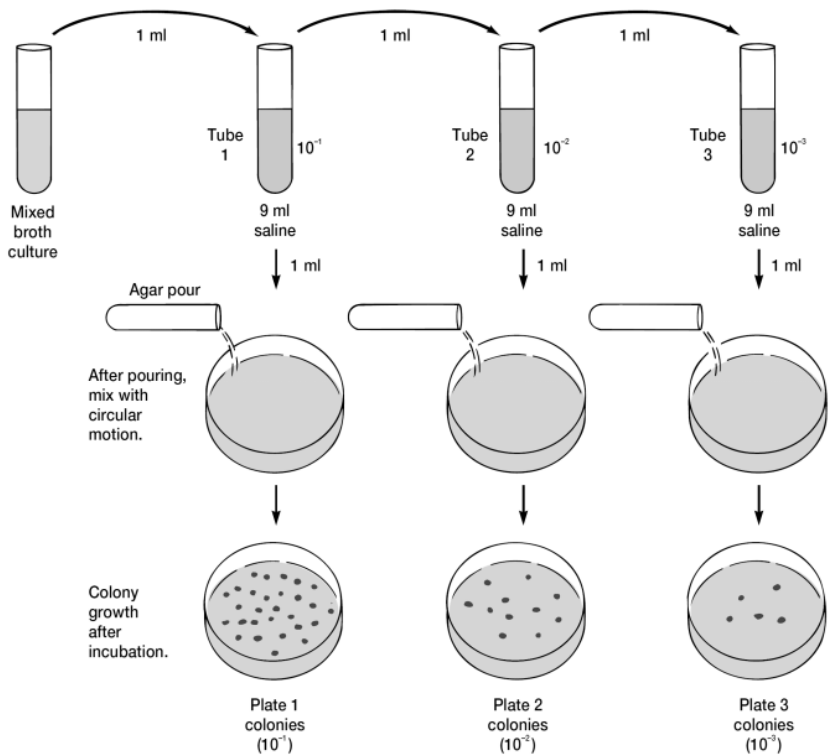
Gambar 3.3. Penghitungan Jumlah Sel secara Langsung
Sumber : (Pommerville, 2011)

Metode ini adalah pemeriksaan paling ekonomis dan praktis, namun memiliki kekurangan, yaitu 1) tidak ada perbedaan sel-sel mikroba yang hidup dan mati tidak ; 2) ukuran sel-sel kecil sering tidak terlihat di bawah mikroskop ; 3) penghitungan ini tidak sesuai untuk sel mikroba yang tercampur dengan debris, atau ekstrak makanan ; 4) untuk meningkatkan ketelitian, jumlah sel di dalam suspensi harus cukup tinggi, minimal untuk bakteri 10^6 sel/mL (Waluyo, 2016).

3.5.2 Perhitungan Kultur di Cawan Petri

Prinsip perhitungan kultur di cawan petri adalah pertumbuhan sel mikroba medium akan menunjukkan kumpulan mikroba (koloni) yang dapat dihitung secara langsung tanpa menggunakan mikroskop. Teknik ini melibatkan pengenceran berseri suatu suspensi mikroba dalam blangko air steril, yang berperan sebagai pengencer dengan volume yang diketahui. Setelah diencerkan suspensi dituangkan ke lempeng medium nutrisi yang sesuai. Semua pengenceran harus dipindahkan ke lempeng secara duplo untuk nilai akurasi yang tinggi dan dilanjutkan inkubasi selama semalam. Mikroorganisme hidup

dan bereplikasi berulang-ulang akan terlihat secara makroskopis dan dapat dilakukan enumerasi. Penampakan makroskopis mikroba atau koloni pada agar cawan yang memenuhi persyaratan adalah 30-300 koloni. Untuk mendapatkan jumlah sel maka jumlah sel per cawan dikali dengan faktor pengenceran, yang merupakan kebalikan dari nilai pengenceran (Cappucino & Natalie, 2013).

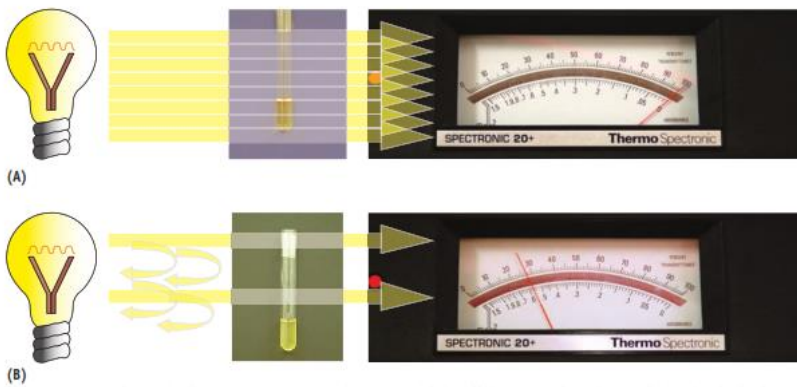


Gambar 3.4. Prosedur Pengenceran Berseri-Agar Lempeng
Sumber: (Alnaimat & Abushattal, 2012)

3.5.3 Turbidimetri

Kekeruhan pada biakan cair di laboratorium menunjukkan jumlah mikroba yang tersuspensi pada media cair. Hal ini menjadi penanda pertumbuhan. Kekeruhan ini dapat digunakan untuk

mengukur jumlah pertumbuhan mikroba menggunakan alat spektrofotometer. Alat ini digunakan untuk menentukan kerapatan optik ($OD = \text{optical density}$). Prinsip pengukuran ini adalah adanya gelombang cahaya yang dilewatkan ke suspensi biakan. Banyaknya cahaya yang ditransmisikan setelah melewati suspensi dapat diukur. Jumlah cahaya yang ditransmisikan setelah melewati suspensi biakan berbanding terbalik dengan jumlah mikroorganisme dan jumlah cahaya yang diabsorpsi. Jumlah cahaya yang diabsorpsi tergantung pada bentuk dan besar sel. Hasil pengukuran ini tidak langsung menunjukkan jumlah mikroba. Untuk mendapatkan jumlahnya maka perlu dilakukan penyetaraan OD dengan jumlah mikroorganisme (CFU/mL) (Lay, 1994).



Gambar 3.5. Pengukuran Pertumbuhan Mikroba Berdasarkan Kekeruhan. Sumber: (Pommerville, 2011)

DAFTAR PUSTAKA

- Alnaimat, S., & Abushattal, S. (2012). *Laboratory Manual in General Microbiology for Undergraduate Students*. Yordania: Al-Hussein Bin Talal University.
- Brooks, G. F., Carroll, K. C., Butel, J. S., Morse, S. A., & Mietzner, T. A. (2012). *Mikrobiologi Kedokteran Jawetz, Melnick, & Adelberg Edisi 25*. (A. W. Nugroho, & dkk, Trans.) Jakarta: EGC.
- Cappucino, J. G., & Natalie, S. (2013). *Manual Laboratorium Mikrobiologi Edisi 8*. (N. Miftahurrahma, Trans.) Jakarta: EGC.
- Carroll, K. C., Butel, J. S., Morse, S. A., & Timothy, M. (2016). *Jawetz, Melnick & Adelberg Medical Microbiology 27th Edition*. New York: Mc Graw Hill Education.
- Dabrowa, N., Landau, J. W., & Newcomer, V. D. (1968, January). Generation Time of *Candida albicans* in Synchronized and Nonsynchronized Cultures. *Sabouraudia*, 6(1), 51-56. doi:10.1080/00362176885190091
- Hogg, S. (2005). *Essential Microbiology*. West Sussex: John Wiley & Sons. LTD.
- Lay, B. W. (1994). *Analisis Mikroba di Laboratorium*. Jakarta: PT. RajaGrafindo Persada.
- Pommerville, J. C. (2011). *Alcamo's Fundamentals of Microbiology 9th Ed*. Canada: Jones and Bartlett Publishers.
- Sastry, A. S., & K, B. S. (2016). *Essentials of Medical Microbiology*. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers.
- Suharto, & Chatim, A. (1994). Fisiologi Pertumbuhan Kuman. In S. P. Indonesia, *Mikrobiologi Kedokteran*. Jakarta: Bina Rupa Aksara.
- Waluyo, L. (2016). *Mikrobiologi Umum*. Malang: UMM Press.

BAB 4

METABOLISME MIKROBA

Oleh Andi Fatmawati

4.1 Pendahuluan

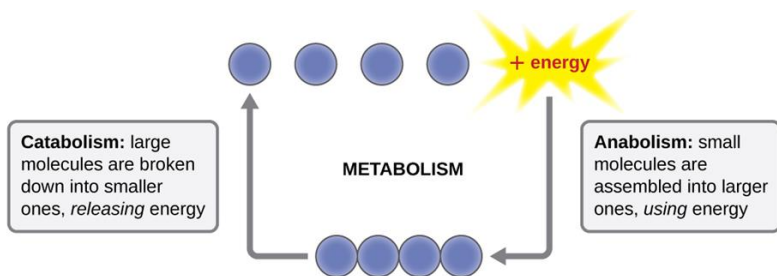
Sepanjang sejarah perkembangan bumi, metabolisme mikroba telah menjadi kekuatan pendorong di balik pengembangan dan pemeliharaan biosfer planet ini. Organisme eukariotik seperti tanaman dan hewan biasanya bergantung pada molekul organik untuk memperoleh energi, proses pertumbuhan, dan reproduksi. Di sisi lain, *prokariota*, dapat memetabolisme berbagai macam bahan organik maupun anorganik, dari molekul organik kompleks seperti selulosa hingga molekul anorganik dan ion-ion seperti nitrogen atmosfer (N_2), hidrogen molekuler (H_2), sulfida (S^{2-}), ion mangan (II) (Mn^{2+}), besi besi (Fe^{2+}), dan besi besi (Fe^{3+}), dan masih banyak lagi. Dengan memetabolisme zat-zat tersebut, mikroba secara kimiawi mengubahnya menjadi bentuk lain. Dalam beberapa kasus, metabolisme mikroba menghasilkan bahan kimia yang dapat berbahaya bagi organisme lain; dalam kasus lain, metabolisme mikroba menghasilkan zat-zat yang penting untuk metabolisme dan kelangsungan hidup bentuk kehidupan lainnya.

4.2 Pengertian Metabolisme

Metabolisme adalah suatu proses konversi struktur kimiawi untuk menghasilkan energi. Proses konversi struktur kimiawi itu sendiri terdiri atas proses penyusunan (anabolisme) dan proses penguraian (katabolisme). Katabolisme merupakan sumber energi bagi terlaksananya berbagai proses di tingkat intra selular. Proses ini menghasilkan energi yang diperoleh dari mekanisme yang di sebut proses respirasi, dimana dalam proses

tersebut terdapat beberapa mekanisme utama seperti glikolisis, siklus krebs, dan sistem transport elektron (Azhar, 2008).

Reaksi yang spontan dan melepaskan energi adalah reaksi eksergonik, sedangkan reaksi endergonik membutuhkan energi untuk melanjutkan. Istilah anabolisme mengacu pada jalur metabolisme endergonik yang terlibat dalam biosintesis, mengubah molekul sederhana menjadi molekul yang lebih kompleks, dan didorong oleh penggunaan energi seluler. Sebaliknya, istilah katabolisme mengacu pada jalur eksergonik yang memecah molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana. Energi molekuler yang tersimpan dalam ikatan molekul kompleks dilepaskan dalam jalur katabolik dan dipanen sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk menghasilkan molekul berenergi tinggi, yang digunakan untuk mendorong jalur anabolik. Dengan demikian, dalam hal energi dan molekul, sel terus menyeimbangkan katabolisme dengan anabolisme.



Gambar 4.1. Metabolisme meliputi katabolisme dan anabolisme. Jalur anabolik membutuhkan energi untuk mensintesis molekul yang lebih besar. Jalur katabolik menghasilkan energi dengan memecah molekul yang lebih besar. Kedua jenis jalur ini diperlukan untuk menjaga keseimbangan energi sel.

(Sumber: Openstax, 2022)

4.3 Klasifikasi Mikroba Berdasarkan Sumber Karbon dan Energi

Mikroba dapat diidentifikasi berdasarkan sumber karbon yang mereka gunakan untuk metabolisme serta sumber energi mereka. Awalan auto- ("diri sendiri") dan hetero ("lainnya") merujuk pada asal-usul sumber karbon yang dapat digunakan oleh berbagai organisme. Organisme yang mengubah karbon dioksida anorganik (CO_2) menjadi senyawa karbon organik adalah *autotrof*. Tumbuhan dan cyanobacteria adalah contoh autotrof yang terkenal. Sebaliknya, heterotrof mengandalkan senyawa karbon organik yang lebih kompleks sebagai nutrisi; ini disediakan untuk mereka pada awalnya oleh autotrof. Banyak organisme, mulai dari manusia hingga prokariota, termasuk *Escherichia coli* adalah *heterotrof*.

Organisme juga dapat diidentifikasi berdasarkan sumber energi yang mereka gunakan. Semua energi berasal dari transfer elektron, tetapi sumber elektron berbeda di antara berbagai jenis organisme. Awalan photo- ("cahaya") dan chemo- ("kimia") merujuk pada sumber energi yang digunakan berbagai organisme. Organisme yang mendapatkan energi untuk transfer elektron dari cahaya adalah *fototrof*, sedangkan *kemotrof* mendapatkan energi untuk transfer elektron dengan cara memutus ikatan kimia. Ada dua jenis kemotrof: *organotrof* dan *litotrof*. Organotrof, termasuk manusia, jamur, dan banyak prokariota, adalah kemotrof yang memperoleh energi dari senyawa organik. Litotrof ("litho" berarti "batu") adalah kemotrof yang mendapatkan energi dari senyawa anorganik, termasuk hidrogen sulfida (H_2S) dan besi tereduksi (Fatmawati, 2022).

Strategi yang digunakan untuk mendapatkan karbon dan energi dapat digabungkan untuk klasifikasi organisme menurut jenis nutrisi. Sebagian besar organisme adalah kemoheterotrof karena mereka menggunakan molekul organik sebagai sumber elektron dan karbon.

4.4 Enzim

4.4.1 Struktur dan Fungsi Enzim

Zat yang membantu mempercepat reaksi kimia adalah katalis. Katalis tidak digunakan atau diubah selama reaksi kimia dan, oleh karena itu, dapat digunakan kembali. Sementara molekul anorganik dapat berfungsi sebagai katalisator untuk berbagai reaksi kimia, protein yang disebut enzim berfungsi sebagai katalisator untuk reaksi biokimia di dalam sel. Oleh karena itu, enzim memainkan peran penting dalam mengendalikan metabolisme sel.

Enzim memiliki sebutan lain yakni *fermen*; kata enzim berasal dari bahasa Yunani yang artinya “dalam ragi”. Holoenzim merupakan keseluruhan bagian enzim yang tersusun atas dua komponen utama, yaitu apoenzim (komponen protein)) dan gugus prostetik (nonprotein) .

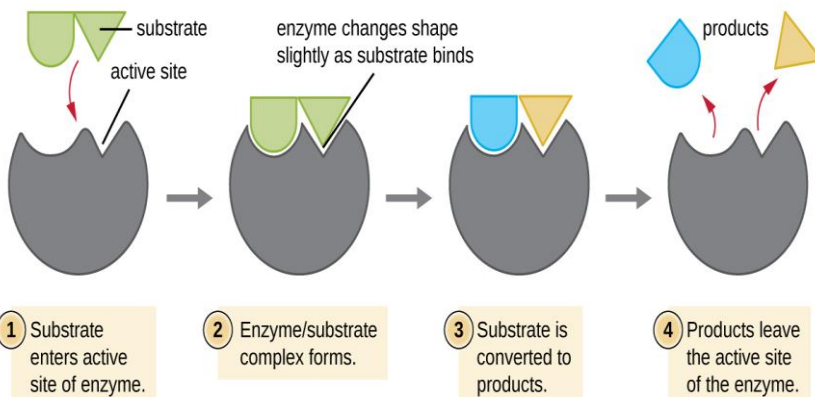
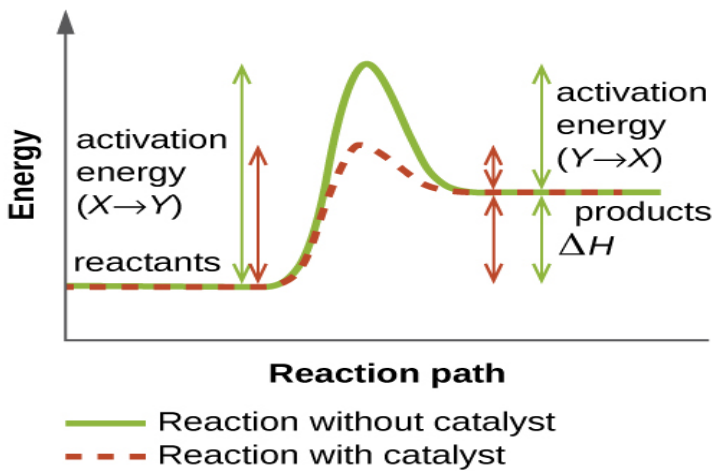
Fungsi enzim sangat ditentukan oleh gugus apoenzimnya karena pada bagian tertentu merupakan tempat melekatnya substrat dan sekaligus tempat mereksikan substrat. Bagian pada gugus protein yang berfungsi sebagai pusat katalitik enzim disebut sisi aktif. Komponen nonprotein (gugus prostetik) dibedakan menjadi gugus kofaktor dan koenzim. Gugus kofaktor tersusun atas zat anorganik yang umumnya berupa logam, misalnya Cu, Fe, Mn, Zn, Ca, K dan Co. Gugus koenzim merupakan senyawa organik nonprotein yang tidak melekat erat pada bagian protein enzim, contohnya NAD, NADP dan koenzim A (Baron, 1996).

Ada dua tipe enzim, yaitu eksoenzim atau enzim ekstraseluler atau enzim di luar sel dan endoenzim atau enzim intraseluler atau enzim di dalam sel. Fungsi utama dari eksoenzim adalah melangsungkan perubahan-perubahan pada nutrisi di sekitarnya sehingga memungkinkan nutrisi tersebut penetrasi ke sel; dengan mengambil zat makanan yang ada di sekeliling sel. Misalnya, enzim amilase menguraikan zat pati

menjadi unit-unit gula yang lebih kecil. Dan endoenzim berfungsi untuk mensintesis bahan seluler dan menguraikan nutrisi untuk menyediakan energi yang dibutuhkan oleh sel, misalnya heksokinase mengkatalisis fosforilasi glukosa dan heksosa (senyawa-senyawa gula sederhana) di dalam sel.

Enzim berfungsi dengan menurunkan energi aktivasi reaksi kimia di dalam sel. Energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan untuk membentuk atau memutuskan ikatan kimia dan mengubah reaktan menjadi produk (Gambar 4.2). Enzim menurunkan energi aktivasi dengan mengikat molekul reaktan dan menahannya sedemikian rupa untuk mempercepat reaksi.

Reaktan kimia yang diikat oleh enzim disebut *substrat*, dan lokasi di dalam enzim di mana substrat berikatan disebut *situs aktif enzim*. Karakteristik asam amino di dekat situs aktif menciptakan lingkungan kimia yang sangat spesifik di dalam situs aktif yang menginduksi kesesuaian untuk mengikat, meskipun secara singkat, ke substrat (atau substrat-substrat) tertentu. Karena kecocokan seperti teka-teki jigsaw ini antara enzim dan substratnya, enzim dikenal karena kekhususannya. Faktanya, ketika enzim berikatan dengan substratnya, struktur enzim berubah sedikit untuk menemukan kecocokan terbaik antara keadaan transisi (perantara struktural antara substrat dan produk) dan situs aktif. Modifikasi situs aktif dengan adanya substrat, bersama dengan pembentukan keadaan transisi secara simultan, disebut kecocokan yang diinduksi (Gambar 4.3). Secara umum, terdapat enzim yang secara khusus cocok untuk setiap substrat dan setiap reaksi kimia; namun, ada beberapa bersifat fleksibel. Beberapa enzim memiliki kemampuan untuk bekerja pada beberapa substrat yang berbeda secara struktural.



Gambar 4.2. Enzim menurunkan energi aktivasi reaksi kimia. (Sumber: Openstax, 2022)

Enzim dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan setempat seperti pH, konsentrasi substrat, dan suhu. Meskipun peningkatan suhu lingkungan umumnya meningkatkan laju reaksi, baik yang dikatalisis oleh enzim maupun tidak, peningkatan atau penurunan suhu di luar kisaran optimal dapat memengaruhi ikatan kimia di dalam situs aktif, sehingga kurang cocok untuk mengikat substrat. Suhu tinggi pada akhirnya akan menyebabkan enzim, seperti molekul biologis lainnya,

mengalami perubahan sifat, kehilangan struktur dan fungsi tiga dimensinya. Enzim juga cocok untuk berfungsi paling baik dalam kisaran pH tertentu, dan, seperti halnya suhu, nilai pH lingkungan yang ekstrem (asam atau basa) dapat menyebabkan enzim berubah sifat. Rantai samping asam amino-situs aktif memiliki sifat asam atau basa yang optimal untuk katalisis dan, oleh karena itu, sensitif terhadap perubahan pH.

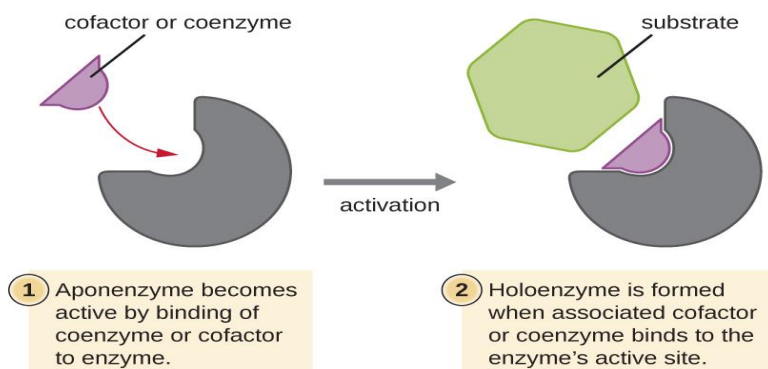
Faktor lain yang mempengaruhi aktivitas enzim adalah konsentrasi substrat: Aktivitas enzim meningkat pada konsentrasi substrat yang lebih tinggi hingga mencapai titik jenuh di mana enzim tidak dapat mengikat substrat tambahan. Secara keseluruhan, enzim dioptimalkan untuk bekerja paling baik di bawah kondisi lingkungan tempat organisme yang memproduksinya hidup. Sebagai contoh, beberapa mikroba yang menghuni sumber air panas memiliki enzim yang bekerja paling baik pada suhu tinggi, patogen manusia memiliki enzim yang bekerja paling baik pada suhu 37°C.

Banyak enzim tidak bekerja secara optimal, atau bahkan tidak bekerja sama sekali, kecuali terikat pada molekul pembantu nonprotein spesifik lainnya, baik secara sementara melalui ikatan ion atau hidrogen atau secara permanen melalui ikatan kovalen yang lebih kuat. Pengikatan pada molekul-molekul ini mendorong konformasi dan fungsi yang optimal untuk enzim masing-masing. Dua jenis molekul pembantu adalah kofaktor dan koenzim. *Kofaktor* adalah ion anorganik seperti besi (Fe^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) yang membantu menstabilkan konformasi dan fungsi enzim. Salah satu contoh enzim yang membutuhkan ion logam sebagai kofaktor adalah enzim yang membangun molekul DNA, DNA polimerase, yang membutuhkan ion seng (Zn^{2+}) yang terikat agar dapat berfungsi.

Koenzim adalah molekul pembantu organik yang diperlukan untuk kerja enzim. Seperti enzim, koenzim tidak dikonsumsi dan karenanya dapat digunakan kembali. Sumber koenzim yang paling umum adalah vitamin makanan. Beberapa

vitamin merupakan prekursor koenzim dan yang lainnya bertindak langsung sebagai koenzim.

Beberapa kofaktor dan koenzim, seperti koenzim A (CoA), sering berikatan dengan situs aktif enzim, membantu kimiawi transisi substrat menjadi produk. Dalam kasus seperti itu, enzim yang tidak memiliki kofaktor atau koenzim yang diperlukan disebut apoenzim dan tidak aktif. Sebaliknya, enzim dengan kofaktor atau koenzim terkait yang diperlukan disebut holoenzim dan aktif. NADH dan ATP juga merupakan contoh koenzim yang umum digunakan yang masing-masing menyediakan elektron berenergi tinggi atau gugus fosfat, yang berikatan dengan enzim, sehingga mengaktifkannya (Nelson, 2012).



Gambar 4.3. Pengikatan koenzim atau kofaktor pada apoenzim sering kali diperlukan untuk membentuk holoenzim yang aktif.

4.4.2 Faktor Penghambat Kerja Enzim

Enzim dapat diatur dengan cara-cara yang dapat meningkatkan atau mengurangi aktivitasnya. Ada banyak jenis molekul yang menghambat atau meningkatkan fungsi enzim, dan berbagai mekanisme yang ada untuk melakukannya. Inhibitor kompetitif adalah molekul yang cukup mirip dengan substrat sehingga dapat bersaing dengan substrat untuk berikatan dengan situs aktif hanya dengan menghalangi substrat untuk berikatan. Agar inhibitor kompetitif menjadi efektif, konsentrasi inhibitor harus kurang lebih sama dengan konsentrasi substrat. Obat-

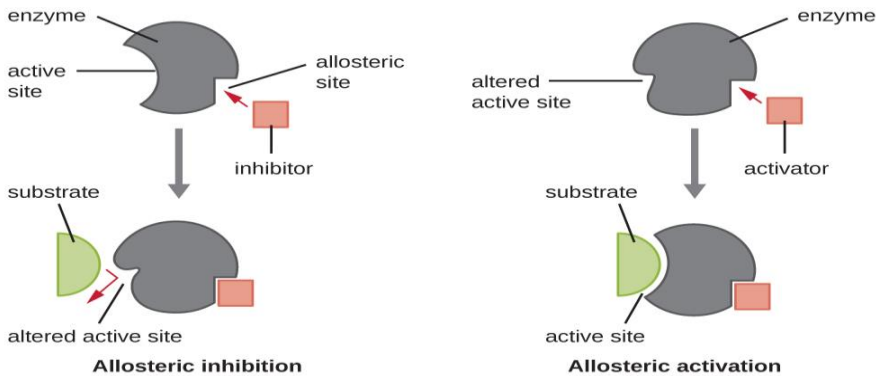
obatan sulfa memberikan contoh yang baik dari persaingan kompetitif. Mereka digunakan untuk mengobati infeksi bakteri karena mereka mengikat situs aktif enzim dalam jalur sintesis asam folat bakteri. Ketika hadir dalam dosis yang cukup, obat sulfa mencegah sintesis asam folat, dan bakteri tidak dapat tumbuh karena tidak dapat mensintesis DNA, RNA, dan protein. Manusia tidak terpengaruh karena kita memperoleh asam folat dari makanan kita.

Misalnya, untuk memastikan ekspresi dalam *Thermus* dari kanamisin adenil yang termostabil transferase, dikembangkan gen fusi di mana penanda resistensi dikendalikan oleh promotor dan tempat pengikatan ribosom slpA. Selanjutnya, ditambahkan ke kedua ujungnya gen fusi ini menduplikasi situs pengenalan untuk enzim restriksi Pst, BamHI, dan XmaI, sedemikian rupa sehingga dapat dimurnikan setelah pencernaan dengan salah satu dari mereka (De Pedro, 1993).

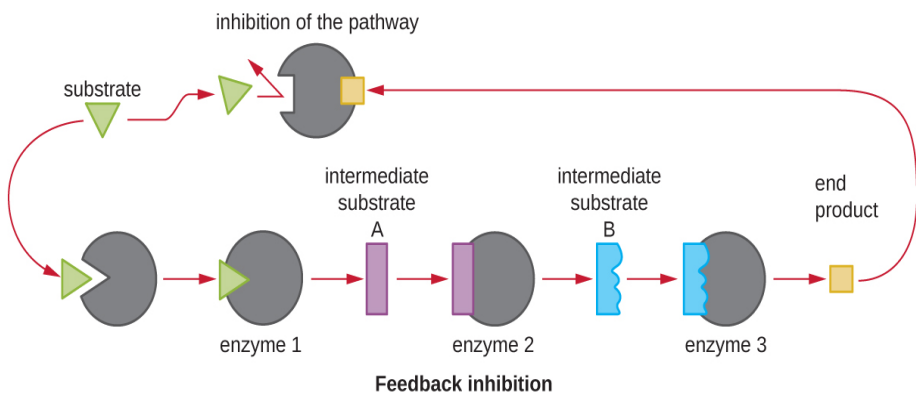
Di sisi lain, inhibitor non-kompetitif (alosterik) berikatan dengan enzim di situs alosterik, lokasi selain situs aktif, dan masih dapat memblokir pengikatan substrat ke situs aktif dengan menginduksi perubahan konformasi yang mengurangi afinitas enzim terhadap substratnya. Karena hanya satu molekul inhibitor yang dibutuhkan per enzim untuk penghambatan yang efektif, konsentrasi inhibitor yang dibutuhkan untuk penghambatan non-kompetitif biasanya jauh lebih rendah daripada konsentrasi substrat.

Selain inhibitor alosterik, terdapat aktivator alosterik yang mengikat lokasi pada enzim yang jauh dari situs aktif, menginduksi perubahan konformasi yang meningkatkan afinitas situs aktif enzim untuk substratnya. Kontrol alosterik adalah mekanisme penting regulasi jalur metabolisme yang terlibat dalam katabolisme dan anabolisme. Dengan cara yang paling efisien dan elegan, sel telah berevolusi juga untuk menggunakan produk dari reaksi metabolisme mereka sendiri untuk penghambatan umpan balik aktivitas enzim. Penghambatan umpan balik melibatkan penggunaan produk jalur untuk

mengatur produksi lebih lanjut. Sel merespons kelimpahan produk tertentu dengan memperlambat produksi selama reaksi anabolik atau katabolik (Gambar 4.4).



(a)



(b)

Gambar 4.4. (a) Pengikatan inhibitor alosterik mengurangi aktivitas enzim, tetapi pengikatan aktivator alosterik meningkatkan aktivitas enzim. (b) Penghambatan umpan balik, di mana produk akhir jalur berfungsi sebagai penghambat non-kompetitif terhadap enzim di awal jalur, merupakan mekanisme penting regulasi alosterik dalam sel

4.5 Katabolisme

4.5.1. Katabolisme Karbohidrat

Penguraian/pemecahan senyawa kompleks menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana dan menghasilkan energi yang dapat digunakan organisme untuk melakukan aktivitasnya dikenal dengan istilah katabolisme. Reaksi katabolik menghasilkan molekul perantara yang juga digunakan sebagai bahan penyusun anabolisme.

Contoh umum yang digunakan untuk memperkenalkan konsep metabolisme adalah katabolisme karbohidrat. Untuk kemoheterotrof, contoh metabolisme dimulai dengan katabolisme polisakarida seperti glikogen, pati, atau selulosa. Enzim seperti amilase, yang memecah glikogen atau pati, dan enzim selulase, yang memecah selulosa, dapat menyebabkan hidrolisis ikatan glikosidik antara monomer glukosa dalam polimer-polimer ini, melepaskan glukosa untuk katabolisme lebih lanjut.

Glikolisis

Merupakan langkah awal dalam pemecahan glukosa, contoh yang paling umum adalah jalur Embden-Meyerhoff-Parnas, menghasilkan dua piruvat, dua molekul NADH, dan dua (hasil bersih) ATP per molekul glukosa awal.

Untuk bakteri, eukariota, dan sebagian besar archaea, glikolisis adalah jalur yang paling umum untuk katabolisme glukosa; glikolisis menghasilkan energi, pembawa elektron tereduksi, dan molekul prekursor untuk metabolisme sel. Setiap organisme hidup melakukan beberapa bentuk glikolisis, yang menunjukkan bahwa mekanisme ini merupakan proses metabolisme universal yang kuno. Proses itu sendiri tidak menggunakan oksigen; namun, glikolisis dapat digabungkan dengan proses metabolisme tambahan yang bersifat aerobik atau anaerobik. Glikolisis terjadi di dalam sitoplasma sel prokariotik dan eukariotik. Proses ini dimulai dengan satu molekul glukosa

enam karbon dan diakhiri dengan dua molekul gula tiga karbon yang disebut piruvat. Piruvat dapat dipecah lebih lanjut setelah glikolisis memanfaatkan lebih banyak energi melalui respirasi aerobik atau anaerobik, tetapi banyak organisme, termasuk banyak mikroba, mungkin tidak dapat bernapas; untuk organisme ini, glikolisis mungkin satu-satunya sumber untuk menghasilkan ATP.

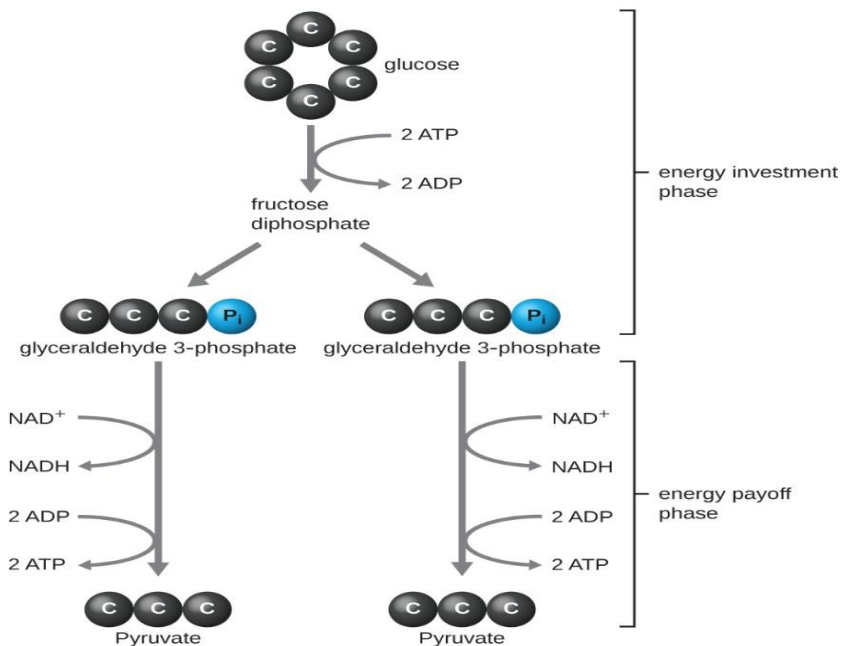
Jenis glikolisis yang ditemukan pada hewan dan yang paling umum pada mikroba adalah jalur Embden-Meyerhof-Parnas (EMP), yang dinamai menurut nama Gustav Embden (1874-1933), Otto Meyerhof (1884-1951), dan Jakub Parnas (1884-1949). Glikolisis menggunakan jalur EMP terdiri dari dua fase yang berbeda (Gambar 4.5).

Bagian pertama dari jalur ini, yang disebut fase investasi energi, menggunakan energi dari dua molekul ATP untuk memodifikasi molekul glukosa sehingga molekul gula enam karbon dapat dipecah secara merata menjadi dua molekul tiga karbon terfosforilasi yang disebut gliseraldehida 3-fosfat (G3P). Bagian kedua dari jalur ini, yang disebut fase pembayaran energi, mengekstrak energi dengan mengoksidasi G3P menjadi piruvat, menghasilkan empat molekul ATP dan mereduksi dua molekul NAD^+ menjadi dua molekul NADH, menggunakan elektron yang berasal dari glukosa.

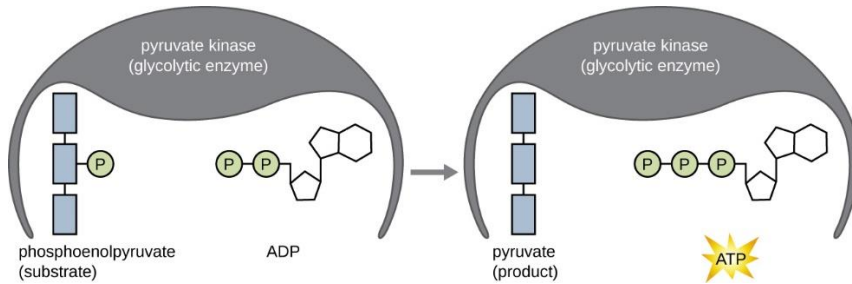
Molekul ATP yang dihasilkan selama fase pembayaran energi glikolisis dibentuk oleh fosforilasi tingkat substrat, salah satu dari dua mekanisme untuk memproduksi ATP. Dalam fosforilasi tingkat substrat, gugus fosfat dihilangkan dari molekul organik dan secara langsung ditransfer ke molekul ADP yang tersedia, menghasilkan ATP. Selama glikolisis, gugus fosfat berenergi tinggi dari molekul perantara ditambahkan ke ADP untuk membuat ATP.

Secara keseluruhan, dalam proses glikolisis ini, hasil dari pemecahan satu molekul glukosa adalah:

- 2 molekul ATP
- 2 molekul NADH
- 2 molekul piruvat



Gambar 4.5. Fase investasi energi dari jalur glikolisis Embden-Meyerhof-Parnas menggunakan dua molekul ATP untuk memfosforilasi glukosa, membentuk dua molekul gliseraldehida 3-fosfat (G3P). Fase pembayaran energi memanfaatkan energi dalam molekul G3P, menghasilkan empat molekul ATP, dua molekul NADH, dan dua piruvat.



Gambar 4.6. ATP yang dibuat selama glikolisis adalah hasil dari fosforilasi tingkat substrat. Salah satu dari dua reaksi enzimatik dalam fase hasil energi dari glikolisis Embden Meyerhof-Parnas yang menghasilkan ATP dengan cara ini ditunjukkan di sini.

Jalur Glikolitik Lainnya

Ketika kita merujuk pada glikolisis, kecuali dinyatakan lain, kita mengacu pada jalur EMP yang digunakan oleh hewan dan banyak bakteri. Namun, beberapa prokariota menggunakan jalur glikolitik alternatif. Salah satu alternatif yang penting adalah jalur Entner-Doudoroff (ED), yang dinamai sesuai dengan nama penemunya, Nathan Entner dan Michael Doudoroff (1911-1975). Meskipun beberapa bakteri, termasuk patogen gram negatif oportunistik *Pseudomonas aeruginosa*, hanya mengandung jalur ED untuk glikolisis, bakteri lain, seperti *E. coli*, memiliki kemampuan untuk menggunakan jalur ED atau jalur EMP.

N. meningitidis memiliki jalur Entner-Doudoroff dan jalur pentosa fosfat dan asam trikarboksilat (TCA). Ia dapat menggunakan glukosa dan maltosa sebagai sumber karbon, tetapi tampaknya tidak menggunakan yang lain gula yang biasa dimetabolisme. Meningokokus juga dapat menggunakan piruvat dan laktat sebagai sumber karbon (Amstrong, 2015)

Jenis jalur glikolitik ketiga yang terjadi pada semua sel, yang sangat berbeda dari dua jalur sebelumnya, adalah jalur pentosa fosfat (PPP) yang juga disebut jalur fosfoglukonat atau pirau heksosa monofosfat. Bukti menunjukkan bahwa PPP

mungkin merupakan jalur glikolitik universal yang paling kuno. Perantara dari PPP digunakan untuk biosintesis nukleotida dan asam amino. Oleh karena itu, jalur glikolitik ini mungkin lebih disukai ketika sel membutuhkan asam nukleat dan/atau sintesis protein.

Reaksi Transisi, Koenzim A, dan Siklus Krebs

Reaksi Transisi : reaksi yang menghubungkan glikolisis dengan siklus Krebs, di mana setiap piruvat didekarboksilasi dan dioksidasi (membentuk NADH), dan gugus asetil dua karbon yang dihasilkan melekat pada molekul pembawa besar yang disebut koenzim A, yang menghasilkan pembentukan asetil-KoA dan CO₂; juga disebut reaksi jembatan

Koenzim A : merupakan molekul organik yang diperlukan untuk fungsi enzim yang tepat yang tidak dikonsumsi dan dapat digunakan kembali

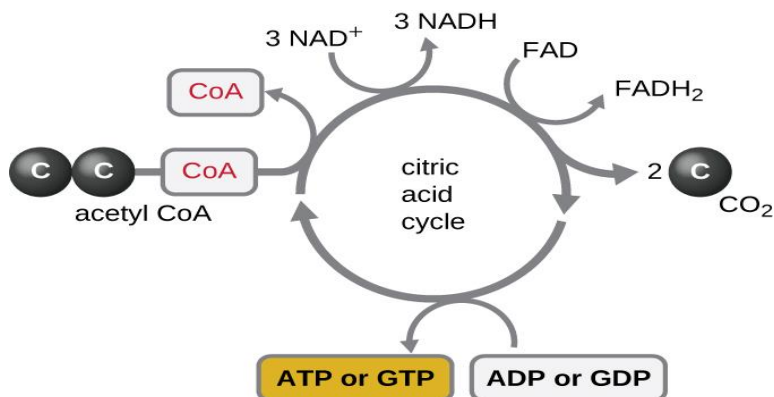
Siklus Krebs : jalur siklik di mana setiap unit dua karbon yang memasuki siklus dioksidasi lebih lanjut, menghasilkan tiga NADH, satu FADH₂, dan satu ATP melalui fosforilasi tingkat substrat, melepaskan dua molekul CO₂ dan meregenerasi molekul yang digunakan pada langkah pertama; juga disebut siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat

Glikolisis menghasilkan piruvat, yang dapat dioksidasi lebih lanjut untuk menangkap lebih banyak energi. Agar piruvat dapat memasuki jalur oksidatif berikutnya, piruvat harus didekarboksilasi terlebih dahulu oleh kompleks enzim piruvat dehidrogenase menjadi gugus asetil dua karbon dalam reaksi transisi, yang juga disebut reaksi jembatan.

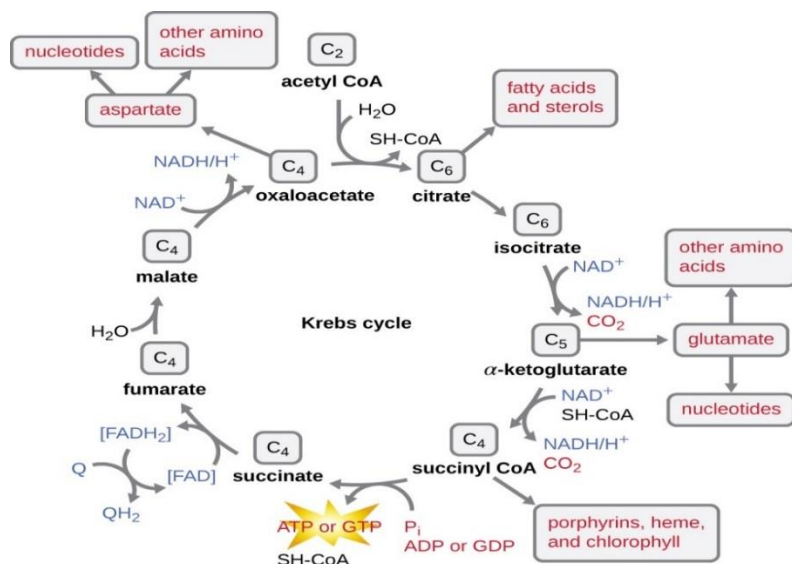
Dalam reaksi transisi, elektron juga ditransfer ke NAD⁺ untuk membentuk NADH. Untuk melanjutkan ke tahap berikutnya dari proses metabolisme ini, asetil dua karbon yang relatif kecil harus dilekatkan pada senyawa pembawa yang sangat besar yang disebut koenzim A (CoA). Reaksi transisi terjadi dalam matriks mitokondria eukariota; pada prokariota,

reaksi ini terjadi dalam sitoplasma karena prokariota tidak memiliki organel yang tertutup membran.

Siklus Krebs memindahkan elektron yang tersisa dari gugus asetil yang dihasilkan selama reaksi transisi ke molekul pembawa elektron, sehingga mengurangnya. Siklus Krebs juga terjadi dalam sitoplasma prokariota bersama dengan glikolisis dan reaksi transisi, tetapi siklus Krebs terjadi dalam matriks mitokondria sel eukariota di mana reaksi transisi juga terjadi. Siklus Krebs dinamai sesuai dengan nama penemunya, ilmuwan Inggris Hans Adolf Krebs (1900-1981) dan juga disebut siklus asam sitrat, atau siklus asam trikarboksilat (TCA) karena asam sitrat memiliki tiga gugus karboksil dalam strukturnya. Tidak seperti glikolisis, siklus Krebs adalah sebuah lingkaran tertutup: Bagian terakhir dari jalur ini meregenerasi senyawa yang digunakan pada langkah pertama (Gambar 4.7). Delapan langkah dari siklus ini adalah serangkaian reaksi kimia yang menangkap gugus asetil dua karbon (pembawa CoA tidak masuk ke dalam siklus Krebs) dari reaksi transisi, yang ditambahkan ke zat antara empat karbon dalam siklus Krebs, menghasilkan zat antara enam karbon asam sitrat (memberikan nama alternatif untuk siklus ini). Ketika satu putaran siklus kembali ke titik awal perantara empat karbon, siklus tersebut menghasilkan dua molekul CO_2 , satu molekul ATP (atau yang setara, seperti guanosin trifosfat [GTP]) yang dihasilkan oleh fosforilasi tingkat substrat, dan tiga molekul NADH serta satu molekul FADH_2 . Siklus ini bersifat anabolik dan katabolik (Gambar 4.8).



Gambar 4.7. Siklus Krebs, juga dikenal sebagai siklus asam sitrat, dirangkum di sini. Perhatikan asetil dua karbon yang masuk menghasilkan keluaran utama per putaran berupa dua CO₂, tiga NADH, satu FADH₂, dan satu molekul ATP (atau GTP) yang dibuat oleh fosforilasi tingkat substrat. Diperlukan dua putaran siklus Krebs untuk memproses semua karbon dari satu molekul glukosa.



Gambar 4.8. Banyak organisme menggunakan zat antara dari siklus Krebs, seperti asam amino, asam lemak, dan nukleotida, sebagai bahan penyusun biosintesis.

Jalur EMP tidak hanya berfungsi untuk menghasilkan ATP tetapi juga untuk menyediakan prekursor untuk biosintesis (Tabel 4.1). Jalur EMP diatur oleh status energi sel serta oleh konsentrasi zat antara metabolik tertentu. Sebuah parameter, energi adenilat biaya (EC), dirancang untuk menggambarkan status energi dalam suatu budaya (Bagian 5.6.2). Umumnya jalur glikolitik diaktifkan pada EC rendah rendah, dan ditekan pada nilai EC yang tinggi. Seperti yang dinyatakan sebelumnya, enzim yang tidak mengkatalisis reaksi sebaliknya diatur. Dalam EMP jalur, enzim ini adalah fosfofruktokinase dan piruvat kinase. Pada organisme di mana glukosa diangkut dengan transpor aktif, heksokinase ditekan oleh produknya, glukosa-6-fosfat. (Kim, 2008)

4.5.2. Katabolisme Lipid dan Protein

Katabolisme Lipid

Trigliserida adalah bentuk penyimpanan energi jangka panjang pada hewan. Trigliserida terbuat dari gliserol dan tiga asam lemak. Fosfolipid menyusun membran sel dan organel semua organisme kecuali archaea. Struktur fosfolipid mirip dengan trigliserida kecuali salah satu asam lemak digantikan oleh gugus kepala terfosforilasi. Trigliserida dan fosfolipid dipecah terlebih dahulu dengan melepaskan rantai asam lemak (dan/atau gugus kepala terfosforilasi, dalam kasus fosfolipid) dari tulang punggung gliserol tiga karbon. Reaksi penguraian trigliserida dikatalisis oleh lipase dan reaksi yang melibatkan fosfolipid dikatalisis oleh fosfolipase. Enzim-enzim ini berkontribusi pada virulensi mikroba tertentu, seperti bakteri *Staphylococcus aureus* dan jamur *Cryptococcus neoformans*. Mikroba ini menggunakan fosfolipase untuk menghancurkan lipid dan fosfolipid dalam sel inang dan kemudian menggunakan produk katabolik untuk energi (Oren, 2010).

Produk yang dihasilkan dari katabolisme lipid, gliserol dan asam lemak, dapat terdegradasi lebih lanjut. Gliserol dapat difosforilasi menjadi gliserol-3-fosfat dan dengan mudah diubah menjadi gliseraldehid 3-fosfat, yang berlanjut melalui glikolisis.

Asam lemak yang dilepaskan, dipecah dalam proses yang disebut β -oksidasi, yang secara berurutan menghilangkan gugus asetil dua karbon dari ujung rantai asam lemak, mereduksi NAD⁺ dan FAD untuk menghasilkan NADH dan FADH₂, yang elektronnya dapat digunakan untuk membuat ATP dengan fosforilasi oksidatif. Gugus asetil yang dihasilkan selama β -oksidasi dibawa oleh koenzim A ke siklus Krebs, dan pergerakannya melalui siklus ini menghasilkan degradasi menjadi CO₂, menghasilkan ATP melalui fosforilasi tingkat substrat dan molekul NADH dan FADH₂ tambahan.

Jenis lipid lain juga dapat didegradasi oleh mikroba tertentu. Sebagai contoh, kemampuan patogen tertentu, seperti *Mycobacterium tuberculosis*, untuk mendegradasi kolesterol berkontribusi pada virulensinya. Rantai samping kolesterol dapat dengan mudah dihilangkan secara enzimatis, tetapi degradasi cincin menyatu yang tersisa lebih bermasalah. Keempat cincin yang menyatu secara berurutan dipecah dalam proses multi-langkah yang difasilitasi oleh enzim tertentu, dan produk yang dihasilkan, termasuk piruvat, dapat dikatabolisme lebih lanjut dalam siklus Krebs.

Katabolisme Protein

Protein didegradasi melalui aksi bersama berbagai enzim protease mikroba. Protease ekstraseluler memotong protein secara internal pada urutan asam amino tertentu, memecahnya menjadi peptida yang lebih kecil yang kemudian dapat diambil oleh sel. Beberapa patogen yang penting secara klinis dapat diidentifikasi melalui kemampuannya menghasilkan jenis protease ekstraseluler tertentu. Sebagai contoh, produksi protease ekstraseluler gelatinase oleh anggota genera *Proteus* dan *Serratia* dapat digunakan untuk membedakannya dari bakteri enterik gram negatif lainnya. Setelah inokulasi dan pertumbuhan mikroba dalam kaldu gelatin, degradasi protein gelatin akibat produksi gelatinase mencegah pemadatan gelatin saat didinginkan. Patogen lain dapat dibedakan berdasarkan kemampuannya mendegradasi kasein, protein utama yang ditemukan dalam susu. Ketika ditumbuhkan pada agar susu skim,

produksi kaseinase protease ekstraseluler menyebabkan degradasi kasein, yang muncul sebagai zona bening di sekitar pertumbuhan mikroba. Produksi kaseinase oleh patogen oportunistis *Pseudomonas aeruginosa* dapat digunakan untuk membedakannya dari bakteri gram negatif terkait lainnya (Ray, 2005).

Setelah degradasi protease ekstraseluler dan penyerapan peptida di dalam sel, peptida kemudian dapat dipecah lebih lanjut menjadi asam amino individu dengan protease intraseluler tambahan, dan setiap asam amino dapat dideaminasi secara enzimatis untuk menghilangkan gugus amino. Molekul-molekul yang tersisa kemudian dapat memasuki reaksi transisi atau siklus Krebs.

4.6 Respirasi Sel

Respirasi seluler dimulai ketika elektron ditransfer dari NADH dan FADH₂-yang dibuat dalam glikolisis, reaksi transisi, dan siklus Krebs-melalui serangkaian reaksi kimia ke akseptor elektron anorganik akhir (baik oksigen dalam respirasi aerobik atau molekul anorganik non-oksigen dalam respirasi anaerobik). Transfer elektron ini terjadi di bagian dalam membran sel sel prokariotik atau di kompleks protein khusus di membran dalam mitokondria sel eukariotik. Energi elektron dipanen untuk menghasilkan gradien elektrokimia melintasi membran, yang digunakan untuk membuat ATP melalui fosforilasi oksidatif.

Sistem Transpor Elektron

Sistem transpor elektron (ETS) adalah komponen terakhir yang terlibat dalam proses respirasi seluler; terdiri dari serangkaian kompleks protein yang terkait dengan membran dan pembawa elektron aksesori bergerak yang terkait. Transpor elektron adalah serangkaian reaksi kimia yang menyerupai brigade ember di mana elektron dari NADH dan FADH₂ berpindah dengan cepat dari satu pembawa elektron ETS ke pembawa elektron berikutnya. Pembawa ini dapat melewati elektron di dalam ETS karena potensi redoksnya. Agar protein

atau bahan kimia dapat menerima elektron, protein atau bahan kimia tersebut harus memiliki potensi redoks yang lebih positif daripada donor elektron. Oleh karena itu, elektron berpindah dari pembawa elektron dengan potensi redoks yang lebih negatif ke pembawa elektron dengan potensi redoks yang lebih positif. Empat kelas utama pembawa elektron yang terlibat dalam sistem transpor elektron eukariotik dan prokariotik adalah sitokrom, flavoprotein, protein besi-belerang, dan kuinon.

Dalam respirasi aerobik, akseptor elektron terakhir (yaitu yang memiliki potensi redoks paling positif) pada akhir ETS adalah molekul oksigen (O_2) yang direduksi menjadi air (H_2O) oleh pembawa ETS terakhir. Pembawa elektron ini, sitokrom oksidase, berbeda di antara jenis bakteri dan dapat digunakan untuk membedakan bakteri yang terkait erat untuk diagnosis. Sebagai contoh, *Pseudomonas aeruginosa* oportunistik gram negatif dan *Vibrio cholerae* penyebab kolera gram negatif menggunakan sitokrom c oksidase, yang dapat dideteksi dengan tes oksidase, sedangkan Enterobacteriaceae gram negatif lainnya, seperti *E. coli*, negatif untuk tes ini karena menghasilkan jenis sitokrom oksidase yang berbeda.

Ada banyak keadaan di mana respirasi aerobik tidak memungkinkan, termasuk salah satu atau beberapa hal berikut ini:

- Sel tidak memiliki gen yang mengkode sitokrom oksidase yang sesuai untuk mentransfer elektron ke oksigen pada akhir sistem transpor elektron.
- Sel tidak memiliki gen yang mengkode enzim untuk meminimalkan efek merusak yang parah dari radikal oksigen berbahaya yang dihasilkan selama respirasi aerobik, seperti hidrogen peroksida (H_2O_2) atau superoksida (O_2^-)
- Sel tidak memiliki jumlah oksigen yang cukup untuk melakukan respirasi aerobik.

Salah satu alternatif yang mungkin untuk respirasi aerobik adalah *respirasi anaerobik*, menggunakan molekul anorganik

selain oksigen sebagai akseptor elektron akhir. Ada banyak jenis respirasi anaerobik yang ditemukan pada bakteri dan archaea. Denitrifier adalah bakteri penting tanah yang menggunakan nitrat (NO_3^-) dan nitrit (NO_2^-) sebagai akseptor elektron akhir, menghasilkan gas nitrogen (N_2). Banyak bakteri yang bernapas secara aerobik, termasuk *E. coli*, beralih menggunakan nitrat sebagai akseptor elektron akhir dan memproduksi nitrit ketika kadar oksigen telah habis.

Mikroba yang menggunakan respirasi anaerobik umumnya memiliki siklus Krebs yang utuh, sehingga organisme ini dapat mengakses energi dari molekul NADH dan FADH_2 yang terbentuk. Namun, respirator anaerobik menggunakan pembawa ETS yang diubah yang dikodekan oleh genom mereka, termasuk kompleks yang berbeda untuk transfer elektron ke akseptor elektron akhir mereka. Gradien elektrokimia yang lebih kecil dihasilkan dari sistem transfer elektron ini, sehingga lebih sedikit ATP yang terbentuk melalui respirasi anaerobik.

Secara keseluruhan, hasil maksimum teoritis ATP yang dibuat selama respirasi aerobik lengkap glukosa adalah 38 molekul, dengan empat dibuat oleh fosforilasi tingkat substrat dan 34 dibuat oleh fosforilasi oksidatif.

Pada kenyataannya, total hasil ATP biasanya lebih sedikit, berkisar antara satu hingga 34 molekul ATP, tergantung pada apakah sel menggunakan respirasi aerobik atau respirasi anaerobik; pada sel eukariotik, sejumlah energi dikeluarkan untuk mengangkut zat antara dari sitoplasma ke dalam mitokondria, yang mempengaruhi hasil ATP.

Pada Tabel 4.1. merupakan ringkasan hasil maksimum ATP secara teoritis dari berbagai proses selama respirasi aerobik lengkap satu molekul glukosa.

Tabel 4.1. Hasil maksimum ATP secara teoritis dari berbagai proses selama respirasi aerobik lengkap satu molekul glukosa

Source	Carbon Flow	Molecules of Reduced Coenzymes Produced	Net ATP Molecules Made by Substrate-Level Phosphorylation	Net ATP Molecules Made by Oxidative Phosphorylation	Theoretical Maximum Yield of ATP Molecules
Glycolysis (EMP)	Glucose (6C) $\longrightarrow$ 2 pyruvates (2C)	2 NADH	2 ATP	6 ATP from 2 NADH	8
Transition reaction	2 pyruvates (3C) $\longrightarrow$ 2 acetyl (2C) + 2 CO ₂	2 NADH		6 ATP from 2 NADH	6
Krebs cycle	2 acetyl (2C) $\longrightarrow$ 4 CO ₂	6 NADH 2 FADH ₂	2 ATP	18 ATP from 6 NADH 4 ATP from 2 FADH ₂	24
Total:	glucose (6C) $\longrightarrow$ 6 CO ₂	10 NADH 2 FADH ₂	4 ATP	34 ATP	38 ATP

4.7 Fermentasi

Banyak sel tidak dapat melakukan respirasi karena satu atau beberapa hal berikut:

1. Sel tidak memiliki akseptor elektron akhir anorganik yang sesuai dalam jumlah yang cukup untuk melakukan respirasi sel :
2. Sel kekurangan gen untuk membuat kompleks dan pembawa elektron yang sesuai dalam sistem transpor elektron.
3. Sel kekurangan gen untuk membuat satu atau lebih enzim dalam siklus Krebs.

Sementara kekurangan akseptor elektron akhir anorganik yang tepat bergantung pada lingkungan, dua kondisi lainnya ditentukan secara genetik. Dengan demikian, banyak prokariota, termasuk anggota genus *Streptococcus* yang penting secara klinis, secara permanen tidak mampu melakukan respirasi, bahkan di hadapan oksigen. Sebaliknya, banyak prokariota

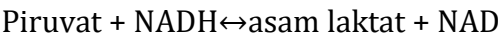
bersifat fakultatif, yang berarti bahwa, jika kondisi lingkungan berubah untuk menyediakan akseptor elektron akhir anorganik yang sesuai untuk respirasi, organisme yang mengandung semua gen yang diperlukan untuk melakukannya akan beralih ke respirasi seluler untuk metabolisme glukosa karena respirasi memungkinkan produksi ATP yang jauh lebih besar per molekul glukosa.

Jika respirasi tidak terjadi, NADH harus dioksidasi ulang menjadi NAD^+ untuk digunakan kembali sebagai pembawa elektron untuk glikolisis, satu-satunya mekanisme sel untuk memproduksi ATP, agar dapat berlanjut. Beberapa sistem hidup menggunakan molekul organik (biasanya piruvat) sebagai akseptor elektron terakhir melalui proses yang disebut fermentasi. Fermentasi tidak melibatkan sistem transpor elektron dan tidak secara langsung menghasilkan ATP tambahan di luar yang dihasilkan selama glikolisis melalui fosforilasi tingkat substrat. Organisme yang melakukan fermentasi, yang disebut fermentor, menghasilkan maksimum dua molekul ATP per glukosa selama glikolisis. Tabel 4.2. membandingkan akseptor elektron akhir dan metode sintesis ATP pada respirasi aerobik, respirasi anaerobik, dan fermentasi. Perhatikan bahwa jumlah molekul ATP yang ditunjukkan untuk glikolisis mengasumsikan jalur Embden-Meyerhof-Parnas. Jumlah molekul ATP yang dibuat oleh fosforilasi tingkat substrat (SLP) versus fosforilasi oksidatif (OP) ditunjukkan.

Tabel 4.2. Perbandingan Respirasi Versus Fermentasi

Type of Metabolism	Example	Final Electron Acceptor	Pathways Involved in ATP Synthesis (Type of Phosphorylation)	Maximum Yield of ATP Molecules
Aerobic respiration	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	O ₂	EMP glycolysis (SLP)	2
			Krebs cycle (SLP)	2
			Electron transport and chemiosmosis (OP):	34
			Total	38
Anaerobic respiration	<i>Paracoccus denitrificans</i>	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , Fe ⁺³ , CO ₂ , other inorganics	EMP glycolysis (SLP)	2
			Krebs cycle (SLP)	2
			Electron transport and chemiosmosis (OP):	1-32
			Total	5-36
Fermentation	<i>Candida albicans</i>	Organics (usually pyruvate)	EMP glycolysis (SLP)	2
			Fermentation	0

Fermentasi oleh beberapa bakteri, seperti yang ada dalam yogurt dan produk makanan asam lainnya, dan oleh hewan dalam otot selama penipisan oksigen, adalah fermentasi asam laktat. Reaksi kimia fermentasi asam laktat adalah sebagai berikut:

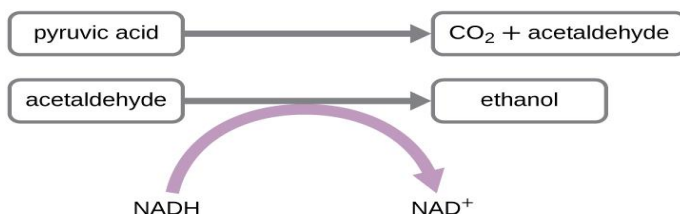


Bakteri dari beberapa genera gram positif, termasuk *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, dan *Streptococcus*, secara kolektif dikenal sebagai bakteri asam laktat (BAL), dan berbagai jenis bakteri ini penting dalam produksi makanan. Selama produksi yogurt dan keju, lingkungan yang sangat asam yang dihasilkan oleh fermentasi asam laktat mengubah sifat protein yang terkandung dalam susu, menyebabkannya mengeras. Ketika asam laktat adalah satu-satunya produk fermentasi, prosesnya dikatakan sebagai fermentasi homolaktat; seperti halnya *Lactobacillus delbrueckii* dan *S. thermophiles* yang digunakan dalam produksi yogurt. Namun, banyak bakteri melakukan fermentasi heterolaktik, menghasilkan campuran asam laktat, etanol dan/atau asam asetat, dan CO₂ sebagai hasilnya, karena

penggunaan jalur pentosa fosfat bercabang alih-alih jalur EMP untuk glikolisis. Salah satu fermentor heterolaktat yang penting adalah *Leuconostoc mesenteroides*, yang digunakan untuk mengasamkan sayuran seperti mentimun dan kubis, menghasilkan acar dan asinan kubis.

Bakteri asam laktat juga penting secara medis. Produksi lingkungan pH rendah di dalam tubuh menghambat pembentukan dan pertumbuhan patogen di area ini. Sebagai contoh, mikrobiota vagina sebagian besar terdiri dari bakteri asam laktat, tetapi ketika bakteri ini berkurang, ragi dapat berkembang biak, menyebabkan infeksi ragi. Selain itu, bakteri asam laktat penting dalam menjaga kesehatan saluran pencernaan dan, dengan demikian, merupakan komponen utama probiotik.

Proses fermentasi lain yang sudah dikenal adalah fermentasi alkohol, yang menghasilkan etanol. Reaksi fermentasi etanol ditunjukkan pada Gambar 4.10. Pada reaksi pertama, enzim piruvat dekarboksilase menghilangkan gugus karboksil dari piruvat, melepaskan gas CO₂ sambil menghasilkan molekul dua karbon asetaldehida. Reaksi kedua, yang dikatalisis oleh enzim alkohol dehidrogenase, memindahkan elektron dari NADH ke asetaldehida, menghasilkan etanol dan NAD⁺. Fermentasi etanol piruvat oleh ragi *Saccharomyces cerevisiae* digunakan dalam produksi minuman beralkohol dan juga membuat produk roti meningkat karena produksi CO₂. Di luar industri makanan, fermentasi etanol dari produk tanaman penting dalam produksi bahan bakar nabati.



Gambar 4.10. Reaksi kimia dari fermentasi alkohol ditunjukkan di sini

Fermentasi etanol penting dalam produksi minuman beralkohol dan roti.

Selain fermentasi asam laktat dan fermentasi alkohol, banyak metode fermentasi lain yang terjadi pada prokariota, semuanya bertujuan untuk memastikan pasokan NAD⁺ yang cukup untuk glikolisis (Tabel 4.2)

Tanpa jalur ini, glikolisis tidak akan terjadi dan tidak ada ATP yang dipanen dari pemecahan glukosa. Perlu dicatat bahwa sebagian besar bentuk fermentasi selain fermentasi homolitik menghasilkan gas, umumnya CO₂ dan/atau gas hidrogen. Banyak dari berbagai jenis jalur fermentasi ini juga digunakan dalam produksi makanan dan masing-masing menghasilkan asam organik yang berbeda, yang berkontribusi pada rasa unik dari produk makanan fermentasi tertentu. Asam propionat yang dihasilkan selama fermentasi asam propionat berkontribusi pada rasa khas keju Swiss, misalnya beberapa produk fermentasi penting secara komersial di luar industri makanan. Misalnya, pelarut kimia seperti aseton dan butanol diproduksi selama fermentasi aseton-butanol-etanol. Senyawa fitokimia organik kompleks yang digunakan dalam antibiotik (misalnya, penisilin), vaksin, dan vitamin diproduksi melalui fermentasi asam campuran. Produk fermentasi digunakan di laboratorium untuk membedakan berbagai bakteri untuk tujuan diagnostik. Sebagai contoh, bakteri enterik dikenal karena kemampuannya untuk melakukan fermentasi asam campuran, menurunkan pH, yang dapat dideteksi dengan menggunakan indikator pH. Demikian pula, produksi bakteri asetoin selama fermentasi butanediol juga dapat dideteksi. Produksi gas dari fermentasi juga dapat dilihat dalam tabung Durham terbalik yang memerangkap gas yang dihasilkan dalam kultur kaldu.

Mikroba juga dapat dibedakan berdasarkan substrat yang dapat difermentasi. Sebagai contoh, *E. coli* dapat memfermentasi laktosa, membentuk gas, sedangkan beberapa kerabat dekatnya yang gram negatif tidak bisa. Kemampuan untuk memfermentasi gula alkohol sorbitol digunakan untuk mengidentifikasi strain *E.*

coli enterohemoragik O157: H7 patogenik karena, tidak seperti strain *E. coli* lainnya, strain ini tidak dapat memfermentasi sorbitol. Terakhir, fermentasi manitol membedakan *Staphylococcus aureus* yang memfermentasi manitol dari stafilokokus yang tidak memfermentasi manitol.

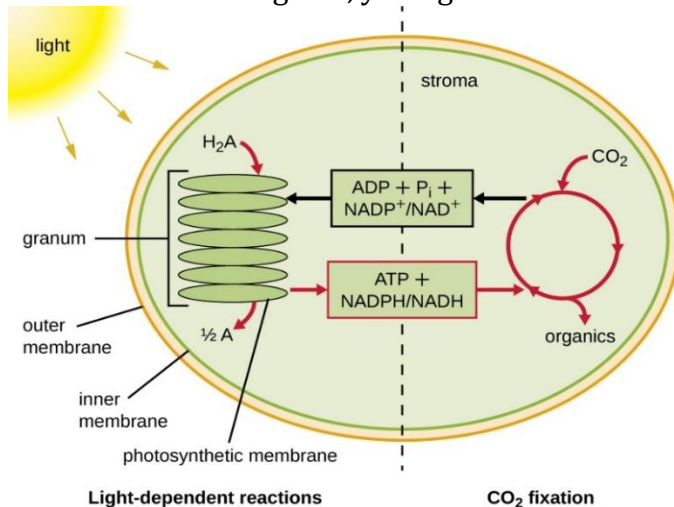
Tabel 4.3. Jalur Fermentasi Umum

Pathway	End Products	Example Microbes	Commercial Products
Acetone-butanol-ethanol	Acetone, butanol, ethanol, CO ₂	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	Commercial solvents, gasoline alternative
Alcohol	Ethanol, CO ₂	<i>Candida</i> , <i>Saccharomyces</i>	Beer, bread
Butanediol	Formic and lactic acid; ethanol; acetoin; 2,3 butanediol; CO ₂ ; hydrogen gas	<i>Klebsiella</i> , <i>Enterobacter</i>	Chardonnay wine
Butyric acid	Butyric acid, CO ₂ , hydrogen gas	<i>Clostridium butyricum</i>	Butter
Lactic acid	Lactic acid	<i>Streptococcus</i> , <i>Lactobacillus</i>	Sauerkraut, yogurt, cheese
Mixed acid	Acetic, formic, lactic, and succinic acids; ethanol, CO ₂ , hydrogen gas	<i>Escherichia</i> , <i>Shigella</i>	Vinegar, cosmetics, pharmaceuticals
Propionic acid	Acetic acid, propionic acid, CO ₂	<i>Propionibacterium</i> , <i>Bifidobacterium</i>	Swiss cheese

Uji fermentasi karbohidrat dilakukan untuk mengetahui kemampuan bakteri untuk memfermentasi karbohidrat tertentu yang dimasukkan dalam media basal, menghasilkan asam atau asam dengan gas yang terlihat. Karbohidrat Karbohidrat meliputi glukosa, laktosa, sukrosa, maltosa, dll. Media gula mengandung 1% gula. Indikator Andrade adalah larutan asam fuchsin yang ditambahkan natrium hidroksida. Ini adalah indikator pH yang ditambahkan ke media basal, yang menunjukkan pembentukan asam organik. Pengujian dilakukan dengan menginokulasi media gula dengan bakteri, diinkubasi pada suhu 37°C selama 18-24 jam. Perubahan dari warna menjadi merah muda (asam) dianggap sebagai tes positif hasil, sedangkan gula berwarna kuning menjadi tidak berwarna (basa) menunjukkan hasil tes negatif. Produksi gas ditunjukkan dengan munculnya gelembung gas dalam tabung Durham (Parija, 2012).

4.8 Fotosintesis

Fotosintesis berlangsung dalam dua tahap yang berurutan: reaksi yang bergantung pada cahaya dan reaksi yang tidak bergantung pada cahaya. Pada reaksi yang bergantung pada cahaya, energi dari cahaya matahari diserap oleh molekul pigmen dalam membran fotosintesis dan diubah menjadi energi kimia yang tersimpan. Pada reaksi yang tidak bergantung pada cahaya, energi kimia yang dihasilkan oleh reaksi yang bergantung pada cahaya digunakan untuk menggerakkan perakitan molekul gula menggunakan CO_2 ; namun, reaksi ini masih bergantung pada cahaya karena produk dari reaksi yang bergantung pada cahaya yang diperlukan untuk menggerakkan reaksi tersebut berumur pendek. Reaksi yang bergantung pada cahaya menghasilkan ATP dan NADPH atau NADH untuk menyimpan energi sementara. Pembawa energi ini digunakan dalam reaksi tidak tergantung cahaya untuk menggerakkan proses "memperbaiki" CO_2 anorganik dalam bentuk organik, yaitu gula.



Gambar 4.11. Reaksi fotosintesis yang bergantung pada cahaya (kiri) mengubah energi cahaya menjadi energi kimia, membentuk ATP dan NADPH. Produk ini digunakan oleh reaksi yang tidak bergantung pada cahaya untuk memfiksasi CO_2 , menghasilkan molekul karbon organik.

Struktur Fotosintesis pada Eukariota dan Prokariota

Pada semua eukariota fototrof, fotosintesis terjadi di dalam kloroplas, sebuah organel yang muncul pada eukariota melalui endosimbiosis bakteri fotosintetik. Kloroplas ini dikelilingi oleh membran ganda dengan lapisan dalam dan luar. Di dalam kloroplas terdapat membran ketiga yang membentuk struktur fotosintesis berbentuk cakram bertumpuk yang disebut tilakoid (Gambar 4.12). Tumpukan tilakoid disebut granum, dan ruang yang mengelilingi granum di dalam kloroplas disebut stroma.

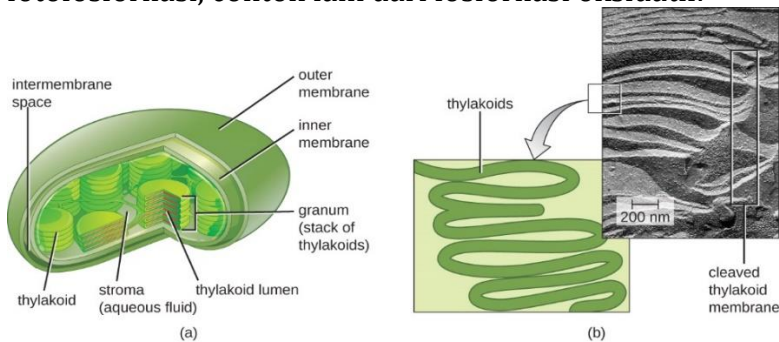
Sebaliknya, membran fotosintesis pada prokariota tidak tersusun atas organel-organel yang tertutup membran yang berbeda, melainkan merupakan daerah lipatan membran plasma. Pada cyanobacteria, misalnya, daerah lipatan ini juga disebut sebagai tilakoid. Dalam kedua kasus tersebut, yang tertanam di dalam membran tilakoid atau membran bakteri fotosintetik lainnya adalah molekul pigmen fotosintetik yang diorganisasikan ke dalam satu atau lebih fotosistem, di mana energi cahaya sebenarnya diubah menjadi energi kimia.

Pigmen fotosintesis di dalam membran fotosintesis diatur ke dalam fotosistem, yang masing-masing terdiri dari kompleks pemanen cahaya (antena) dan pusat reaksi. Kompleks pemanen cahaya terdiri dari beberapa protein dan pigmen terkait yang masing-masing dapat menyerap energi cahaya dan, dengan demikian, menjadi tereksitasi. Energi ini ditransfer dari satu molekul pigmen ke molekul pigmen lainnya hingga akhirnya (setelah sekitar sepersejuta detik) energi tersebut dikirim ke pusat reaksi. Sampai pada titik ini, hanya energi-bukan elektron-yang ditransfer di antara molekul. Pusat reaksi mengandung molekul pigmen yang dapat mengalami oksidasi pada saat eksitasi, yang sebenarnya melepaskan elektron. Pada langkah fotosintesis inilah energi cahaya diubah menjadi elektron tereksitasi.

Berbagai jenis pigmen pemanen cahaya menyerap pola unik panjang gelombang (warna) cahaya tampak. Pigmen memantulkan atau memancarkan panjang gelombang yang tidak dapat diserapnya, sehingga membuatnya tampak dengan warna yang sesuai. Contoh pigmen fotosintesis (molekul yang digunakan untuk menyerap energi matahari) adalah

bakterioklorofil (hijau, ungu, atau merah), karotenoid (oranye, merah, atau kuning), klorofil (hijau), fikoeritrin (biru), dan fikoeritrin (merah). Dengan memiliki campuran pigmen, suatu organisme dapat menyerap energi dari lebih banyak panjang gelombang. Karena bakteri fotosintetik biasanya tumbuh dalam persaingan untuk mendapatkan sinar matahari, setiap jenis bakteri fotosintetik dioptimalkan untuk memanen panjang gelombang cahaya yang biasanya terpapar, yang mengarah pada stratifikasi komunitas mikroba dalam ekosistem air dan tanah berdasarkan kualitas dan penetrasi cahaya.

Setelah kompleks pemanenan cahaya mentransfer energi ke pusat reaksi, pusat reaksi mengirimkan elektron berenergi tinggi, satu per satu, ke pembawa elektron dalam sistem transpor elektron, dan transfer elektron melalui ETS dimulai. ETS mirip dengan yang digunakan dalam respirasi seluler dan tertanam di dalam membran fotosintesis. Pada akhirnya, elektron digunakan untuk menghasilkan NADH atau NADPH. Gradien elektrokimia yang terbentuk melintasi membran fotosintesis digunakan untuk menghasilkan ATP dengan kemiosmosis melalui proses fotofosforilasi, contoh lain dari fosforilasi oksidatif.



Gambar 4.12. (a) Fotosintesis pada eukariota berlangsung di dalam kloroplas, yang mengandung tilakoid yang ditumpuk menjadi grana. (b) Prokariota fotosintetik memiliki daerah lipatan pada membran plasma yang berfungsi seperti tilakoid. (kredit: data batang skala dari Matt Russell).

Reaksi yang tidak bergantung pada cahaya

Setelah energi dari matahari diubah menjadi energi kimia dan disimpan sementara dalam molekul ATP dan NADPH (memiliki masa hidup sepersejuta detik), fotoautotrof memiliki bahan bakar yang dibutuhkan untuk membangun molekul karbohidrat multikarbon, yang dapat bertahan hidup selama ratusan juta tahun, untuk penyimpanan energi jangka panjang. Karbon berasal dari CO₂, gas yang merupakan produk limbah dari respirasi sel.

Siklus Calvin-Benson (dinamai untuk Melvin Calvin [1911-1997] dan Andrew Benson [1917-2015]), jalur biokimia yang digunakan untuk fiksasi CO₂, terletak di dalam sitoplasma bakteri fotosintetik dan di dalam stroma kloroplas eukariotik. Reaksi yang tidak bergantung pada cahaya dari siklus Calvin dapat dibagi menjadi tiga tahap dasar: fiksasi, reduksi, dan regenerasi (lihat Lampiran C untuk ilustrasi rinci tentang siklus Calvin).

Fiksasi: Enzim ribulosa bisfosfat karboksilase (RuBisCO) mengkatalisis penambahan CO₂ menjadi ribulosa bisfosfat (RuBP). Hal ini menghasilkan produksi 3-fosfoglisarat (3-PGA).

Reduksi: Enam molekul ATP dan NADPH (dari reaksi yang bergantung pada cahaya) digunakan untuk mengubah 3-PGA menjadi gliseraldehida 3-fosfat (G3P). Beberapa G3P kemudian digunakan untuk membangun glukosa.

Regenerasi: G3P yang tersisa yang tidak digunakan untuk mensintesis glukosa digunakan untuk meregenerasi RuBP, memungkinkan sistem untuk melanjutkan fiksasi CO₂. Tiga molekul ATP digunakan dalam reaksi regenerasi ini (Openstax, 2022).

Siklus Calvin digunakan secara luas oleh tanaman dan bakteri fotoautotrofik, dan enzim RuBisCO dikatakan sebagai enzim yang paling banyak terdapat di bumi, menyusun 30%-50% dari total protein terlarut dalam kloroplas tanaman.¹ Namun, selain penggunaannya yang lazim pada fotoautotrof, siklus Calvin juga digunakan oleh banyak kemoautotrof nonfotosintetik untuk memfiksasi CO₂. Selain itu, bakteri dan archaea lain menggunakan sistem alternatif untuk fiksasi CO₂. Meskipun

sebagian besar bakteri yang menggunakan alternatif siklus Calvin adalah kemoautotrofik, bakteri fotoautotrofik sulfur hijau tertentu juga terbukti menggunakan jalur fiksasi CO₂ alternatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Armstrong, Sandra K . 2015. *Bacterial Metabolism in the Host Environment: Pathogen Growth and Nutrient Assimilation in the Mammalian Upper Respiratory Tract*. Microbiology Spectrum Journal. Vol.3. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.MBP-0007-2014>.
- Azhar, Tauhid Nur. 2008. *Dasar-Dasar Biologi Molekuler*. Bandung. Widya Padjajaran.
- Baron, Samuel. 1996. Medical Microbiology. 4th Ed (*Bacterial Metabolism*). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK7919/>
- De Pedro,M,A., Holtje,J.V.,Loffelhardt,W. 1993. *Bacterial Growth and Lysis. Metabolism and Structure of the Bacterial Sacculus*. FEMS Symposium No.65. Plenum Press. Spain.
- Fatmawati, Andi., Alang,Hasria., dkk. 2022. *Biologi Sel dan Molekuler*. Hamjah Diha Foundation. NTT-Indonesia
- Kim,Byung H., Gadd,Geoffrey Michael. 2008. *Bacterial Physiology and Metabolism*. Cambridge University Press. NewYork.
- Nelson, David L.,Cox, Michael M. 2012. *Principle Of Biochemistry*. 4th Edition.Lehninger.<http://aulanni.lecture.ub.ac.id/files/2012/01/15616949-Lehninger-Principles-of-Biochemistry-1-copy.pdf>
- Openstax. 2022. *Microbiology*. The Department of Education Open Textbook Pilot Project, the UC Davis Office of the Provost, the UC Davis Library, the California State University Affordable Learning Solutions Program, and Merlot. . <http://LibreTexts.org>
- Oren, Aharon. 2010. *Microbial Metabolism: Importance for Environmental Biotechnology*. Environmental Biotechnology Journal: pp 193–255. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-60327-140-0_5
- Parija, Subhash Chandra. 2012. *Textbook of Microbiology and Immunology*. 2nd Edition. Elsevier. India.
- Ray, Bibek. 2005. *Fundamental Food Microbiology*. Third Ed. CRC Press. Florida.

BAB 5

MIKROBA TANAH DAN SIKLUS BIOGEOKIMIA

Oleh Dodi Satriawan

5.1 Pendahuluan

Mikroba tanah merupakan indikator penting didalam ekosistem tanah. Dengan mengetahui kondisi keberadaan mikroba tanah kita akan mengetahui keadaan tanah apakah dalam keadaan baik atau buruk, atau kita akan mengetahui bagaimana kondisi unsur hara tanaman serta stabilitasnya. Keberadaan mikrobia tanah akan terbentuknya ekosistem didalam perubahan biogeokimia tanah. Biomasa mikrobia tanah akan memanfaatkan bahan organik didalam tanah untuk melakukan serangkaian proses biogeokimia. Mikroba tanah ini dapat berupa bakteri, algae, fungi serta protozoa. Biomasa mikrobia tanah akan mewakili sebagian kecil dari fraksi total karbon serta nitrogen yang terkandung didalam tanah. Total karbon dan nitrogen ini akan dimanfaatkan oleh mikrobia tanah yang akan mengakibatkan jumlah, kualitas biomassa mikroba serta aktifitasnya menjadi faktor kunci didalam pengendalian jumlah unsur karbon dan nitrogen yang dimineralisasi.

Kehadiran mikroba tanah akan memberikan sumber berbagai macam unsur hara yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Kehadiran mikroba tanah juga sebagai agen didalam pembentukan unsur hara yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Mikroba tanah juga dapat menjadi agen perombak didalam bahan organik yang berada didalam tanah sehingga bahan organik ini dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan atau makhluk hidup lainnya didalam tanah. Pada subbab ini kita akan mempelajari mikrobia tanah serta siklus biogeokimia yang terjadi

dilingkungan, sehingga kita dapat mengetahui manfaat dari mikrobia tanah bagi kesuburan pentingnya menjaga keberadaan mikrobia tanah bagi ekosistem tanah dan lingkungan.

5.2 Tanah Merupakan Laboratorium Biologi

Tanam memiliki kandungan energi yang tersimpan didalam senyawa organik yang terkandung didalam tanah. Karena mengandung banyak energi sehingga tanah menjadi tempat hidup berbagai macam jenis makhluk hidup. Senyawa organik yang terkandung didalam tanah akan dimanfaatkan oleh berbagai macam organisme tanah dengan berbagai proses yang terjadi untuk membentuk unsur yang lebih sederhana dan dapat dimanfaatkan oleh organisme tanah. Proses yang terjadi tersebut dapat berupa proses penguraian maupun proses pembentukan senyawa baru.

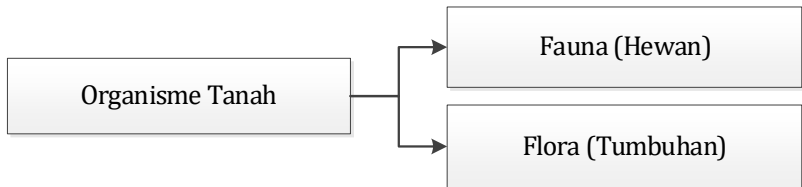
Organisme tanah didalam tanah melakukan berbagai macam aktivitas seperti makhluk hidup pada umumnya. Aktivitas yang berlangsung pada organisme tanah ini dapat bersifat menguntungkan maupun tidak menguntungkan (merugikan) bagi ekosistem atau makhluk hidup lainnya. Proses biogeokimia yang terjadi ditanah ini disebabkan oleh mikroba tanah. Mikroba tanah ini memanfaatkan senyawa organik didalam tanah untuk kebutuhan aktivitas kehidupannya. Senyawa organik yang diurai oleh mikroba ini dapat berupa tumbuhan ataupun hewan yang sudah mengalami kematian.

Proses penguraian tanaman dan hewan yang mati ini dapat mengalami hambatan apabila lingkungan tempat mikroba tanah ini ada, mengalami kerusakan lingkungan. Kerusakan lingkungan yang dapat menyebabkan mikroba tanah mengalami hambatan didalam mendegradasi senyawa organik ini dapat disebabkan oleh masuknya senyawa kimia yang secara berlebihan kedalam tanah. Contohnya berupa pupuk sintetis yang diberikan kedalam tanah.

Pupuk sejadinya merupakan unsur hara yang bermanfaat bagi pertumbuhan tumbuhan. Namun keberadaan pupuk sintetis yang berlebihan akan menyebabkan mikroba tanah akan mengalami hambatan didalam mencerna senyawa organik didalam tanah. Akibatnya mikroba tanah akan mengalami kematian dan penurunan akibat sulitnya mikroba tanah didalam mendegradasi senyawa organik yang merupakan sumber energi bagi kehidupan mikroba tanah. Sedangkan produk hasil penguraian atau degradasi mikroba tanah sangat bermanfaat bagi makhluk hidup lainnya yang berada ditanah, sehingga terjadilah kondisi gangguan ekosistem yang terdapat didalam tanah.

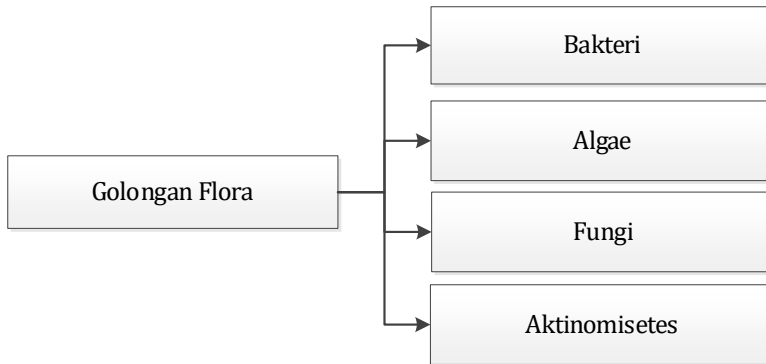
5.3 Mikroba Tanah

Secara garis besar organisme yang berada ditanah dibagi menjadi dua golongan besar yaitu golongan fauna (hewan) dan golongan flora (tumbuhan).



Gambar 5.1 Dua Golongan Organisme Tanah

Golongan tumbuhan yang berada ditanah sebagian besar berukuran mikroskopis. Golongan tumbuhan ini dapat berupa bakteri, algae, fungi, aktinomisetes dan lainnya. Organisme-organisme tersebut masuk kedalam golongan tumbuhan dikarenakan memiliki ciri-ciri seperti yang dimiliki oleh tumbuhan yaitu dapat melakukan proses fotosintesis.



Gambar 5.2 Golongan Flora (Tumbuhan) yang Terdapat Didalam Tanah

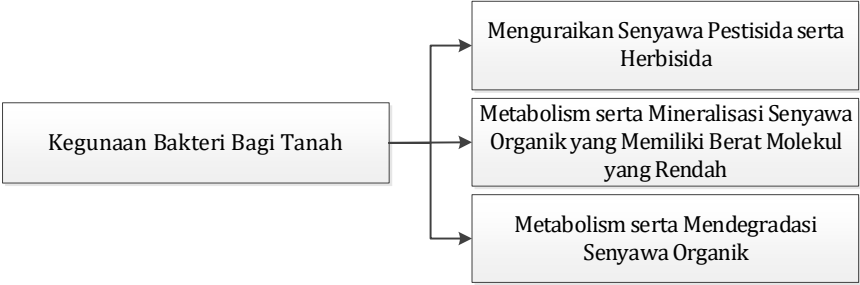
Golongan fauna (hewan) yang terdapat didalam tanah berupa protozoa. Dalam satu lingkungan tanah, sangat jarang ditemukan semua jenis mikroba tanah semuanya (baik golongan flora maupun golongan fauna) didalam tanah.

5.4 Bakteri

Bakteri merupakan salah satu organisme yang memiliki jumlah yang besar berada didalam tanah. Dalam 1 gr tanah dapat memiliki $\pm 10^9$ bakteri. Dalam kondisi yang menguntungkan dimana senyawa organik didalam tanah tinggi, bakteri akan dapat berkembang dengan pesat hingga senyawa organik yang merupakan sumber energi bagi bakteri berkurang atau habis. Perkembangan bakteri yang pesat dapat memberikan petunjuk bagi kita bahwa bakteri didalam tanah dapat berkompetisi dengan positif terhadap mikroorganisme lainnya yang berada didalam tanah didalam memanfaatkan sumber senyawa organik yang berada didalam tanah.

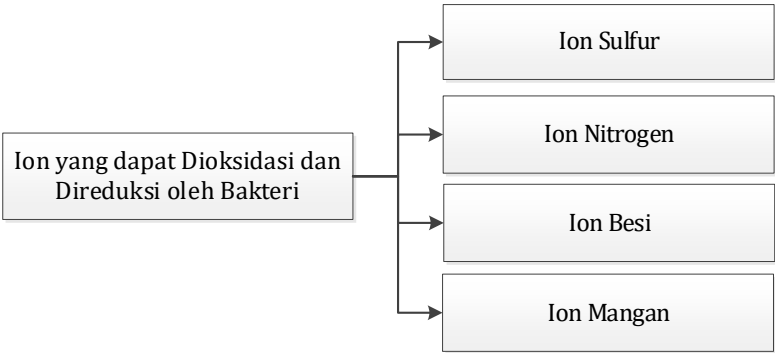
Kebanyakan bakteri yang berada didalam tanah memiliki bentuk berupa berbentuk batang. Bakteri berbentuk batang ini ada yang memiliki flagella yang berfungsi sebagai alat gerak bagi bakteri. Selain itu, kebanyakan bakteri yang berada ditanah memiliki pembungkus yang disebut dengan kapsul. Kapsul bakteri ini merupakan senyawa kompleks yang didapatkan dari

hasil sekresi membrane sel. Kapsul pada bakteri memiliki fungsi sebagai pelindung bagi bakteri dari gangguan yang didapatkan dari luar. Timbunan kapsul yang banyak dit tanah dapat memperbaiki kualitas struktur tanah yang disebabkan pengikatan bahan-bahan mineral dan partikel-partikel humus.



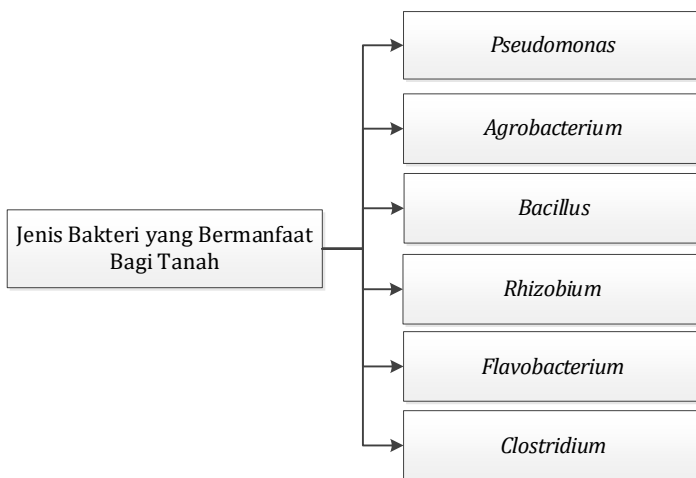
Gambar 5.3 Kegunaan Bakteri Bagi Tanah

Bakteri dapat memiliki kemampuan didalam menguraikan senyawa pestisida serta herbisida sehingga senyawa-senya tersebut dapat hilang dari tanah. Selain itu bakteri juga melakukan serangkaian metabolisme serta mineralisasi berbagai macam senyawa organik yang memiliki berat molekul yang rendah. Bakteri juga dapat melakukan metabolisme serta mendegradasi berbagai macam senyawa organik baik senyawa organik tersebut alami maupun buatan. Contohnya pada kasus bakteri yang mengoksidasi serta mereduksi ion sulfur, ion nitrogen, ion besi serta ion mangan.



Gambar 5.4 Ion yang dapat Dioksidasi dan Direduksi oleh Bakteri

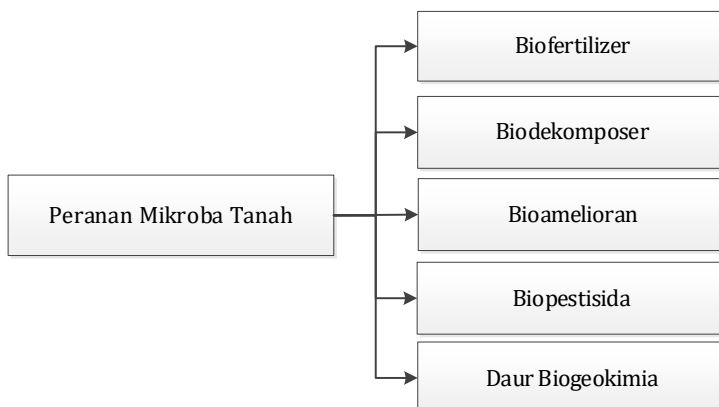
Bakteri yang berada didalam tanah dapat berupa mikroorganisme aerob (membutuhkan oksigen) maupun mikroorganisme anaerob (tidak membutuhkan oksigen). Namun kebanyakan jenis bakteri yang berada didalam tanah berupa mikroorganisme jenia anaerob. Terdapat beberapa jenis bakteri tanah yang bermanfaat atau penting bagi tanah diantaranya berupa *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Flavobacterium*, dan *Clostridium*.



Gambar 5.5 Jenis Bakteri yang Bermanfaat bagi Tanah

5.5 Peranan Mikroba Tanah

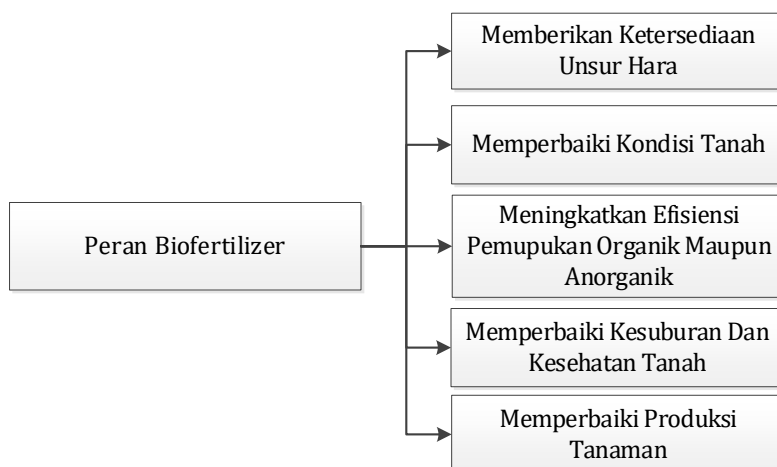
Mikroba tanah memiliki peranan yang penting bagi tanah dan kehidupan ditanah. Ada tujuh peranan mikroba tanah yaitu ¹⁾biofertilizer, ²⁾biodekomposer, ³⁾bioamelioran, ⁴⁾biopestisida dan sebagai ⁵⁾daur biogeokimia.



Gambar 5.6 Peran Mikroba Tanah

5.5.1 Biofertilizer

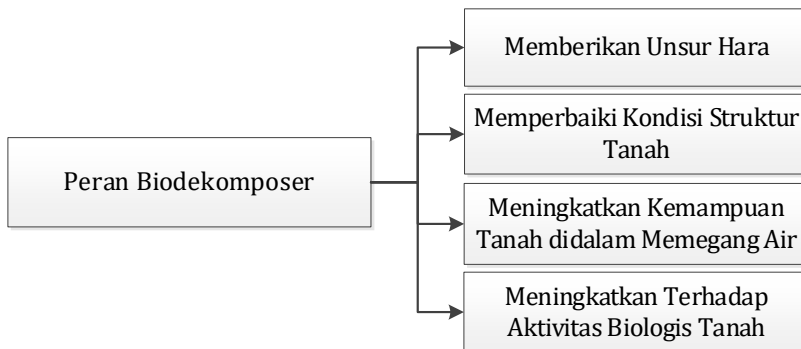
Biofertilizer atau sering juga disebut sebagai pupuk hayati merupakan pupuk alami yang berbasis penggunaan mikroba yang ¹⁾memberikan ketersediaan unsur hara didalam tanah, ²⁾memperbaiki kondisi tanah yang berupa kondisi fisik, kondisi biologis maupun kondisi kimia, ³⁾meningkatkan efisiensi didalam pemupukan organik maupun anorganik, ⁴⁾memperbaiki kesuburan dan kesehatan tanah, serta ⁵⁾memperbaiki produksi tanaman.



Gambar 5.7 Peran Biofertilizer pada Mikrobia Tanah

5.5.2 Biodekomposer

Biodekomposer merupakan kemampuan mikroba didalam mendegradasi senyawa organik yang berada didalam tanah. Senyawa organik ini memiliki peran didalam ¹⁾memberikan unsur hara, ²⁾memperbaiki kondisi struktur tanah, ³⁾meningkatkan kemampuan tanah didalam memegang air, dan ⁴⁾meningkatkan terhadap aktivitas biologis tanah. Senyawa organik ini dapat berupa fraksi senyawa organik ringan, serasah, biomasa mikroba, sisa-sisa panen, gulma, kotoran hewan, rumput yang mati, serta limbah rumah tangga.



Gambar 5.8. Peran Biodekomposer pada Mikrobia Tanah

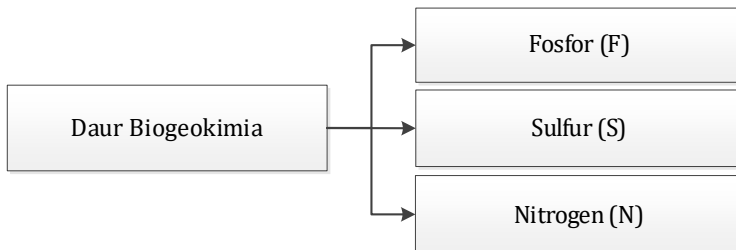
5.5.3 Bioamelioran

Bioamelioran atau sering disebut dengan pembenah tanah hayati merupakan pembenah tanah yang cara pembuatannya menggunakan mikroba baik berupa bakteri maupun jamur. Bioamelioran dapat berperan sebagai perbaikan dan peningkatan kesuburan tanah dengan memperbaiki kondisi fisik, biologi maupun kimia tanah. Mikroba yang berperan didalam proses biomelioran berupa mikroba yang menghasilkan zat pemacu pertumbuhan seperti *stenotrophomonas maltaphilia*, dan endofitik *Burkhodesia cenopacia*.

5.5.4 Daur Biogeokimia

Biokimia merupakan perubahan ataupun pertukaran yang terjadi secara terus-menerus yang terjadi antara komponen biotik (biosfer yang hidup) dengan komponen abiotik (tak hidup). Senyawa organik sebagai penyusun suatu materi didegradasi oleh mikroba untuk didaur ulang menjadi unsur-unsur yang lebih sederhana. Unsur-unsur tersebut masuk kedalam komponen biotik melalui tanah, udara maupun air. Daur ulang tersebut membutuhkan peran mikroba dan batuan.

Daur biokimia memiliki manfaat berupa ¹⁾mengembalikan unsur hara atau kimia yang telah digunakan oleh komponen yang terdapat didalam bumi baik itu komponen abiotik maupun komponen biotik. Dengan adanya daur biokimia ini akan menyebabkan kelangsungan hidup yang berada didalam bumi dapat terjaga. Daur biogeokimia terdiri atas tiga unsur yang berupa ¹⁾fosfor (F), ²⁾sulfur (S), serta ³⁾nitrogen (N).

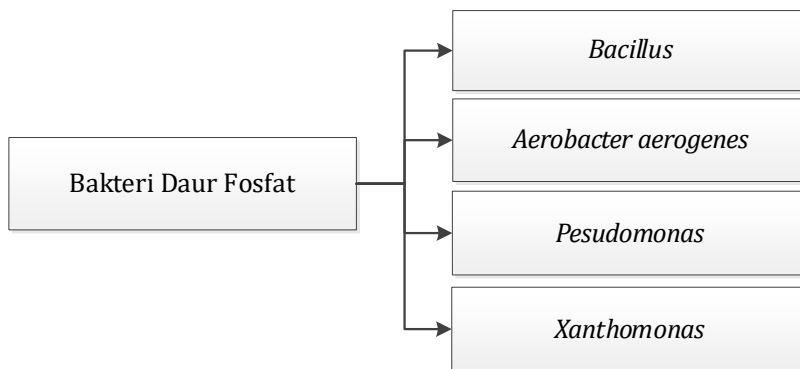


Gambar 5.9. Unsur dalam Daur Biogeokimia

5.5.4.1 Fosfor (F)

Daur fosfor merupakan salah satu daur biogeokimia yang terjadi pada unsur fosfor. Fosfor yang terkandung didalam suatu material digunakan kembali untuk menghasilkan fosfor. Daur fosfor merupakan daur yang paling sederhana dibandingkan dengan daur sulfur maupun daur nitrogen. Hal ini dikarenakan daur fosfor tidak melewati atmosfer. Dialam, fosfor dimiliki dalam dua bentuk yang berupa ¹⁾senyawa fosfor anorganik (yang terdapat pada air dan tanah), dan ²⁾senyawa fosfor organik (yang

terdapat pada hewan dan tumbuhan). Fosfor organik didegradasi atau didekomposisi oleh mikroba tanah menjadi produk fosfat anorganik. Fosfat anorganik ini sebagian akan terbawa oleh air laut maupun air tanah dan akan mengendap pada sedimen laut. Hal inilah yang menyebabkan fosfat banyak ditemui pada batu karang maupun fosil. Fosfat yang terdapat pada batu karang maupun fosil akan terkikis dan akan membentuk fosfat anorganik yang dapat larut didalam air tanah maupun air laut. Fosfat yang larut didalam air ini kemudian diserap oleh tanaman. Daur fosfat ini terus berulang-ulang. Bakteri yang berperan didalam daur fosfat ini berupa ¹⁾bakteri *Bacillus*, ²⁾bakteri *Pesudomonas*, ³⁾bakteri *Aerobacter aerogenes*, serta ⁴⁾bakteri *Xanthomonas*.

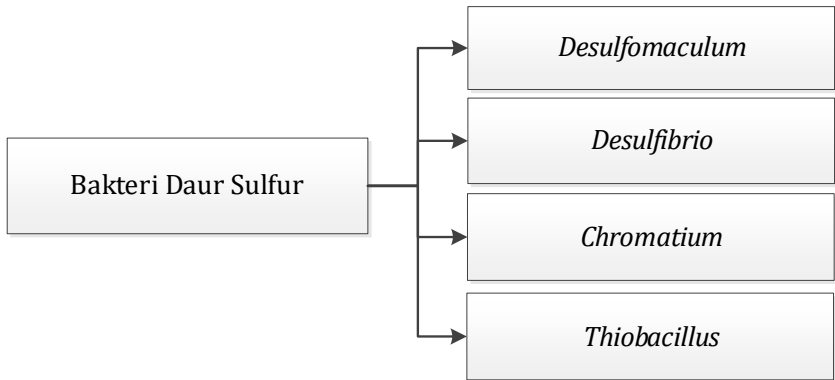


Gambar 5.10. Bakteri yang Berperan didalam Daur Fosfat

5.5.4.2 Sulfur (S)

Siulfur yang terdapat dialam berbentuk sulfur anorganik. Sulfur ini selanjutnya direduksi oleh bakteri sehingga menjadi sulfida atau dalam bentuk sulfur dioksida maupun hidrogen sulfida. Pada umumnya hidrogen sulfida ini didapatkan dari penguraian atau pendegradasian senyawa organik yang mengalami kematian. Tanaman menyerap sulful dalam bentuk SO_4^{2-} (sulfat). Semua organisme yang mati akan terjadi penguraian komponen organiknya yang dilakukan oleh bakteri. Mikroba yang berperan didalam daur sulfur berupa ¹⁾bakteri

Desulfomaculum, ²⁾bakteri *Desulfibrio*, ³⁾bakteri *Chromatium*, dan ⁴⁾bakteri *Thiobacillus*.



Gambar 5.11. Bakteri yang Berperan didalam Daur Sulfur

5.5.4.3 Nitrogen (N)

Nitrogen dialam terdapat dalam bentuk berupa senyawa organik seperti urea, asam nukleat, protein, maupun senyawa anorganik yang berupa ammonia, nitrat maupun nitrit. Daur nitrat dimulai dari mendapatkan nitrogen yang didapatkan dari atmosfer melalui hujan dan masuk kedalam tanah. Nitrogen yang bertambah didalam tanah ini melalui proses yang disebut fiksasi nitrogen. Fiksasi nitrogen dibantu oleh mikroba *Rhizobius* dengan bersimbiosis pada akar kacang polong. Selain itu, mikroba *Azotobacter*, *Clostridium* dan bakteri yang terdapat didalam air juga membantu proses fiksasi nitrogen. Produk hasil fiksasi nitrogen berupa nitrat kemudian dimanfaatkan oleh tanaman untuk diubah menjadi protein. Tanaman dan hewan yang telah mati didekomposisi oleh mikroba membentuk gas amoniak dan garam ammonium yang dapat larut dalam air. Proses yang terjadi ini disebut juga proses aninifikasi. Amoniak dan garam ammonium ini dimanfaatkan oleh bakteri *Nitrosomonas* untuk menjadi nitrat. Nitrat yang terbentuk selanjutnya digunakan oleh bakteri *Nitrobacter* membentuk nitrit. Nitrat dapat cepat terjadi transformasi menjadi gas nitrogen maupun oksida nitrogen

apabila tanah mengandung konsentrasi oksigen yang sedikit. Proses yang terjadi ini disebut dengan denitrifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bisen, P.S., Debnath, M. dan Prasad, G.B.K.S. (2012) *MICROBES Concepts and Applications*. Wiley-Blackwell.
- Lichtfouse, E. (2009) *Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms*, Springer. doi:10.1007/978-90-481-2716-0.
- Pepper, I.L., Gerba, C.P. dan Gentry, T.J. (2015) *Environmental Microbiology*, Academic Press is.
- Prasad, R. dan Aranda, E. (2018) *Approaches in Bioremediation*, Springer.
- Satyanarayana, T., Johri, B.N. dan Prakash, A. (2012) *Microorganisms in Environmental Management*, Springer. doi:10.1007/978-94-007-2229-3.
- Satyanarayana, T., Johri, B.N. dan Prakash, A. (2012) *Microorganisms in Sustainable Agriculture and Biotechnology*. Springer. doi:10.1007/978-94-007-2214-9.
- Saxena, S. (2015) *Applied microbiology*, NatuSpringerre. doi:10.1007/978-81-322-2259-0.
- Spencer, J.F.T. dan Spencer, A.L.R. de (2004) *Environmental Microbiology: methods and protocols*, Humana Press Inc.

BAB 6

METODE PENGAMBILAN SAMPEL DAN KULTUR MIKROBA DARI LINGKUNGAN

Oleh I Wayan Suanda

6.1 Pendahuluan

Dalam kegiatan praktikum dan penelitian (riset) atau kegiatan ilmiah lainnya memerlukan suatu metode untuk mendapatkan sampel dalam suatu populasi yang sangat besar dan dalam kondisi beragam. Terlebih dalam melakukan riset atau penelitian untuk mikrobiologi secara laboratoris memerlukan suatu prosedur, dengan kondisi aseptik atau steril, ketelitian, kesabaran dan ketekunan. Perilaku dan kondisi aseptik ini wajib diterapkan untuk mendapatkan hasil riset yang akurat dan representatif dengan tingkat kegagalan seminimal mungkin. Kemampuan dan pengalaman kerja di laboratorium juga tidak bisa dikesampingkan untuk mendapatkan hasil yang baik dan representatif.

Ketersediaan bahan dan material riset sebagai sampel di alam sangat besar dan keberadaan sangat luas, karena bisa didapat di beberapa lokasi dalam kawasan yang sangat luas termasuk tingkat kesulitan untuk mendapatkan sampel yang cukup tinggi. Kondisi yang terjadi di lapangan ini memerlukan suatu teknik atau cara untuk mendapatkan sampel sebagai bahan untuk riset atau penelitian. Sampel yang didapat memerlukan teknik penanganan berbeda sangat tergantung dari tujuan penelitian yang ingin dicapai dan jenis sampel yang dicari. Sampel itu bisa didapat dari beberapa lokasi, seperti: *soil borne* (tanah *rizosfer*), bagian tanaman (akar, batang, buah, bunga, daun dan

lainnya), air, pada hewan (bakteri yang terdapat dalam air liur komodo, anjing dan hewan lainnya), pada manusia (bakteri dalam mulut, jamur dalam telinga, kulit dan sebagainya). Sampel juga bisa diambil dari beberapa peralatan yang diduga memiliki tingkat keberadaan mikroorganisme cukup tinggi sebagai bahan untuk penelitian, misal: pegangan tangan tangga dalam suatu pasar, meja dalam suatu ruangan dan lain sebagainya).

6.2 Pengambilan Sampel

Mikroorganisme keberadaannya tersebar luas di alam dapat ditemukan dimana-mana, seperti: di tanah, air, udara, peralatan rumah tangga, tanaman dan hewan termasuk manusia (di kulit, selaput lendir dan bagian tubuh lainnya). Keberadaan mikroorganisme (mikroba) di alam umumnya masih dalam campuran atau konsorsium, untuk mendapatkan spesies tertentu perlu dilakukan permurnian (Suanda, 2018). Sampel yang didapat haruslah mencerminkan representatif, mewakili seluruh bagian yang diteliti. Sampel yang ingin digunakan untuk riset didapat dengan mengambil bagian dari keberadaan sampel itu yang layak mewakili dijadikan sampel dari lingkungan aslinya sebagai sumber. Sampel bisa berupa bagian dari organisme hidup atau benda mati yang mengandung mikroorganisme (mikroba) untuk ditumbuhkan ke media baru yang telah disiapkan agar tidak terjadi kontaminasi. a) Pengambilan untuk mendapatkan mikroba patogen dilakukan pada bagian tanaman sakit (terkontaminasi), seperti daun, buah, bunga, batang dan akar. Patogen tular tanah (*soil borne*) pengambilan sampel dilakukan pada tanah sekitar perakaran tanaman sakit. b) Sebaliknya untuk mendapatkan sampel yang berperan sebagai musuh alami atau antagonis, dilakukan dengan mengambil 100-200 g tanah rizosfer. Tanah rizosfer diambil pada kedalaman sekitar 20-30 cm atau berdekatan dengan akar tanaman di beberapa bagian atau titik lokasi untuk mewakili populasi.

Dalam perjalanan dari tempat pengambilan sampel sampai tempat tujuan, misalnya laboratorium, banyak terjadi gangguan dan mempengaruhi sampel, agar tidak rusak selama

perjalanan dari lokasi pengambilan sampel menuju ke tujuan kegiatan dapat ditangani melalui 2 cara, yaitu: 1) melakukan pengambilan sampel secukupnya, kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik steril yang diberi kertas label atau tulisan berupa keterangan (lokasi, waktu, jenis sampel, operator dan lainnya) untuk dibawa ketempat tindakan; 2) pengambilan sampel untuk selanjutnya disimpan dalam kotak pendingin berisi es (*coolling box*) agar kesegaran sampel termasuk organisme di dalam sampel tetap aman, nyaman dan kondisi terjaga secara baik saat ditumbuhkan pada media. Sampel harus segera mendapat penanganan secara baik sesuai tindakan laboratorium. Sampel tanah *rizosfer* dari akar bambu yang telah didapat ditumbuhkan pada media tumbuh sesuai jenis mikroba yang ingin dicari pada penelitian.

6.2.1. Sampel pada Tanah

Penanganan sampel yang berasal dari tanah untuk keperluan mendapatkan mikroba yang menguntungkan (*antagonis*) atau sebaliknya mikroba sebagai patogen (*merugikan*) perlu sesuai tahapan kerja di laboratorium. Sampel tanah didapat pada tanah *rizosfer* yaitu tanah yang berada disekitar perakaran tanaman yang beradius tidak melebihi kanopi cabang tanaman tersebut (kurang dari 20-30 cm disekitar batang bawah dekat perakaran). Sampel diambil pada tanah *rizosfer* bukan di permukaan tanah, namun diambil di bawah permukaan kedalaman sekitar 20-30 cm atau usahakan dekat dengan perakaran tanaman. Sampel diambil sebanyak 100-200 g usahakan sedikit terdapat campuran batu dan kerikil (usahakan tanah halus), dimasukkan kedalam kantong plastik steril. Pada kantong plastik *ziplock* cantumkan kondisi fisik tanah yang berisi catatan kondisi fisika tanah, misal: temperatur, pH dan kelembaban tanah dilokasi pengambilan sampel, cantumkan juga keterangan: jenis sampel, lokasi, waktu dan petugas lapangan, serta keterangan lainnya (Suanda, 2021). Mikroorganisme (mikroba) kebanyakan ditemukan keberadaannya didekat

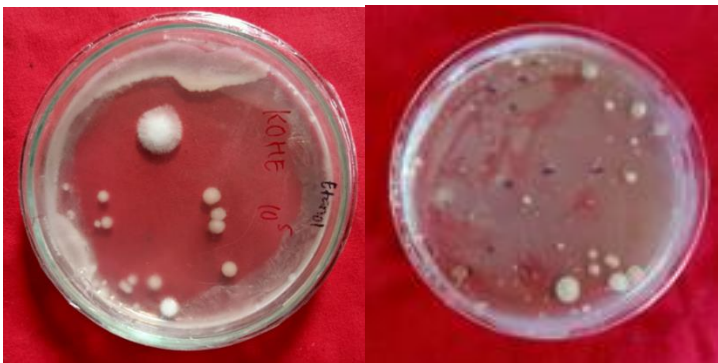
perakaran tanaman, terutama yang bersifat *soil borne*. Hal ini disebabkan kondisi sekitar perakaran memberikan keuntungan bagi mikroba hidup disana, karena ada simbiosis mutualisme diantara kedua organisme ini (Suanda *et al.*, 2022; Suanda, 2020). Eksplorasi yang dilakukan pada zona *rizosfer* melalui kegiatan isolasi PGPR (*Plant Growth Promoting Rizobacteria*) pada akar bambu telah banyak dilakukan penelitian (Gambar 6.1). Hasil isolasi PGPR pada akar bambu telah ditemukan mikroba dari genus *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas*, sp. (Pratiwi *et al.*, 2017; Widnyana *et al.*, 2022).



Gambar 6.1. Pengambilan Sampel rizosfer tanaman Bambu dan *Cooling Box* bertingkat atau serial dilution
(Sumber: I Wayan Suanda)

Sampel tanah diaduk secara merata ditimbang 10 g kemudian dituang kedalam elemeyer volume 200 mL yang telah berisi 90 mL air steril (aquades), sehingga volume menjadi 100

mL dikocok atau divortek selama 10 menit kemudian dilakukan pengenceran dengan beberapa tingkat pengenceran (Suanda, 2018). Pengenceran sampel dapat dilakukan secara bertingkat atau *serial dilution* dengan mengambil pelarut awal (10^{-1}) sebanyak 1 mL dicampur aquades 9 mL sehingga volumenya 10 mL (pengenceran 10^{-2}), Hasil pengenceran ini selanjutnya diambil 1 mL ditambahkan pelarut aquades 9 mL dalam tabung reaksi sehingga volume menjadi 10 mL (pengenceran 10^{-3}) dan seterusnya. Sampel pada tingkat pengenceran tertentu (biasanya tingkat pengenceran 10^{-3}) setelah dikocok atau divortek diambil 1 mL menggunakan mikropipet yang volumenya sudah disesuaikan dengan volume yang diinginkan, kemudian disebar secara merata pada media PDA dalam cawan petri. Cawan petri digoyang-goyang di atas meja agar larutan sampel tersebar merata, inkubasi pada suhu ruangan selama 5-7 hari (Gambar 6.2). Mikroba pada sampel dapat ditumbuhkan pada media dalam bentuk padat maupun dalam bentuk cair, misal: dalam bentuk padat berupa PDA (*Potato Dextrosa Agarose*) dan dalam bentuk cair yaitu PDB (*Potato Dextrosa Broth*).



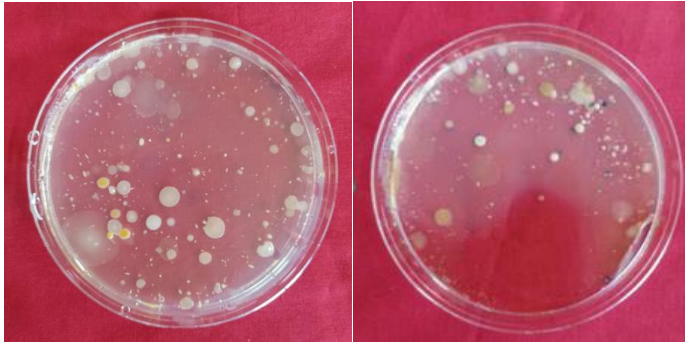
Gambar 6.2. Pengenceran Sampel Tanah Kohe Sapi dekat Akar Tanaman
(Sumber: Suanda, 2020)

6.2.2 Sampel Air

Sampel yang bersumber dari air bisa didapat dari kolam ikan yang terkontaminasi mikroba patogen sehingga menyebabkan kematian ikan. Beberapa penelitian sampel air mineral isi ulang yang dijual masyarakat juga telah tercemar mikroba jenis *Escherechia coli* yang menyebabkan kualitas air kurang layak diminum bisa dijadikan bahan riset. Dalam kegiatan usaha di lapangan terutama makanan siap saji tradisional, seperti: pedagang makanan, minuman dan jajan kurang memperhatikan air yang digunakan untuk mencuci alat-alat atau perabot sebagai sarana untuk berjualan. Hasil pengamatan penulis dilapangan bahwa air yang dipakai mencuci dilakukan secara berulang-ulang (3-5 kali) hingga air berwarna keruh. Air cucian ini dapat dijadikan sampel dengan melakukan inokulasi pada media tumbuh mikroba. Penumbuhan mikroba pada sampel dapat dilakukan pada media dalam bentuk padat maupun dalam bentuk cair, misal: PDA (*Potato Dextrosa Agarose*) padat dan PDB (*Potato Dextrosa Broth*). Pengenceran sampel bisa diawali dengan melakukan tingkat pengenceran dari tingkat pengenceran terendah atau tingkat pengenceran tertentu untuk memudahkan menghitung populasi mikroba (Suanda, 2018). Untuk memudahkan perhitungan populasi mikroba yang tumbuh dari sampel sedimen tanah atau air tambak menggunakan media tumbuh berupa *Tryptic Soy Agar* (TSA) dan *Tiosulfate Citrate Bile Salt Sucrose Agar* (TCBSA) (Nurjanah, 2009; Nurjanah, 2004).

Sumber air yang digunakan dalam berdagang makanan dan minuman hendaknya bersumber dari air bersih air tanah dalam sumur bor pada kedalaman tertentu atau air berasal dari PDAM. Air bersih yang digunakan dalam pencucian peralatan untuk jualan makanan dan minuman harus bersih dan tingkat terkontaminasi tidak lebih dari 10/100 mL (Permenkes, 2003). Untuk mendapatkan mikroba dalam sampel air bisa digunakan air mineral isi ulang, air kolam, air tambak, air sungai tercemar, air sumur dan sebagainya. Sampel air yang telah diambil dibuat pengenceran pada tingkat tertentu atau misalnya tingkat pengenceran 10^{-3} , kemudian diambil 1 mL menggunakan

mikropipet disebar pada media PDA dalam cawan petri yang telah disiapkan (Gambar 6.3). Mikroba yang tumbuh pada media dalam cawan petri dilakukan inokulasi untuk mendapatkan sampel yang murni dari satu spesies. Koloni mikroba yang memiliki morfologi yang berbeda ditumbuhkan kembali pada media tumbuh yang baru, baik dari jenis bakteri maupun dari jamur.



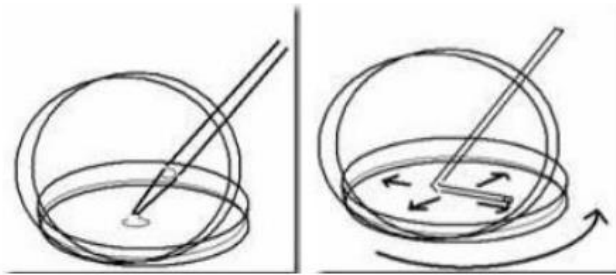
Gambar 6.3. Koloni Mikroba Tumbuh pada Media
(Sumber: Suanda, 2018)

6.3. Metode Kultur Murni

Pemurnian untuk mendapatkan kultur mikroba dilakukan dengan cara pemisahan konsorsium atau campuran mikroba yang didapat dari sampel yang ditumbuhkan pada media tumbuh. Pemisahan mikroba dilakukan untuk mendapatkan satu jenis mikroba dari campuran mikroba yang tumbuh sehingga mendapatkan kultur mikroba murni (Lestari dan Hartati, 2017). Untuk mendapatkan hasil isolasi sampel yang baik sesuai tingkat pemurnian dapat dilakukan penanganan yang baik sesuai prosedur kerja di laboratorium berdasarkan tahapan-tahapan atau metode. Beberapa metode untuk melakukan isolasi sampel dalam penelitian, diantaranya: 1) Metode Seri Pengenceran; 2) Metode Swab dan 3) Metode Cuplikan Endofit. Dari beberapa metode ini sampel yang telah didapat selanjutnya diinokulasi agar mendapatkan biakan murni yang akan dijadikan sampel untuk tahapan penelitian selanjutnya.

Untuk mendapatkan mikroba dalam penanaman pada media dapat dilakukan melalui beberapa teknik, diantaranya:

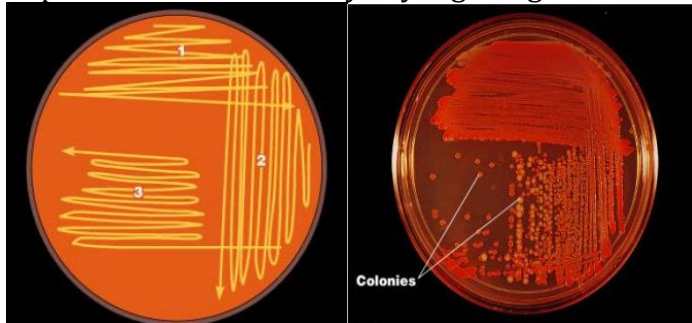
- 1) *Spread plate* (teknik sebar atau tebar): merupakan teknik isolasi mikroba dengan melakukan penuangan kultur mikroba secara pulasan untuk meratakan kultur menyebar di permukaan media PDA dalam cawan petri (Gambar 6.4). Sampel ditumbuhkan dalam media cair (PDB) kemudian dituangkan 1 mikron secara merata di atas media tumbuh, misal PDA dalam cawan petri. Metode ini bisa dilaksanakan dengan menuangkan media NA (*Natrium Agar*) ke dalam cawan petri separuh dari volumenya kemudian ditunggu hingga media telah mengalami pematatan. Teknik ini tujuannya melepas mikroba yang ada pada sampel kedalam suatu pelarut atau cairan;



Gambar 6.4. Teknik Sebar
(Sumber: Suanda, 2018)

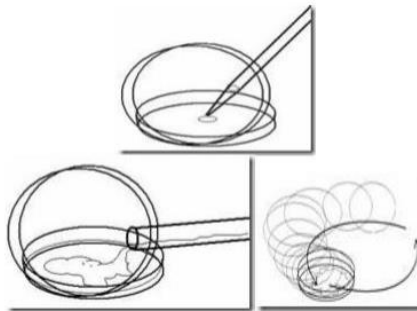
- 2) *Streak plate method* (cara gores): inokulasi sampel mikroba dilakukan dengan cara menggoreskan atau menarik garis secara transparan di atas media PDA. Penanaman mikroba melalui teknik gores ini tujuannya untuk mengisolasi mikroba dari hasil penumbuhan pada media sebelumnya (Gambar 6.5). Sejumlah populasi mikroba pada media penumbuhan diambil satu persatu dengan metode gores diisolasi pada media baru dalam cawan petri sehingga mendapatkan sejumlah mikroba yang memiliki morfologi, tekstur dan ciri berbeda dengan yang lainnya. Goresan suspensi pada permukaan medium Agar akan tumbuh koloni-koloni terpisah yang berasal dari 1 sel mikroba

setelah diinkubasi 3-5 hari. Hasil isolasi ini bisa dikultur kembali untuk diremajakan (reisolasi) seperti teknik ini untuk mendapatkan mikroba sebanyak yang diinginkan.



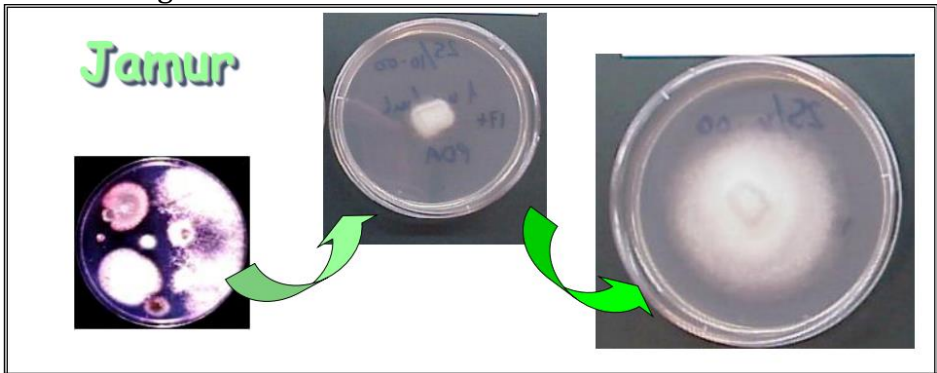
Gambar 6.5. Teknik Gores
(Sumber: Suanda, 2018)

- 3) *Pour Plate Method* (Teknik Tabur): sampel ditanam secara satu persatu pada jarak tertentu pada media tumbuh, seperti media PDA. Teknik ini memiliki tujuan agar sel-sel mikroba (bakteri atau jamur) tumbuh tidak saja pada permukaan media Agar, melainkan juga ada sel mikroba yang tumbuh di dalam media Agar atau ada sel mikroba tumbuh terendam dalam media tumbuh (Gambar 6.6). Berarti dalam teknik Pour plate media agar yang ada dalam cawan petri belum padat, kira-kira suhu 45°C , suspensi sampel dituangkan secara perlahan-lahan sambil menggoyang-goyang cawan petri untuk menghomogenkan media sampai memadat.



Gambar 6.6. Teknik Tabur. (Sumber: Suanda, 2018)

Dari beberapa teknik atau metode penanaman sampel yang telah dilakukan itu, maka mikroba yang tumbuh dalam bentuk konsorsium itu selanjutnya dilakukan isolasi sampel sehingga didapat mikroba dalam bentuk murni (Gambar 6.7). Mikroba dalam bentuk murni ini kembali bisa diperbanyak dengan menumbuhkan pada media tumbuh baru baik pada PDA sebagai media miring maupun PDB untuk mendapatkan kultur murni sebagai kultur stok.



Gambar 6.7. Tahapan Isolasi Mikroba untuk mendapatkan Mikroba Murni

6.4 Swab (*Cutting Bud*)

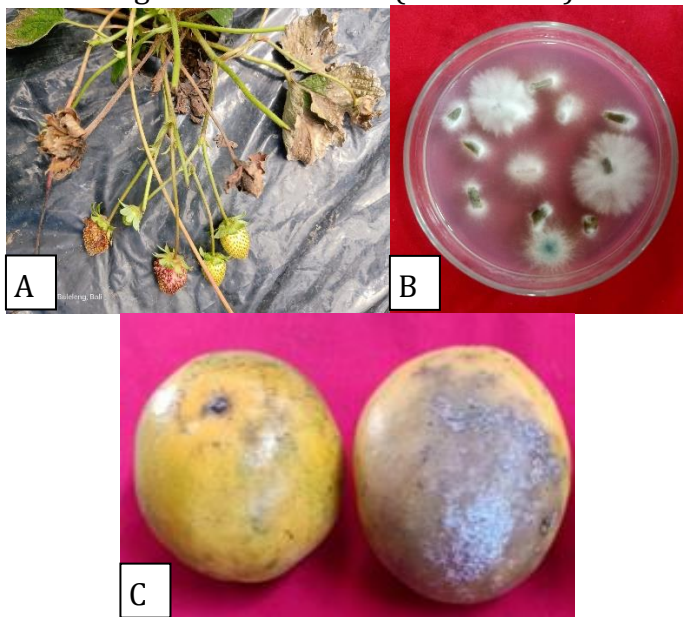
Kebersihan dan sterilitas peralatan rumah tangga, peralatan untuk jualan dan fasilitas umum harus tetap dijaga, terlebih peralatan yang digunakan saat jualan makanan dan minuman (konsumsi langsung tanpa dimasak lagi). Mengingat penularan patogen tidak hanya melalui makanan saja tetapi penularan terjadi juga melalui peralatan atau alat yang digunakan dalam kegiatan jualan yang seharusnya terjaga kebersihannya, seperti: mangkok, piring, gelas, sendok, lap tangan, nampan minuman dan sebagainya (Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 1096/Menkes/Per/VI/2011), peralatan makanan dan minuman harus terbebas dari mikroba penyebab penyakit (Marisdayana *et al.*, 2017). Metode Swab dilakukan sebagai tindakan untuk memindahkan mikroba yang terdapat dalam sampel yang memiliki permukaan luas, seperti meja, kursi, pegangan tangga,

pegangan pintu dan sebagainya. Dalam metode Swab ini dimana *Cotton Swab* atau *Cotton Bud* dicelupkan terlebih dahulu ke dalam larutan atraktan, yaitu pepton water, sehingga seluruh bagian kapas terlapisi. *Cotton bud* ini diusapkan dengan memutar-mutar di atas permukaan sampel sampai permukaan kapas kelihatan penuh ditempeli mikroba yang terdapat pada sampel. Selanjutnya sampel yang menempel pada *Cotton bud* ditumbuhkan pada media tumbuh mikroba. Mikroba pada sampel bisa ditumbuhkan langsung dengan menghapuskan *cotton bud* diatas permukaan media tumbuh PDA dalam cawan petri. Bisa juga *cooton bud* yang berisi sampel dicelupkan ke dalam media tumbuh berbentuk cair (PDB). Cawan petri yang telah digunakan dalam penumbuhan sampel, dibungkus plastik *Wrap* dan diinkubasi pada tempat aman, suhu ruang selama 5-7 hari.

6.5 Metode Cuplikan Endofit

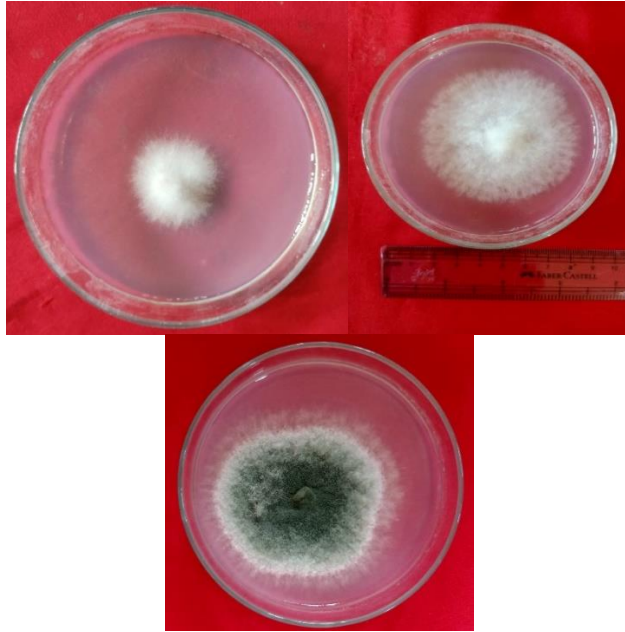
Tanaman sakit pada bagian yang akan dijadikan sampel untuk mendapatkan isolat patogen bisa diambil bagian akar, batang, daun, buah (Gambar 6.8a), bagian tanaman stroberi dicuci menggunakan air bersih yang mengalir, dipotong ukuran 0,5-1 cm direndam dalam alkohol 70% selama 1-2 menit. Potongan tanaman stroberi ini dikeringkan menggunakan tisu bersih, selanjutnya ditanam pada media PDA yang sudah disediakan sebelumnya (Gambar 6.8b). Pengambilan sampel bisa dilakukan juga pada bagian tanaman lainnya, misal: pada bagian kulit jeruk yang terkontaminasi jamur patogen, kemudian dicuci menggunakan air bersih mengalir (aquades) (Gambar 8c). Bagian kulit jeruk tersebut dipotong-potong ukuran 0,5-1,0 cm sebanyak 5-6 potongan, kemudian direndam dalam alkohol 70% (selama 1-2 menit) dan dikeringkan menggunakan kertas tisu bersih. Sampel selanjutnya ditanam pada media PDA untuk pertumbuhan jamur yang telah disiapkan sebelumnya. Peletakan sampel pada media PDA dalam cawan petri diatur agar ada jarak untuk pertumbuhan mikroba (biasanya 5-6 bagian sampel). Setelah semua persiapan itu dilakukan kemudian pada bagian pinggir cawan petri dibungkus plastik *Wrap* kemudian

dimasukkan lagi ke dalam kantong plastik 2 kg, di inkubasi dalam suhu ruangan selama 5-7 hari (Gambar 6.8).



Gambar 6.8. Pengambilan Sampel dari Bagian Tanaman untuk isolasi. (Sumber: Suanda, 2018)

Mikroba yang tumbuh pada media PDA dalam cawan petri, kemudian diambil satu persatu menggunakan jarum ose (jarum ose berujung bulat untuk bakteri dan jarum ose berujung lancip untuk jamur) kemudian ditumbuhkan pada media baru yang telah disiapkan (Gambar 6.9). Inokulum yang telah dipindahkan ini akan tumbuh menjadi isolat murni yang bisa dijadikan kultur stok. Kultur stok ini disimpan dalam lemari pendingin dalam keadaan baik dan aman. Kultur stok ini bisa diperbanyak untuk mendapatkan subkultur sesuai kebutuhan dan setiap saat perlu diremajakan (reisolasi).



Gambar 6.9. Jamur Hasil Pemurnian
(Sumber: Suanda, 2019)

6.6 Metode Seri Pengenceran (*Platting Methode*)

Pengenceran secara berseri atau pengenceran bertingkat dilaksanakan bertujuan untuk mengurangi jumlah koloni mikroba yang tersuspensi dalam larutan, sehingga perlu ditentukan tingkat pengenceran. Seri pengenceran yang dipilih sangat tergantung atas perkiraan atau pengalaman dan sumber referensi yang dijadikan rujukan jumlah mikroba dalam sampel. Dari pertimbangan itu maka seri pengenceran dilakukan secara bertingkat mulai pertama dari perbandingan sampel : cairan ($10 : 90$) (b/v) divortek untuk menghomogenkan, jika memakai teknik pencucian dan pengolesan maka termasuk pengenceran 10^{-1} . Pengenceran berikutnya dilakukan dengan mengambil seri pengenceran pertama sebanyak 1 mL menggunakan mikropipet dimasukkan kedalam tabung reaksi yang telah berisi 9 mL aquades sehingga volume 10 mL (v/v) dihomogenkan dengan cara menggoyang-goyangkan tabung reaksi atau divortek,

menjadi tingkat pengenceran 10^{-2} . Pengenceran tingkat 10^{-3} didapat dari pengambilan dilution pengenceran 10^{-2} sebanyak 1 mL dimasukkan kedalam tabung reaksi yang telah berisi 9 mL aquades (v/v) sehingga volume menjadi 10 mL, inkubasi pada temperatur ruang ($26-28^{\circ}\text{C}$) selama 5-7 hari. Seri pengenceran secara bertingakt dapat dilakukan sesuai tingkat pengenceran yang diharapkan seperti cara sebelumnya (Gambar 6.10). Jumlah koloni mikroba pada media pertumbuhan yang telah dilakukan bisa diketahui dengan metode *Plate Count* atau *Colony Count*, dimana jumlah koloni disetarakan dengan jumlah satu sel mikroba. Menghitung jumlah koloni sel hidup mikroba dapat dilakukan dengan filter membran dan *Most Probable Number* (NPM) menggunakan medium cair melalui seri pengenceran. Koloni mikroba yang tumbuh pada media di cawan petri dihitung secara manual dibantu dengan alat *Colony Count*, menggunakan rumus (Nurjanah *et al.*, 2012). Pertumbuhan koloni sel mikroba dapat diketahui dengan mengukur massa sel sekaligus dengan mengukur turbiditas cairan medium tumbuh melalui pemisahan memakai alat sentrifius (pemusing) untuk mengetahui volume massa sel atau berat kering, diawali dengan pemanasan pada temperatur $90-110^{\circ}\text{C}$, selama ± 12 jam.

Rumus:

$$N \text{ total (CFU/mL)} = \frac{T \times (1/S) \times 1}{Q \times V}$$

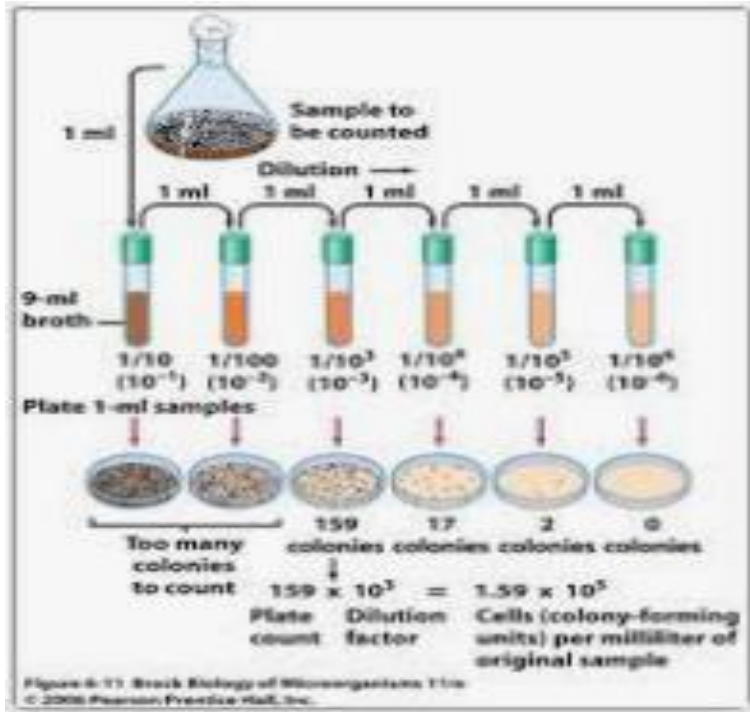
Dimana:

T = total bakteri tumbuh pada media

Q = jumlah cawan Pertri digunakan

S = tingkat pengenceran digunakan

V = volume yang diinokulasi ke dalam media Agar



Gambar 6.10. Seri Pengenceran secara Bertingkat
(Sumber:<https://www.google.com/search?q=seri+pengenceran+bertingkat>)

DAFTAR PUSTAKA

- Lestari, P.B dan Hartati, T.W. 2017. Mikrobiologi Berbasis Inkuiry. Penerbit Gunung Samudera (Grup Penerbit PT Book Mart Indonesia).
- Marisdayana, R. 2017. Jurnal Teknik Pencucian Alat Makanan, Personal Hygiene terhadap Kontaminasi Bakteri pada Alat Makanan. Jurusan Kesehatan Masyarakat. Jambi; 2(3).
- Nurjanna; Ahmaddirrahman Fajrihanif dan Haryani 2012. Teknik Penanganan Sampel untuk Analisis Bakteri. Balai Penelitian dan Pengembangan Budidaya Air Payau, Maros. Bul. Tek. Lit. Akuakultur 10(2): 115-117.
- Nurjanna. 2009. Teknik Isolasi Bakteri terhadap Daun Mangrove sebagai Kandidat Probiotik pada Budidaya Udang Windu. Buletin Teknik Litkayasa Akuakultur, 8(2): 169-172.
- Nurjanna. 2004. Pembuatan media dan pereaksi untuk isolasi dan identifikasi bakteri *Vibrio* sp. Buletin Teknik Litkayasa Akuakultur, III(1): 27-31.
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia no. 1096/Menkes/PER/2011 tentang Hygiene Sanitasi Jasaboga. Menteri Kesehatan. Jakarta.
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 715/menkes/SK/2003. Tentang Persyaratan Hygiene Sanitasi Jasaboga. Menteri Kesehatan. Jakarta.
- Suanda, I.W; Kartika, I.M dan Sukendra, I.K. 2022. Modul Pupuk Organik Hayati untuk Pertanian Berkelanjutan. Prodi pendidikan Biologi FKIP Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Denpasar. 9 hal.
<https://drive.google.com/file/d/1gvN4O4LvZheZfDBpYcg1ukSLgkcsLSso/view?usp=sharing>

- Suanda, I.W. 2020. Pengaruh Pupuk *Trichoderma* sp. dengan Media Tumbuh Berbeda terhadap Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Cabai Merah Besar (*Capsicum frutescens* L.). FMIPA UNHI Denpasar. Jurnal Widya Biologi; 11(01): 41-51 DOI:<https://doi.org/10.32795/widyabiologi.v11i01.569> <https://ejournal.unhi.ac.id/index.php/widyabiologi/article/view/569/443>
- Suanda, I.W. 2019. Karakterisasi Morfologis *Trichoderma* sp. Isolat JB dan Daya Hambatnya terhadap Jamur *Fusarium* sp. Penyebab Penyakit Layu dan Jamur Akar Putih pada Beberapa Tanaman. FMIPA UNHI. 10(02): 99-112. <https://ejournal.unhi.ac.id/index.php/widyabiologi>
- Suanda, I.W. 2018. Modul Praktikum Mikrobiologi. Prodi Pendidikan Biologi FMIPA IKIP PGRI Bali. Denpasar. 42 hal. <https://repo.mahadewa.ac.id/id/eprint/2044/1/Modul%20Prak%20Mikrobiologi%20%28HKI%2019%20Desember%202018%29.pdf>
- Pratiwi, F; Marlina dan Mariana. 2017. Pengaruh Pemberian *Plant Growth Promoting Rhizobakteria* (PGPR) dari Akar Bambu terhadap Pertumbuhan dan Hasil Bawang Merah (*Allium ascalonicum* L.). Aceh: Universitas Almuslim. Jurnal Agrotropika Hayati. 4(2).
- Widnyana, I.K; Suanda, I.W dan Ariati, P.E.P. 2022. Modul: Eksplorasi dan Isolasi PGPR (*Plant Growth Promoting Rizobacteria*) dari Kelompok *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas* Spp. dari Akar Bambu dengan Media Selektif. Fakultas Pertanian Universitas Mahasaraswati. Denpasar. 15 hal.
- <https://drive.google.com/file/d/1puynQIVzsaMEPfNLNuDNEMirn3yMD0OH/view?usp=sharing>

BAB 7

MIKROBA DAN POLUTAN ORGANIK

Oleh Ni'matul Murtafi'ah

7.1 Pendahuluan

Aktivitas manusia semakin meningkat memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan sekitar. Di Indonesia banyak kita jumpai industri yang menghasilkan limbah buangan yang dibuang di aliran sungai. Limbah buangan dapat mencemari lingkungan dan menyebabkan polusi. Polusi memberikan ancaman bagi masyarakat terutama kesehatan masyarakat. Polusi menjadi salah satu dampak serius sehingga memperburuk lingkungan alam kita. Unsur polusi disebut polutan.

Polutan diartikan sebagai bahan atau senyawa yang menyebabkan pencemaran. Suatu zat dikatakan polutan apabila menyebabkan kerugian terhadap makhluk hidup. Polutan industri antara lain polutan organik (limbah cair) dan anorganik (logam berat), sisa bahan bakar, tumpahan minyak dan oli. Polutan tersebut menjadi sumber utama pencemaran air. Kualitas air dilihat dari beberapa pengujian seperti uji kimia, biologi, fisik, dan kenampakan (warna dan bau) (Efbertias Sitorus, Eko Sutrisno, Rakhmad Armus, Kasta Guming, Fitria Fatma, Luthfi Parindari, Muhammad Chaerul, Ismail Marzuki, 2021). Polutan organik meningkat terkandung dalam buangan air limbah menyebabkan dampak serius terhadap lingkungan dan organisme perairan. Tingginya polutan organik diperairan berdampak meningkatnya pemanfaatan oksigen terlarut yang berlebih oleh mikroba khususnya bakteri. Pemanfaatan oksigen tinggi mengakibatkan terjadinya penurunan kandungan oksigen terlarut sehingga mengancam ekosistem perairan. Mikroba memiliki peranan penting di lingkungan.

Mikroba merupakan komponen penting pada ekosistem. Mikroba berperan pada siklus biogeokimia, membantu tumbuhan menyerap unsur hara dalam tanah, sebagai pengurai, membantu proses bioremediasi polutan. Oleh karena itu, mikroba menjadi penyebab terjadinya mineralisasi didalam tanah dan perairan dimana proses pembebasan unsur dari senyawa molekul organik kompleks sehingga tersedia bagi kehidupan organisme. Tanpa mikroba proses penguraian di lingkungan tidak akan berlangsung. Keberadaan sampah, kotoran, hewan dan tumbuhan mati akan menutupi permukaan bumi akibatnya rantai makanan akan terputus.

7.2 Polutan

Lingkungan yang sudah tercemar suatu komponen dengan konsentrasi diatas batas normal mengakibatkan terjadinya perubahan lingkungan. Polutan menyebabkan terjadinya pencemaran langsung dan tidak langsung. Lingkungan tercemar mengalami penurunan kualitas disebabkan oleh komponen atau senyawa disebut polutan. Berikut ini macam-macam polutan:

1. Berdasarkan wujudnya
 - a. Cair
Polutan cair berupa zat cair seperti tumpahan minyak bumi, zat kimia cair.
 - b. Padat
Polutan padat berupa zat padat menyebabkan pencemaran seperti debu, asap, sampah plastik, botol kaca. Selainitu, makhluk hidup juga termasuk kedalamnya seperti bakteri, jamur, dan virus.
 - c. Gas
Polutan gas berupa zat gas seperti karbon monoksida, belerang dioksida, dan oksida nitrogen.
2. Berdasarkan kandungan
 - a. Organik

Pada air tercemar terjadinya perubahan pH diakibatkan oleh penguraian polutan organik pada limbah sehingga mempengaruhi nilai COD dan BOD. Perubahan warna pada air disebabkan oleh adanya bahan organik terlarut dan tersuspensi termasuk bersifat koloid. Bau dan rasa pada air ditimbulkan oleh aktivitas penguraian bahan-bahan organik terlarut secara mikrobiologis (Rachman *et al.*, 2016).

b. Anorganik

Mikroorganisme sulit mendegradasi polutan organik, serta polutan tersebut tidak dapat membusuk. Polutan organik berasal dari industri melibatkan unsur logam seperti Timbal (Pb), Arsen (Ar), Kadmium (Cd), Air raksa (Hg), Krom (Cr), Nikel (Ni), Kalsium (Ca), dan Magnesium (Mg). Kandungan ion Kalsium dan Magnesium menyebabkan kesadahan air sehingga menghambat proses degradasi. Kesadahan air meningkat mengakibatkan kerusakan alat berbahan dasar besi.

3. Berdasarkan Senyawa

a. Fisik

Polutan secara fisik mencemari lingkungan seperti keramik, plastik, besi yang berkarat, dan pecahan botol kaca. Sebuah besi yang berkarat mengalami oksidasi menimbulkan racun saat manusia mengkonsumsi air tercemar.

b. Kimia

Polutan berupa senyawa kimia sintetis maupun alami. Senyawa kimia berpotensi sebagai bahan pencemar karena konsentrasi tinggi, seperti timbal (Pb), Kromium Heksavalen.

c. Biologi

Polutan berupa mikroba yang menimbulkan penyakit apabila manusia mengkonsumsi air yang tercemar, seperti jentik air yang membusuk.

4. Berdasarkan sifatnya

a. *Biodegradable*

Polutan *biodegradable* merupakan polutan yang mampu diuraikan melalui proses alamiah. Proses alamiah berupa air, oksigen, sinar matahari, dan mikroorganisme. biodegradasi bahan organik di lokasi Tempat Pembuangan Akhir terjadi paling cepat ketika air bersentuhan dengan sampah yang terkubur. Polutan ini mudah membusuk kemudian diolah lanjut menjadi kompos. Polutan menjadi berbahaya apabila dibuang di lingkungan. Polutan berbahaya meningkatkan aktivitas bakteri patogen. Bakteri patogen dapat menginfeksi manusia.

b. non biodegradable

Polutan non biodegradable merupakan polutan yang tidak dapat diuraikan secara hayati menghasilkan gas rumah kaca, metana dan karbon dioksida (Jain *et al.*, 2017). Polutan yang tidak terurai menyebabkan masalah karena beracun dan presisten di lingkungan. Penanganan polutan yang tidak dapat terurai.

7.3 Mikroba

Beberapa jenis polutan menimbulkan pencemaran lingkungan, bahkan bahan kimia dapat menjadi material berbahaya jika meninggalkan residu susah terurai oleh mikroba. Polutan terdapat pada limbah cair menyebabkan ancaman serius terhadap kelestarian lingkungan karena jika terdapat polutan beracun di perairan akan menyebabkan kematian organisme atau biota perairan. Selain itu, menyebabkan ketidak seimbangan ekosistem dan berdampak pada sifat fisik, kimia, dan biologi perairan. Proses pengolahan limbah mengandung polutan

organik teknologi alternatif dalam penanganannya menggunakan pemanfaatan mikroorganisme(Said dan Santoso, 2015).

Mikroba berperan penting dalam proses bioremediasi. Bioremediasi oleh mikroba melalui proses penguraian mengakibatkan perpindahan struktur senyawa sehingga terjadi perubahan integritas molekul. Mikroba memproduksi enzim-enzim untuk memodifikasi polutan beracun dengan mengubah struktur kimia polutan. Enzim yang diproduksi membantu proses kerja dengan cara penurunan energi aktivasi, energi ini dibutuhkan untuk memulai suatu reaksi. Pada proses ini, terjadi biotransformasi maupun biodegradasi senyawa toksik menjadi senyawa tidak toksik(Lumbanraja, 2018).

Senyawa kimia di lingkungan dapat dihilangkan melalui proses degradasi mikroba, mikroba membutuhkan senyawa kimia untuk pertumbuhan dan reproduksi melalui proses oksidasi. Enzim yang dihasilkan mikroba membantu dalam mengkatalis reaksi degradasi untuk mencapai keseimbangan. Sebagai contoh: bakteri mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi disebut bakteri hidrokarbonoklastik. Bakteri menggunakan senyawa hidrokarbon sebagai sumber C dan energi untuk meningkatkan aktivitas. Selain Bakteri terdapat mikroba lain yang berperan dalam bioremediasi polutan yaitu jamur dan protozoa (Lestari, Martina, Roza, 2018).

7.3.1. Jenis Polutan sebagai Substrat Pertumbuhan Bakteri Agen Bioremediasi

Pemanfaatan bakteri sebagai agen bioremediasi untuk mengatasi polutan organik yang terakumulasi di lingkungan menjadi metode ramah lingkungan dan ekonomis dari pada proses kimia dan fisika. Berbagai substrat organik dimanfaatkan bakteri sebagai agen bioremediasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 7.1. Jenis Polutan dan Agen Bioremediasi

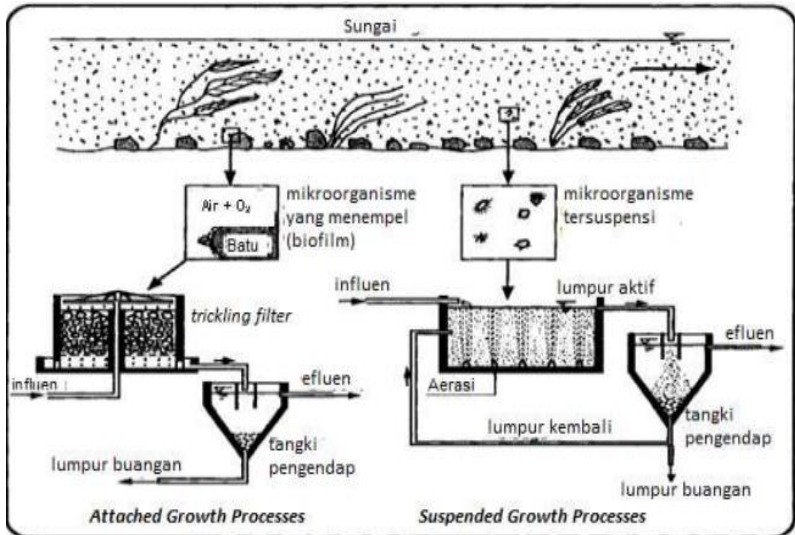
No	Senyawa organik	Bakteri
1.	Ammonium nitrogen	<i>Bacillus sp., Agrobacterium vitis, Staphylococcus saprophyticus, Bacillus thuringiensis, Bacillus megaterium, dan Micrococcus luteus</i>
2.	Selulosa, protein, amilum, dan lipid	<i>Cellulomonas sp. Rhodothermus sp. Bacillus sp., Pseudomonas sp., Acinetobacter sp</i>

Sumber (Khastini, Zahranie, Rozma, 2022)

7.3.2. Aplikasi Mikroba Dalam Degradasi Polutan

Degradasi polutan memanfaatkan mikroba dalam hal pengolahan air tercemar pada prinsipnya menggunakan proses alami *self purification*. Peranan mikroba pada proses ini pada prinsipnya ada dua yaitu:

- 1. Pertumbuhan Mikroba Menempel Pada Substrat
Keberadaan mikroba menempel pada substrat atau permukaan misalnya pada batu. Genus bakteri yang sering ditemukan dari gram negatif berbentuk basil heterotrofikantara lain *Pseudomonas, Chromobacter, Zooglea, Achromobacter, Alcaligenes* dan *Flavobacterium*. Proses Selft Purification dapat di lihat pada Gambar 2.1.



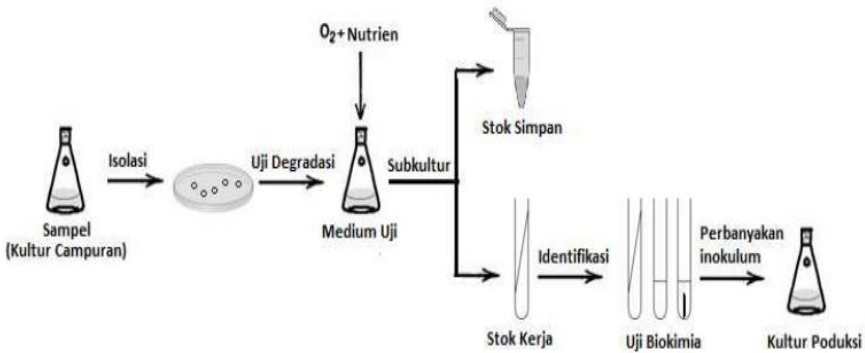
Gambar 7.1. Proses *Self-Purification* di sungai yang diadopsi pada IPAL (Priadie, 2012)

2. Pertumbuhan Mikroba Tersuspensi

Mikroba ini berada dalam bentuk suspensi pada air tercemar. Aplikasi penggunaan IPAL melalui sistem lumpur aktif memanfaatkan bak aerasi. Pertumbuhan mikroorganisme tersuspensi berasal dari agregat mikroorganisme tumbuh sebagai *flocs* dalam kontak dengan air limbah pada saat pengolahan. *Flocs* terdiri dari spesies mikroba yang berperan dalam penurunan polutan. Mikroba yang umumnya ditemukan berupa bakteri, protozoa dan metazoa. Tahapan-tahapan yang diperlukan dalam proses alami *Self Purification* antara lain:

1. Isolasi bakteri

Tahap awal isolasi bertujuan untuk mendapatkan bakteri yang cocok pada proses remediasi polutan yang diinginkan. Secara alami jumlah bakteri yang diinginkan dapat ditumbuhkan pada media selektif tergantung pada tujuan yang dicapai, serta bakteri terpilih merupakan bakteri yang memberikan kinerja penurunan kadar polutan optimal.



Gambar 7.2. Proses Isolasi, identifikasi dan Perbanyakan Inokulum (Priadie, 2012)

2. Pengujian bakteri dalam menurunkan polutan
Bakteri yang berpotensi menurunkan polutan pada aplikasi bioremediasi untuk air tercemar dapat dibedakan menjadi dua yaitu bakteri indigenous dan bakteri *commercial product*. Bakteri indigenous dapat menurunkan kadar logam berat dan memiliki kemampuan mereduksi pencemar organik (Suyasa, 2003).
3. Identifikasi
Identifikasi bakteri dilakukan dengan cara pengamatan morfologi sel, pewarnaan gram, dan uji biokimia bakteri.
4. Perbanyakan bakteri
Setelah mendapatkan biakan isolat bakteri yang diinginkan selanjutnya membuat perbanyakan bakteri skala lapangan. Perbanyakan bakteri merupakan proses perbanyakan inokulum melalui proses pembuatan kultur stok, pemeliharaan kultur, perbanyakan kultur tahap I, perbanyakan kultur tahap II, dan pembuatan kultur produksi. Pengembangan inokulum dapat dilihat pada Gambar 7.3.



Gambar 7.3. Perbanyak inokulum Skala *Pilot* Fermentasi Vitamin B12 Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa* (Sumber: Astuti, 2009)

7.3.3 Biodegradasi Bahan Polutan

1. Peranan Mikroba dalam Pembersihan Air

Air kelihatan bersih belum tentu bebas mikroba pencemar. Bahan pencemaran berupa sampah organik, kimia, dan logam berat. Mikroba diperairan akan menyebabkan peningkatan kekeruhan pada air, perubahan warna air, dan oksidasi meningkat. Kekeruhan air meningkat karena jumlah mikroba banyak serta mikroba mrnggunakan bahan organik untuk memperoleh makanan. Semakin meningkatnya bahan organik di perairan menyebabkan rendahnya oksigen terlarut karena oksigen digunakan mikroba untuk proses oksidasi bahan organik sehingga kebutuhan oksigen (BOD) meningkat. Kelompok bakteri besi Crenotrix dan Spaerotilus mampu mengoksidasi senyawa ferro menjadi ferri yang berakibat berubahnya warna air menjadi kehitaman (Jekti, 2018).

2. Peranan Mikroba dalam Mengurai Sampah

Sampah organik diperaikan akan diproses dalam pembuatan kompos dengan memanfaatkan mikroba sebagai decomposer sebagai pengurai sampah. Mikroba memiliki potensi dalam menstransformasi bahan alam dan bahan kimia menjadi sumber karbon dan energi. Jenis mikroba yang berperan dalam proses bioremediasi seperti bakteri, jamur, Actinomycetes, dan protozoa. Selain diproses menjadi kompos, polutan organik di proses menjadi biogas. Produksi biogas menggunakan polutan organik dan sisa bahan ternak diuraikan oleh Archaea metanogen. Hasil biogas berupa metana dari proses penguraian limbah organik mengandung protein lemak dan karbohidrat. Proses penguraian tersebut biasa dilakukan oleh bakteri anaerob(Jekti, 2018).

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, D. I. (2009) *Kuliah Prinsip Teknik Fermentasi*. Bandung: ITB.
- Efbertias Sitorus, Eko Sutrisno, Rakhmad Armus, Kasta Guming, Fitria Fatma, Luthfi Parindari, Muhammad Chaerul, Ismail Marzuki, yoga P. (2021) *Proses Pengolahan Limbah*. Edited by R. W. Yayasan Kita Menulis. Available at: https://www.google.co.id/books/edition/Proses_Pengolahan_Limbah/iOsKEAAAQBAJ?hl=id&gbpv=1&dq=polutan+berdasarkan+senyawanya&printsec=frontcover.
- Jain, P. *et al.* (2017) 'Effect of Biodegradation and Non-Degradable Substances in Environment', 1(1), pp. 58–64.
- Jekti (2018) 'Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi (ISBN : 978-602-61265-2-8), Juni 2018', pp. 1–9.
- Khastini, Zahranie, Rozma, dan S. (2022) 'Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi', 10(1), pp. 345–360.
- Lestari, Martina, Roza, dan W. (2018) 'POTENSI JAMUR INDIGENUS RIAU (*Penicillium* sp . PN6)', 11(1), pp. 72–81.
- Lumbanraja, P. (2018) 'Sekolah Pascasarjana Universitas Sumatera Utara-Medan', (September).
- Priadie (2012) 'Teknik Bioremediasi Sebagai Alternatif Dalam Upaya Pengendalian Pencemaran Air', *Priadie*, 10(1), pp. 38–48.
- Rachman, H. *et al.* (2016) 'Kajian Biodegradasi Secara In Vitro Menggunakan Bakteri', 2016, pp. 341–346.
- Said dan Santoso, T. I. (2015) 'Penghilangan Polutan Organik Dan Padatan Tersuspensi Di Dalam Air Limbah Domestik Dengan Proses Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)', 8(1), pp. 33–46.
- Suyasa, I. W. B. (2003) 'Isolasi Bakteri Pendegradasi Minyak /Lemak Dari Beberapa Sedimen Perairan Tercemar Dan Bak Penampungan Limbah', pp. 1–6.

BAB 8

MIKROBA DAN LOGAM BERAT

Oleh Waode Rustiah

8.1 Pendahuluan

Limbah secara umum terdefinisi sebagai bahan sisa/buangan yang dihasilkan akibat suatu proses dan kegiatan produksi, baik dalam skala rumah tangga, pertambangan, industri dan sebagainya. Limbah tersebut dapat berbentuk cair, padat atau gas. Limbah hasil dari suatu kegiatan industri menjadi penyebab salah satu penyebab pencemaran lingkungan yang sangat besar, akibat dalam industri berskala besar akan disertakan dengan limbah yang berskala besar. Tidak adanya penanganan yang baik, hingga menjadikan limbah tersebut sebagai sumber cemaran yang sangat berbahaya bagi lingkungan.

Kendala dalam penanganan limbah industri menjadi salah satu permasalahan yang sering dihadapi oleh negara-negara berkembang seperti halnya Indonesia. Hal ini merupakan implikasi dari pertumbuhan industri-industri yang menyebar di seluruh wilayah dengan tujuan untuk produksi produk-produk dalam pemenuhan kebutuhan masyarakat Indonesia. Menurut Undang-Undang Republik Indonesia (UU RI) No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PPLH), definisi limbah adalah sisa hasil suatu usaha dan/atau kegiatan.

Limbah logam berat yang dihasilkan oleh industri diklasifikasikan sebagai limbah B3 (PP No. 18 Tahun 1999 tentang “Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun”). Limbah yang dihasilkan oleh pabrik mengandung berbagai unsur yang berbahaya bagi kehidupan manusia, salah satunya adalah logam

berat. Limbah logam berat yang dimaksud adalah Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, Cd dan Hg.

Lahan pertanian teririgasi air yang kontaminan logam berat dalam jangka waktu tertentu, akan menyebabkan penurunan kesuburan lahan. Hal ini dikarenakan logam berat dapat mereduksi aktivitas mikroba tanah, penurunan kapasitas tanah dan menghambat proses mineralisasi tanah. Tanah secara alamiah terbentuk sebagai hasil dari kombinasi proses fisik, kimia, dan biologi. Mikroba akan tetap tumbuh walaupun di tanah yang keras, kering, dan lembab. Sebagian besar mikroba tumbuh dan berkembang biak di permukaan tanah, bahkan pada segumpal tanah dapat tumbuh beranekaragam mikroorganisme. Kontaminasi dalam jangka panjang oleh logam berat juga menyebabkan terjadinya penumpukan logam berat di dalam tanah dalam waktu lama dan tidak dapat terdegradasi, sehingga jumlah logam akan terakumulasi dari waktu ke waktu, yang mana pada tingkat tertentu dapat menyebabkan fitotoksik.

Salah satu upaya dalam penanggulangan permasalahan pencemaran logam berat ialah menggunakan metode bioremediasi dengan pemanfaatan mikroba. Beberapa mekanisme mikroba beradaptasi pada lingkungan yang tercemar logam-logam, antara lain: mikroba mempresipitasi ke dalam bentuk garam-logam yang tidak larut, konversi sebagai sumber energi, imobilisasi logam ke dalam dinding sel, mengubah permeabilitas dari membran sel mikroba terhadap logam, sintesis agen pengkelat dan mereduksi logam menjadi bentuk tidak toksik. Kemampuan mikroba tersebut yang digunakan dalam proses detoksifikasi logam, dikenal dengan istilah bioremediasi (Bhawna Tyagi and Naveen Kumar, 2021).

8.2 Mikroba

Mikroba adalah organisme mikroskopis yang tidak cukup besar untuk dilihat dengan mata telanjang. Namun, mikroba terutama merujuk pada bakteri penyebab penyakit atau

fermentasi. Secara umum, bakteri adalah prokariota yang menghuni semua habitat di bumi. Mereka memiliki DNA dalam sitoplasma dan tidak ada organel terikat-membran hadir dalam bakteri. Juga, dinding sel kebanyakan bakteri terdiri dari peptidoglikan. Ada tiga bentuk umum bakteri: bola (*coccus*), berbentuk batang (*bacillus*), atau melengkung (*spirillum*, *spirochete* atau *vibrio*).

Berjuta-juta bakteri hidup di sekitar lingkungan manusia namun sebagian bakteri ini tidak berbahaya bagi manusia, bahkan beberapa bakteri hidup dalam tubuh manusia berperan penting melindungi tubuh dari serangan organisme luar dan juga berperan dalam proses membantu pencernaan, membuat vitamin yang diperlukan oleh tubuh. Namun, beberapa bakteri bersifat fotosintesis, sementara yang lain menggunakan senyawa organik dan anorganik untuk menghasilkan energi. Kebanyakan bakteri mengalami fermentasi tanpa adanya oksigen. Tidak semua bakteri berbahaya dan mereka juga bisa membantu. Tetapi, beberapa bersifat patogen dan dapat menyebabkan penyakit pada organisme lain termasuk manusia, hewan dan tumbuhan.

Mikroba dapat ditularkan melalui air kotor yang dicemari tinja manusia adalah berupa *Escherichia coli*. Mikroba yang dapat ditularkan melalui tanah dan debu adalah *Clostridium*, mikroba yang dapat ditularkan melalui tanaman biji-bijian adalah *Bacillus cereus*. *Salmonella* dapat mencemari jamu secara langsung/tidak langsung melalui tinja manusia, atau air yang tercemar oleh sampah atau ditularkan melalui bahan mentah, melalui tangan pengolah makanan atau melalui peralatan yang digunakan.

Populasi mikroba dalam setiap makanan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti tersedianya nutrisi, air, suhu, pH, potensial redoks, dan adanya zat penghambat. Bila mikroorganisme ini populasinya meningkat dapat menimbulkan berbagai masalah, antara lain: menentukan taraf mutu bahan makanan, mengakibatkan kerusakan pangan, merupakan sarana penularan beberapa penyakit menular dan keracunan makanan.

8.3 Logam Berat

Logam berat adalah unsur-unsur kimia dengan bobot jenis lebih besar dari 5 gr/cm^3 , terletak di sudut kanan bawah sistem periodik, mempunyai afinitas yang tinggi terhadap unsur S dan biasanya bernomor atom 22 sampai 92 dari perioda 4 sampai 7. Sebagian logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) merupakan zat pencemar yang berbahaya.

Logam berat juga mengendapkan senyawa fosfat biologis atau mengkatalis penguraian. Berdasarkan sifat kimia dan fisiknya, maka tingkat atau daya racun logam berat terhadap hewan air dapat diurutkan (dari tinggi ke rendah) sebagai berikut merkuri (Hg), kadmium (Cd), seng (Zn), timah hitam (Pb), krom (Cr), nikel (Ni) dan kobalt (Co).

Menurut Darmono (1995) daftar urutan toksisitas logam paling tinggi ke paling rendah terhadap manusia yang mengkonsumsi ikan adalah sebagai berikut: $\text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ag}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{As}^{2+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Sn}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. Sedangkan menurut Kementrian Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup (1990) sifat toksisitas logam berat dapat dikelompokkan ke dalam 3 kelompok, yaitu bersifat toksik tinggi yang terdiri dari atas unsur-unsur Hg, Cd, Pb, Cu, dan Zn. Bersifat toksik sedang terdiri dari unsur-unsur Cr, Ni, dan Co, sedangkan bersifat toksik rendah terdiri atas unsur Mn dan Fe. Hal ini berkaitan dengan sifat-sifat logam berat yaitu :

1. Sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaannya secara alami sulit terurai (dihilangkan).
2. Dapat terakumulasi dalam organisme termasuk kerang dan ikan, dan akan membahayakan kesehatan manusia yang mengkonsumsi organisme tersebut.
3. Mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air. Disamping itu, sedimen mudah tersuspensi karena

pergerakan massa air yang akan melarutkan kembali logam yang dikandungnya ke dalam air, sehingga sedimen menjadi sumber pencemar potensial dalam skala waktu tertentu.

8.4 Pencemaran Logam Berat

Secara umum diketahui bahwa logam berat merupakan unsur yang berbahaya di permukaan bumi, sehingga kontaminasi logam berat di lingkungan merupakan masalah yang besar. Persoalan spesifik logam berat di lingkungan terutama akumulasinya sampai pada rantai makanan dan keberadaannya di alam menyebabkan keracunan terhadap tanah, udara maupun air.

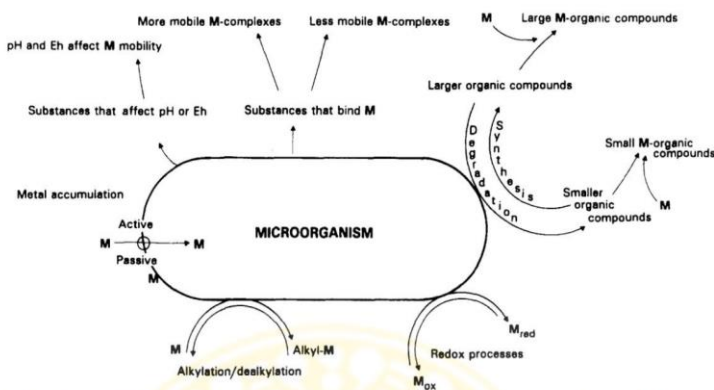
Bahan pencemar senyawa anorganik/mineral misalnya logam-logam berat seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd), Timah hitam (Pb), tembaga (Cu), timbal (Pb) dan garam-garam anorganik. Bahan pencemar berupa logam-logam berat yang masuk ke dalam tubuh biasanya melalui makanan dan dapat tertimbun dalam organ-organ tubuh.

Mikroba memerlukan logam sebagai fungsi struktural dan katalis serta sebagai donor atau reseptor elektron dalam metabolisme energi. Kemampuan dalam interaksi mikroba terhadap logam antara lain :

1. Mengikat ion logam yang ada di lingkungan eksternal pada permukaan sel serta membawanya ke dalam sel untuk berbagai fungsi sel. Contohnya bakteri *Thiobacillus sp.* Mampu menggunakan Fe dalam aktivasi enzim format dehidrogenase pada sitokrom.
2. Menggunakan logam sebagai donor atau akseptor elektron dalam metabolisme energi.
3. Mengikat logam sebagai kation pada permukaan sel yang bermuatan negatif dalam proses yang disebut biosorpsi.

Mikroba mengurangi bahaya pencemaran logam berat dapat dilakukan dengan cara detoksifikasi (*biopresipitasi*), *biohidrometalurgi*, *bioleaching* dan *bioakumulasi*.

1. Detoksifikasi (*biopresipitasi*) pada prinsipnya mengubah ion logam berat yang bersifat toksik menjadi senyawa yang bersifat tidak toksik. Proses ini umumnya berlangsung dalam kondisi anaerob dan memanfaatkan senyawa kimia sebagai akseptor elektron.
2. *Biohidrometalurgi* pada prinsipnya mengubah ion logam yang terikat pada suatu senyawa yang tidak dapat larut dalam air menjadi senyawa yang dapat larut dalam air.
3. *Bioleaching* merupakan aktivitas mikroba untuk melarutkan logam berat dari senyawa yang mengikatnya dalam bentuk ion bebas. Biasanya mikroba menghasilkan asam dan senyawa pelarut untuk membebaskan ion logam dari senyawa pengikatnya. Proses ini biasanya langsung diikuti dengan akumulasi ion logam.
4. Bioakumulasi merupakan interaksi mikroba dan ion-ion logam yang berhubungan dengan lintasan metabolisme.



Gambar 8.1. Proses bioakumulasi senyawa logam berat oleh bakteri

Pada saat logam berat disuspensikan (*mixing*) dengan suatu isolate mikroba, maka akan terbentuk suatu ligand kompleks

yang bervariasi. Ada dua fase pengikatan logam berat oleh bakteri, yaitu fase pengikatan dan transport aktif. Fase pengikatan terjadi di dinding sel dan fase transport aktif terjadi di bagian internal sel.

Interaksi mikroba dengan logam di alam adalah imobilisasi logam dari fase larut menjadi tidak atau sedikit larut sehingga mudah dipisahkan. Adapun contoh mikroba pendegradasi logam yaitu :

1. *Enterobacter cloacae* dan *Pseudomonas fluorescens* mampu mengubah Cr (VI) menjadi Cr (III) dengan bantuan senyawa-senyawa hasil metabolisme, misalnya hidrogen sulfida, asam askorbat, glutathion, sistein, dll.
2. *Desulfovibrio* sp. membentuk senyawa sulfida dengan memanfaatkan hidrogen sulfida yang dibebaskan untuk mengatasi pencemaran logam Cu.
3. *Desulfuromonas acetoxidans* merupakan bakteri anerobik laut yang menggunakan sulfur dan besi sebagai penerima elektron untuk mengoksidasi molekul organik dalam endapan yang bisa menghasilkan energi.
4. Bakteri pereduksi sulfat contohnya *Desulfotomaculum* sp. Dalam melakukan reduksi sulfat, bakteri ini menggunakan sulfat sebagai sumber energi yaitu sebagai akseptor elektron dan menggunakan bahan organik sebagai sumber karbon. Karbon tersebut selain berperan sebagai sumber donor elektron dalam metabolismenya juga merupakan bahan penyusun selnya.
5. Bakteri belerang, khususnya *Thiobacillus ferroxidans* banyak berperan pada logam-logam dalam bentuk senyawa sulfida untuk menghasilkan senyawa sulfat.
6. Mikroalga contohnya *Spirulina* sp., merupakan salah satu jenis alga dengan sel tunggal yang termasuk dalam kelas *Cyanophyceae*. Sel *Spirulina* sp. berbentuk silindris, memiliki dinding sel tipis. Alga ini mempunyai kemampuan yang tinggi untuk mengikat ion-ion logam dari larutan dan mengadsorpsi logam berat karena di dalam alga terdapat gugus fungsi yang

dapat melakukan pengikatan dengan ion logam. Gugus fungsi tersebut terutama gugus karboksil, hidroksil, amina, sulfidril imadazol, sulfat dan sulfonat yang terdapat dalam dinding sel dalam sitoplasma.

7. Jamur *Saccharomyces cerevisiae* dan *Candida sp.* dapat mengakumulasi Pb dari dalam perairan, *Citrobacter* dan *Rhizopus arrhizus* memiliki kemampuan menyerap uranium. Penggunaan jamur mikoriza juga telah diketahui dapat meningkatkan serapan logam dan menghindarkan tanaman dari keracunan logam berat.

8.5 Penggunaan Bakteri untuk Mereduksi Logam Berat

Penambahan logam berat pada suatu ekosistem dalam jumlah dan konsentrasi tinggi dapat menyebabkan mikroorganisme (bakteri) tertekan/stres. Pada konsentrasi tinggi, ion logam berat akan bereaksi membentuk senyawa toksik di dalam sel mikroorganisme (Spain, 2003). Agar dapat mempertahankan hidup dibawah kondisi stres, bakteri mempunyai beberapa tipe mekanisme toleran dalam pengambilan ion-ion logam berat. Mekanisme ini meliputi : efflux ion logam pada bagian luar sel, akumulasi dan kompleks ion logam pada bagian dalam sel, dan reduksi ion logam untuk menurunkan efek toksik.

Mikroorganisme mempunyai kemampuan beradaptasi dan toleran terhadap kehadiran logam berat, bahkan dapat tumbuh. Pengaruh menguntungkan antara mikroorganisme dan logam adalah mikroorganisme dapat membersihkan lingkungan terkontaminasi logam, namun yang tidak menguntungkan adalah mekanisme toleran terhadap logam menyebabkan terjadinya peningkatan bakteri resisten bersifat antibiotik.

Pada saat ini telah banyak mikroorganisme yang dimanfaatkan untuk mendekontaminasi efluen yang mengandung logam berat, misalnya bakteri pereduksi sulfat

(BPS). Reaksi reduksi BPS pada kondisi anaerob dapat dijelaskan ke dalam dua tahap, pertama adalah mereduksi sulfat menjadi sulfid, dan tahap berikutnya mereduksi sulfid menjadi sulfida. Dalam reaksinya, BPS memerlukan substrat organik sebagai donor elektron diantaranya dapat digunakan laktat dan piruvat. Sulfida yang dihasilkan kemudian bereaksi dengan ion logam berat untuk selanjutnya membentuk logam sulfida yang mengendap dan sukar larut. Penggunaan mikroorganisme untuk menahan naiknya logam berat dalam tanaman dilakukan oleh Burd *et al.*, (2000) yang menerangkan bahwa penggunaan mikroorganisme mampu menurunkan kandungan logam Pb dan Cd tersedia dalam tanah serta serapan logam tersebut pada jaringan tanaman.

Bakteri pereduksi sulfat merupakan salah satu jenis mikroorganisme yang dapat digunakan untuk mereduksi logam berat dan salah satu jenis bakteri yang dapat digunakan untuk mengakumulasi logam berat adalah *Desulfotomaculum orientis* isolat ICBB 1204 dan ICBB 1220 (Suyase, 2002; Kurniawan, 2004). Isolat ICBB 1204 mempunyai kemampuan yang tidak berbeda nyata dibandingkan dengan isolat ICBB 1220 dalam menurunkan logam berat. Suyase (2002) dalam penelitiannya menerangkan bahwa isolat ICBB 1204 dan ICBB 1220 mempunyai kemampuan menurunkan Pb sama besar yaitu 99%. Sementara untuk Cd, isolat ICBB 1220 memberi hasil sebesar 90% sedang ICBB 1204 sebesar 87%. Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan (2004) menerangkan bahwa isolat ICBB 1220 mampu menurunkan Pb terlarut dari 14 konsentrasi awal sebesar 10,43 menjadi 0,77 ppm, sedang isolat ICBB 1204 mampu menurunkan Pb dari konsentrasi awal sebesar 10,54 menjadi 1,01 ppm.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Lina (2004) pada limbah yang mengandung Cr menunjukkan bahwa penggunaan ICBB 1204 mampu menurunkan Cr terlarut dari konsentrasi awal sebesar 69,36 menjadi 0,83 ppm Cr. Percobaan

rehabilitasi tanah sawah dengan menggunakan bakteri dilakukan oleh Sandra S.A. (2006) yang dilakukan di rumah kaca dan di lapang menunjukkan bahwa adanya inokulasi bakteri *D. orientis* ICBB 1204 dan ICBB 1220 mampu menurunkan kadar logam berat tersedia dalam tanah serta serapannya dalam jaringan tanaman. Selanjutnya selain dalam akar inokulasi bakteri ICBB 1204 juga secara nyata mampu menurunkan serapan Pb dalam daun/jerami namun tidak demikian dengan Cd dan Cr. Walaupun tidak berpengaruh nyata namun penggunaan isolat bakteri tersebut mampu menurunkan serapan logam berat pada daun. Bila dibandingkan dengan tanpa inokulasi bakteri maka inokulasi isolat ICBB 1204 mampu menurunkan serapan Pb sebesar 40,03 %, Cd sebesar 3,45 %, dan Cr sebesar 26,46 %. Walaupun kedua isolat ini mampu menurunkan kadar logam berat, akan tetapi pengaruh nyata penurunan kadar logam berat dalam tanah terjadi pada percobaan di rumah kaca sedang pada percobaan di lapang tidak demikian. Percobaan di lapang menunjukkan adanya inokulasi isolat ICBB 1204 belum memberi pengaruh nyata. Selain itu pada percobaan di rumah kaca dikondisikan dengan seminimal mungkin masuknya udara dalam tanah terutama pada dua minggu pertama, yaitu dengan cara menutup rapat setiap pot dengan plastik baik bagian dalam maupun luar sehingga kecil kemungkinan adanya kontaminasi dengan udara. Sedang pada percobaan lapang hal ini sulit dilakukan sehingga inokulasi bakteri hanya dilakukan dengan cara mencelupkan bagian akar sebelum padi ditanam. Kemungkinan lainnya adalah pergerakan bakteri di lapang tidak sama dengan di rumah kaca karena bidang gerak bakteri di lapang lebih luas bahkan kemungkinan masuk ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam. Sementara pada percobaan di rumah kaca ruang gerak bakteri hanya seluas pot sehingga diduga dalam percobaan di rumah kaca sampel tanah yang terambil lebih homogen.

8.6 Mekanisme Pemisahan Logam oleh Mikroorganisme

Mikroorganisme lebih sensitif/stres terhadap logam-logam berat dibandingkan binatang tanah atau tanaman pada lingkungan tanah yang sama. Banyak jenis spesies mikroorganisme yang telah diidentifikasi sejak 200 tahun lalu, tetapi sangat sedikit diantaranya teridentifikasi sebagai mikroorganisme yang mempunyai daya tahan tinggi terhadap pengaruh ion logam.

Mikroorganisme memainkan peranan penting di banyak bidang industri dan teknologi, terutama di tanah-tanah bekas penambangan, pertanian dan juga sebagai pengontrol sampah/limbah buangan. Di daerah pertambangan, bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* merupakan salah satu mikroorganisme penting. Bakteri ini termasuk pelarut (*leaching*) logam-logam dari bijih tambang, ditemukan pada daerah tambang yang telah didrainase dengan pH lingkungan masam. *Thiobacillus ferrooxidans* merupakan kelompok *acidophilic kemolithotropik* yang toleran terhadap logam-logam toksik dan hidup pada lingkungan masam dengan temperatur panas, retakan bahan vulkanik, dan deposit bijih sulfida dengan konsentrasi asam sulfurik tinggi.

Pada konsentrasi tinggi, ion logam berat akan bereaksi membentuk senyawa toksik di dalam sel mikroorganisme. Agar dapat mempertahankan hidup dibawah kondisi stres, bakteri mempunyai beberapa tipe mekanisme toleran dalam pengambilan ion-ion logam berat. Secara umum mekanisme ini meliputi:

- a. Efflux ion logam pada bagian luar sel,
- b. Akumulasi dan kompleks ion logam pada bagian dalam sel,
- c. Reduksi ion logam untuk menurunkan efek toksik.

Kemudian peranan mikroorganisme dalam mempengaruhi proses mobilisasi atau immobilisasi unsur-unsur toksik adalah melalui beberapa mekanisme berikut :

- a. Kelat unsur oleh proses metabolisme;
- b. Oksidasi-reduksi logam yang dipengaruhi daya larut atau valensi;
- c. Perubahan pH yang mempengaruhi sifat ion, biosorpsi oleh kelompok fungsional pada permukaan sel;
- d. Bioakumulasi oleh sistem transport energi;
- e. Immobilisasi untuk membentuk bahan stabil, biometilasi, dan biodegradasi kompleks organik pada logam.

Maka hal terpenting dalam pemilihan biomassa yaitu toleransi suatu mikroorganisme terhadap ion logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhawna Tyagi., Naveen Kumar. 2021. Bioremediation: principles and applications in environmental management. Elsevier.
- Clausen, C. A., 2000. Isolating metal-tolerant bacteria capable of removing Cu, Cr, and As from treated wood. Waste Management & Research. 18: 264-268. UK.
- Environment Agency, 2002. Enviromental Facts and Figures. Soils.
- Gazso, L. G. 2001. The key microbial in the removal of toxic metal and radionuclides from the enviroment. CEJOEM 2001. 7:178-185.
- Ghorbani, N. R., Salehrastin, N., and Moeni, A., 2002. Heavy metals affect the microbial populations and their activities. Symposium No. 54. 17th WCSS 14-21 August, Thailand. 2234:1-11.
- Rufus, C., Brown, S. L., Stuczkyński, T. I., Daniel, W. L., Li, Y. M., Siebielec, G., Malik, M., and Compton, H., 2001. Progress in remediation of soils contaminated by mining and smelting of Pb, Zn, Cd using tailor made biosolids mixtures and composts. TEKRAN. Agricultural Research Service.
- Spain, A., 2003. Implication of microbial heavy metal tolerance in the environment. Review in Undergraduate Research. 2: 1-6.
- Turpeinan, R., 2002. Interactions between metals, microbes, and plants–Bioremediation of arsenic and lead contaminated soils. Academic Dissertation in Enviromental Ecology. Dept. of Ecological and Enviromental Sciences, Univ. of Helsinki.
- Winking, S. R., and D. J. Dollhopf, 2000. Alkaline industrial by-products as mine waste amendmets. Land Reclamation Symposium.
- Wood, T.A., K.R. Murray, J. G. Burgess, 2001. Ferrous sulphate using *Thiobacillus Ferrooxidans* cells immobilized on sand for the purpose of treating acid mine-Drainage. Appl. Microbiol. Biotechnol. 56:560-565.

BAB 9

BIOREMEDIASI

Oleh Nur Anny Suryaningsih Taufieq

9.1 Pendahuluan

Peningkatan populasi secara global telah menyebabkan peningkatan eksploitasi sumber daya alam untuk merespon tuntutan penduduk yang tinggi terhadap kebutuhan makanan, energi, dan kebutuhan lainnya. Dampak dari hal tersebut, sejumlah besar bahan kimia organik dan anorganik yang secara langsung dan tidak langsung menyebabkan pencemaran habitat yang berkepanjangan, juga dihasilkan. Kontaminan tersebut memerlukan waktu yang lama untuk di degradasi.

Proses biologis yang dimediasi oleh mikroorganisme atau bioremediasi, saat ini dianggap sebagai salah satu pendekatan yang paling berkelanjutan untuk menurunkan dan mendetoksifikasi kontaminan lingkungan. Padahal proses ini telah lama digunakan, misalnya pada lahan minyak bumi dan lahan pertanian, sebagai solusi rekayasa yang dapat mendegradasi polutan (Mohanta, Mohanta and Mohanta, 2015).

Bioremediasi adalah proses bioteknologi yang menggunakan mikroorganisme dan jamur untuk membersihkan lingkungan. Mikroorganisme seperti bakteri memainkan peran penting dalam hal ini karena mereka menggunakan unsur-unsur yang terdapat dalam tanah untuk aktivitas metabolismenya. Bakteri ini ditemukan di tempat-tempat dimana racun berlimpah dan tidak dapat dihilangkan melalui metode lain. Jika bakteri tidak mendapatkan cukup racun, mereka akan mati atau menyusut. Bakteri juga digunakan untuk menghilangkan zat berbahaya dari sungai dan laut (Adnan, 2010).

Pengelolaan sampah organik dan anorganik melalui penguraian biologis merupakan salah satu bentuk bioremediasi. Proses penguraian sampah dalam kondisi terkendali berkontribusi terhadap penurunan polutan dari lingkungan. Keunggulan teknologi ini dari segi komersial adalah relatif lebih ramah lingkungan, biaya operasional relatif lebih murah, dan fleksibel (Hatmanti, 2011).

9.2 Tipe-Tipe Bioremediasi

Berdasarkan tempat pembuangan limbah, pada prinsipnya ada dua cara bioremediasi, yaitu bioremediasi in situ dan bioremediasi ex situ.

9.2.1 Bioremediasi In Situ

Bioremediasi in situ adalah proses bioremediasi dengan mengandalkan mikroorganisme yang ada di tempat aslinya. Biasanya bioremediasi in situ diterapkan untuk menghilangkan polutan di tanah dan air tanah yang terkontaminasi. Hal ini merupakan cara terbaik untuk pembersihan lingkungan yang terkontaminasi karena dapat menghemat biaya transportasi. Selain itu, cara ini juga ramah lingkungan karena menggunakan mikroorganisme untuk menghilangkan kontaminasi kimia.

Penggunaan mikroorganisme pada proses remediasi lebih baik karena mikroorganisme memiliki afinitas kemotaksis positif terhadap polutan sehingga dapat meningkatkan probabilitas bioremediasi pada area yang terkontaminasi. Selain itu, metode ini lebih disukai karena menyebabkan gangguan paling sedikit pada area yang terkontaminasi, misalnya di area yang terkontaminasi dengan bahan kimia atau radioaktif. Keuntungan lain dari bioremediasi in situ adalah kelayakan sinkronisasi pengolahan tanah dan air tanah.

Namun, bioremediasi in situ memiliki beberapa kerugian: metode ini lebih memakan waktu dibandingkan dengan metode perbaikan lainnya. Hal ini mengarah pada variabel perubahan

musim yang dapat mempengaruhi aktivitas mikroba yang terpapar langsung akibat faktor lingkungan yang tidak terkendali dan penggunaan bahan aditif yang dapat menyebabkan masalah tambahan. Hasil dari bioremediasi ditentukan oleh jenis bahan limbah, yaitu jika limbah bisa menyediakan nutrisi dan energi yang dibutuhkan, maka mikroorganisme akan mampu melakukan bioremediasi. Namun, jika terjadi sebaliknya, maka hilangnya bioaktivitas dapat dikompensasi melalui stimulasi mikroorganisme asli. Pilihan lain adalah menerapkan mikroorganisme hasil rekayasa genetika, walaupun hal ini kurang disukai.

Berdasarkan asal-usul mikroorganisme yang digunakan, bioremediasi in situ terbagi atas 2 yaitu bioremediasi intrinsik dan bioremediasi rekayasa.

1. Bioremediasi Intrinsik

Jenis bioremediasi in situ yang dilakukan tanpa perubahan mikroba langsung dan melalui intermediasi secara ekologis pada area yang terkontaminasi, penguatan populasi dan mikrofauna yang ada secara alami dengan memperbaiki kondisi nutrisi.

2. Bioremediasi Rekayasa

Jenis bioremediasi in situ yang dilakukan melalui pengenalan mikroorganisme tertentu ke area kontaminasi karena kondisi area kontaminasi sering tidak menguntungkan bagi pembentukan dan bioaktivitas mikroorganisme yang diubah secara eksogen. Oleh karena itu, lingkungan perlu dimodifikasi sedemikian rupa sehingga kondisi fisiko-kimia meningkat. Oksigen sebagai akseptor elektron dan nutrisi, misalnya nitrogen dan fosfor, diperlukan untuk meningkatkan pertumbuhan mikroba.

9.2.2 Bioremediasi Ex Situ

Bioremediasi *ex situ* adalah proses bioremediasi yang dilakukan dengan mengangkut tanah yang terkontaminasi atau pemompaan air tanah ke lokasi bioremediasi. Teknik ini memiliki lebih banyak kerugian daripada keuntungan.

Tanah yang terkontaminasi dicampur dengan air dan bahan tambah lainnya dalam tangki besar yang disebut bioreaktor dan bercampur sehingga dapat terjadi kontak antara mikroorganisme asli dengan kontaminan tanah. Nutrien dan oksigen disesuaikan dengan kondisi dalam bioreaktor sehingga tercipta lingkungan yang optimal untuk bioremediasi mikroorganisme. Setelah proses selesai, air dan limbah padat dibuang atau diproses lebih lanjut untuk didekontaminasi polutan yang tersisa.

9.3 Teknik Bioremediasi

Ada beberapa teknik bioremediasi, beberapa di antaranya yaitu bioaugmentasi, biofilter, bioreaktor, biostimulasi, bioventing, biopile dan pengomposan (Baker and Herson, 1994).

9.3.1 Bioaugmentasi

Bioaugmentasi merupakan salah satu teknik bioremediasi melalui penambahan bakteri yang mampu mendegradasi polutan pada media yang tercemar. Penambahan bakteri ke media yang terkontaminasi sering digunakan pada bioremediasi *in situ*. Ada dua faktor yang membatasi penggunaan bakteri dalam pengolahan lahan, yaitu: (a) kultur bakteri yang dibiakkan tidak mampu bersaing dengan bakteri indigenus dalam mengembangkan dan mempertahankan tingkat populasinya dan (b) sebagian besar tanah yang telah terpapar jangka panjang oleh polutan yang dapat terdegradasi memiliki mikroorganisme indigenus yang efektif jika pengolahan lahan dilakukan dengan baik (Vidali, 2001).

9.3.2 Biofilter

Biofilter merupakan salah satu metode pengolahan limbah cair secara biologis. Teknik ini memanfaatkan media habitat mikroorganisme untuk mereduksi kandungan senyawa-senyawa organik dan non organik serta bakteriologis. Proses biofilter terbukti dapat mengolah air limbah menjadi air layak dengan menggunakan tangki penampung khusus sehingga kualitas lingkungan tetap tidak tercemar.

9.3.3 Bioreaktor

Bioreaktor adalah suatu peralatan atau sistem yang mampu menyediakan lingkungan biologis yang dapat menunjang terjadinya reaksi biokimia. Kondisi tersebut diperlukan pada pengolahan limbah secara biologis, yang jumlahnya relatif kecil. Metode ini digunakan untuk mengolah lumpur atau cairan dan biasanya digunakan pada bioremediasi ex situ. Bioremediasi dalam reaktor melibatkan pengolahan bahan padat yang terkontaminasi (tanah, sedimen, lumpur) atau air melalui sistem penahanan yang direkayasa. Bioreaktor lumpur dapat didefinisikan sebagai tempat untuk menahan dan sekaligus sebagai alat untuk membuat fase padat, cair, dan gas dalam kondisi tercampur untuk meningkatkan kecepatan bioremediasi polutan yang terikat pada tanah dan larut dalam air sebagai lumpur cair dari tanah yang terkontaminasi. Secara umum, laju dan luas biodegradasi lebih besar dalam sistem bioreaktor daripada sistem in situ karena lingkungannya lebih mudah dikelola dan karenanya lebih terkendali dan dapat diprediksi.

Terlepas dari keuntungan teknik bioreaktor, ada juga beberapa kerugiannya. Tanah yang terkontaminasi membutuhkan pre-treatment (misalnya, penggalian) atau sebagai alternatif, kontaminan dapat dihilangkan dari tanah melalui pencucian tanah atau ekstraksi fisik (misalnya, ekstraksi vakum) sebelum ditempatkan di bioreaktor (Vidali, 2001). Bioreaktor juga telah digunakan untuk mengolah tanah dan

bahan lainnya yang terkontaminasi residu minyak bumi (Déziel, Comeau and Villemur, 1999).

9.3.4 Biostimulasi

Biostimulasi adalah proses penambahan nutrisi dan oksigen ke dalam suatu area atau tempat yang tercemar dengan tujuan untuk mendukung pertumbuhan dan aktifitas bakteri indigenus yang ada di tempat tersebut. Proses ini dapat dilakukan baik secara in situ maupun ex situ.

9.3.5 Bioventing

Bioventing merupakan teknik bioremediasi in situ yang paling umum digunakan. Teknik ini dilakukan dengan menarik oksigen melalui media yang terkontaminasi untuk merangsang pertumbuhan dan aktivitas bakteri indigenus.

Bioventing menggunakan laju aliran udara rendah dan hanya menyediakan sejumlah oksigen yang diperlukan untuk biodegradasi sambil meminimalkan penguapan dan pelepasan kontaminan ke atmosfer. Hal ini hanya dapat digunakan dimana area kontaminasi jauh di bawah permukaan (Vidali, 2001).

9.3.6 Biopile

Biopile merupakan teknik bioremediasi pada tanah dengan mekanisme pengangkatan tanah tercemar ke permukaan dan selanjutnya diberikan perlakuan penambahan air, udara, dan nutrisi. Proses penambahan nutrisi ke tanah yang terkontaminasi dapat meningkatkan bioremediasi karena struktur matriks kompos organik (Kästner and Mahro, 1996). Teknik biopile ini pernah dilakukan untuk bioremediasi limbah minyak bumi di lapangan Klamono Papua.

9.3.7 Pengomposan

Pengomposan adalah teknik yang melibatkan penggabungan tanah yang terkontaminasi dengan bahan organik yang tidak berbahaya seperti pupuk kandang atau limbah

pertanian. Kehadiran bahan organik ini mendukung pengembangan populasi mikroba dan karakteristik temperatur pengomposan yang tinggi. Pengomposan dapat dilakukan dengan menggunakan tumpukan statis, tumpukan aerasi, atau reaktor yang digunakan secara kontinyu (Vidali, 2001). Kompos meningkatkan oksidasi aromatik kontaminan dalam tanah menjadi keton dan kuinon, yang akhirnya hilang (Wischmann and Steinhart, 1997).

Pengomposan adalah proses dimana sampah organik terdegradasi oleh mikroorganisme, biasanya pada temperatur tinggi yaitu pada kisaran 55-65°C. Peningkatan suhu diakibatkan oleh panas yang dihasilkan oleh mikroorganisme selama degradasi bahan organik pada limbah. Salah satu cara pengomposan adalah menggunakan metode Windrow.

Pengomposan Windrow telah didemonstrasikan mengikuti langkah dasar berikut. Pertama, tanah yang terkontaminasi digali dan disaring untuk menghilangkan batuan besar dan puing-puing. Setelah itu, tanah diangkut ke tempat pengomposan yang telah disediakan dan terlindung dari cuaca ekstrim. Bahan organik (jerami, alfalfa, pupuk kandang, limbah pertanian, dan serpihan kayu) digunakan untuk bahan penggembur dan sebagai sumber karbon tambahan. Tanah dan bahan organik ditumpuk berselang-seling menjadi tumpukan berlapis, yang dikenal sebagai windrow. Windrow dicampur secara menyeluruh dengan menggunakan mesin pemutar yang tersedia secara komersial. Kelembaban, pH, dan temperature dipantau. Pada akhir periode pengomposan, windrow akan dibongkar dan kompos siap digunakan (Antizar-Ladislao *et al.*, 2007)(Antizar-Ladislao *et al.*, 2008).

9.4 Organisme yang Terlibat dalam Proses Bioremediasi

Organisme yang akan diaplikasikan dalam bioremediasi harus memenuhi persyaratan berikut (Alexander, 1994) yaitu: (a) organisme harus memiliki enzim yang efektif dalam proses bioremediasi; (b) organisme harus dapat hidup dan menunjukkan bioaktivitasnya dalam kondisi polusi; (c) organisme harus mampu mendapatkan akses ke kontaminan yang mungkin tidak larut dalam lingkungan berair atau sangat terserap ke permukaan padat; (d) area substrat kontaminan harus dapat diakses oleh enzim aktif yang berperan dalam bioremediasi; (e) kontaminan dan sistem enzimatik harus berhubungan dekat di dalam atau di luar sel; dan (f) kondisi lingkungan yang menguntungkan harus ada atau disediakan untuk memunculkan populasi mikroorganisme yang potensial dalam proses bioremediasi.

Keberhasilan terjadinya bioremediasi bergantung pada syarat-syarat tersebut di atas; namun, terdapat beberapa tipe uniselular dan multiselular memiliki potensi yang diperlukan untuk diterapkan dalam proses bioremediasi. Memang beberapa spesies tanaman dapat digunakan untuk menghilangkan polutan. Tetapi, mikroorganisme memiliki potensi bioremediasi tertinggi karena merupakan pengurai alami dalam ekosistem dan dapat berkembang biak dengan mudah. Mikroorganisme, seperti jamur dan bakteri, mampu mendegradasi dan memecah molekul alami dan atau sintetik.

Berbagai mikroorganisme, seperti *corynebacteria*, *mycobacteria*, *pseudomonas*, diketahui bertindak sebagai bioemulsifier yang tidak beracun untuk menghilangkan tumpahan minyak melalui biodegradasi dimana minyak hidrokarbon di metabolisme sebagai sumber energi dan karbon. Demikian pula, beberapa mikroorganisme berpotensi untuk mendegradasi senyawa sintetik (sebagai sisa-sisa pestisida dalam agroekosistem) secara kolektif disebut sebagai xenobiotik.

Jamur serta beberapa bakteri anaerobik dapat mendegradasi pewarna.

Tergantung pada jenis organisme, beberapa istilah digunakan untuk menentukan bioremediasi. Fitoremediasi disebut jenis bioremediasi yang mengandalkan tumbuhan dan alga sebagai organisme bioremediasi. Mikoremediasi adalah jenis bioremediasi di mana jamur berfungsi sebagai organisme bioremediasi.

Keuntungan dari penggunaan jamur adalah pada jamur terdapat enzim yang penting dalam proses bioremediasi dan dapat di stimulasi dalam kondisi defisiensi nutrisi (Mansur *et al.*, 2003)(Aust, Swaner and Stahl, 2004). Tingkat pertumbuhan jamur juga cukup cepat untuk aplikasi dalam proses bioremediasi. Selain kemampuan untuk menembus substrat yang mencemari, jamur dianggap lebih unggul dari bakteri dalam hal mereka dapat tumbuh di bawah kondisi tekanan lingkungan (pH rendah dan nutrisi yang buruk), dimana bioaktivitas bakteri terbatas (Davies and Westlake, 1979). Jamur mampu bertahan hidup, tumbuh, dan berkembang dibawah kondisi toksik yang tidak dapat ditoleransi oleh sebagian besar bakteri (Aust, Swaner and Stahl, 2004).

9.5 Aplikasi Bioremediasi

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kesuburan tanah sulfat masam adalah bioremediasi. Pada masa ini, telah banyak mikroorganisme yang dimanfaatkan untuk menurunkan kemasaman tanah dan salah satunya ialah bakteri penurunan sulfat (BPS) sehingga tanah tersebut dapat menjadi media tumbuh bagi tanaman (Widyati, 2007). Bakteri penurunan sulfat terpenting yaitu *Desulfovibrio sp.* dan *Desulfomaculum sp.*

BPS dapat digunakan untuk menurunkan kemasaman tanah karena memiliki kemampuan untuk menurunkan sulfat menjadi sulfur. Sulfur ini kemudian bereaksi dengan logam tertentu seperti tembaga, besi, dan seng yang tidak larut dalam tanah

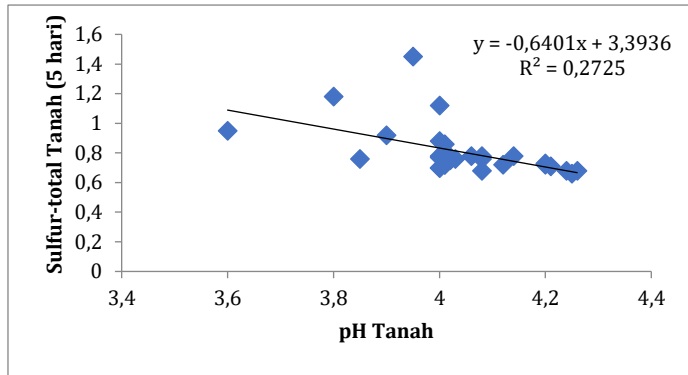
(Benedetto *et al.*, 2005). Selain itu, kemasaman tanah juga berkurang karena terjadi penurunan sulfat akibat aktivitas metabolisme yang dilakukan oleh bakteri. Pada kajian ini, BPS menggunakan dedak sebagai sumber makanan dan tenaga. Seperti kebanyakan limbah pertanian, dedak padi masih mengandung sumber nutrisi yang baik dan sesuai untuk pertumbuhan mikroorganisme (Lubis and Rachmat, 2002). Kombinasi perlakuan media dedak dan konsentrasi bakteri diharapkan mampu memberikan hasil yang optimum dalam memperbaiki karakteristik tanah sulfat masam kepada keadaan yang baik untuk pertumbuhan tanaman.

Kaedah bioremediasi dalam kajian ini bersifat eksperimen dengan menggunakan rancangan acak kelompok dengan tiga perlakuan untuk media bahan organik (dedak) yaitu D0 (tanpa dedak), D1 (1:1) dan D2 (1:19) (Danial, 1998) serta lima perlakuan untuk inokulum bakteri iaitu B0 (tanpa bakteri), B1 (1%), B2 (5%), B3 (10%) dan B4 (15%) (Devita, 2008).

Inokulum bakteri yang digunakan pada kajian ini adalah BPS *Desulfovibrio* sp. yang diperoleh sebagai hasil isolasi dengan menggunakan *Desulfovibrio Medium with Lactate* (RI, 1995). Inokulum bakteri kemudian dicampur dengan media dedak dan di inkubasi selama 4 hari pada temperatur 35°C hingga 37°C. Setelah itu, inokulum bakteri dan media dedak diaplikasikan pada tanah sulfat masam.

Untuk mengetahui terjadinya proses bioremediasi, setiap lima hari sehingga hari ke-20 dilakukan pengukuran pH dan sulfur-total tanah (Widyati, 2007). Penentuan nilai pH tanah diukur dengan menggunakan kaedah Duddridge dan Wainwright (Duddridge and Wainwright, 1981) dan penentuan kandungan sulfat dalam tanah menggunakan spektrofotometer Sequoia Turner model 340 (Pertanian, 2005). Data yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan *Anova*. Apabila terdapat pengaruh nyata dari perlakuan yang diberikan, maka uji dilanjutkan dengan menggunakan *LSD Test* (Montgomery, 2017).

Kajian ini mendapati, media dedak yang digunakan sebagai media tumbuh BPS telah berhasil meningkatkan nilai pH tanah dan menurunkan kandungan sulfur-total tanah sulfat masam. Korelasi antara nilai pH dengan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 5 hari ditunjukkan pada Gambar 9.1.

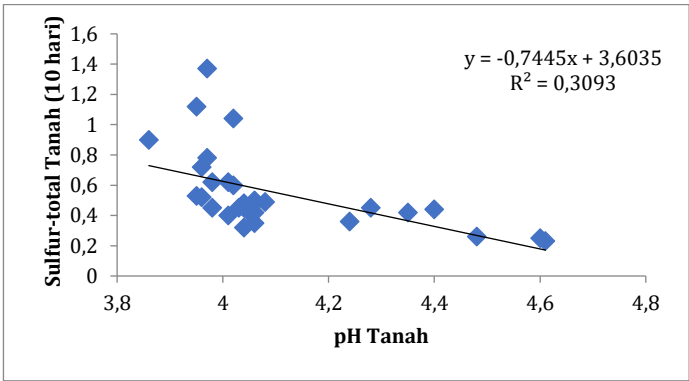


Gambar 9.1 Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 5 hari
(Sumber: Taufieq, 2015)

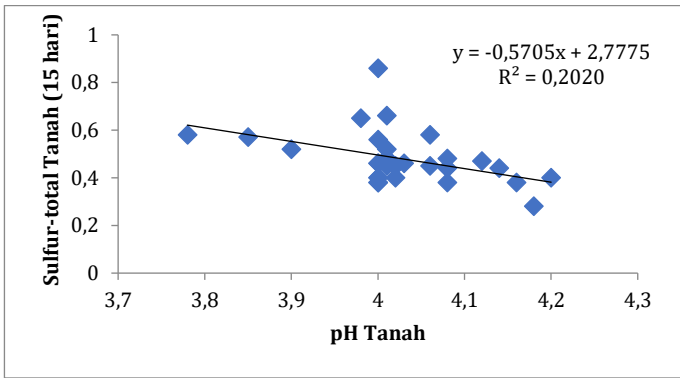
Berdasarkan hasil korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada Gambar 9.1, diperoleh gambaran bahwa perlakuan D2B3 memberikan hasil yang terbaik yaitu dengan pH tertinggi (4.25) dan sulfur-total tanah terendah (0.67%). Gambaran ini juga menunjukkan bahwa pada masa inkubasi 5 hari dosis media dedak 1:19 dan dosis inokulum bakteri 10% memberikan hasil yang optimum. Pada dosis yang lebih rendah, kemampuan bakteri untuk menurunkan kandungan sulfur-total tanah masih rendah yaitu berkisar antara 0.71%–1.04%. Sedangkan pada dosis yang lebih tinggi, kemampuan bakteri menurunkan kandungan sulfur-total tanah relatif sama dengan dosis 10%, tetapi pH yang dihasilkan lebih rendah.

Korelasi antara nilai pH dengan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 10 hari ditunjukkan pada Gambar 9.2. Nilai pH tertinggi (4.56) dan sulfur-total tanah terendah (0.25%) diperoleh pada perlakuan D2B3. Hal serupa juga ditunjukkan

pada masa inkubasi 5 hari. Perbedaan yang nampak pada korelasi ini adalah persamaan antara dua variabel yaitu $y = -0.7445x + 3.6035$, yang mengindikasikan bahwa pH yang semakin tinggi akan menyebabkan penurunan nilai sulfur-total tanah.



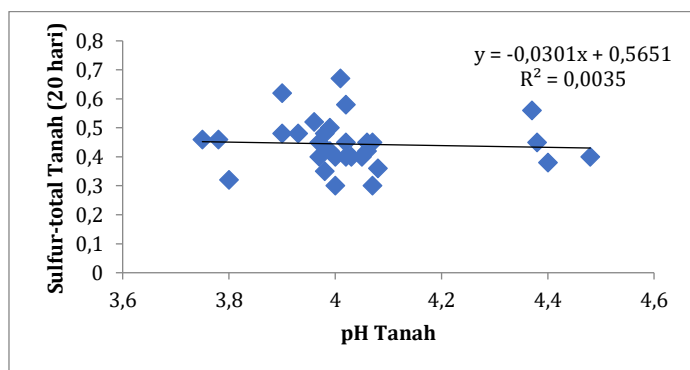
Gambar 9.2. Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 10 hari. (Sumber: Taufieq, 2015)



Gambar 9.3 Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 15 hari. (Sumber: Taufieq, 2015)

Korelasi antara nilai pH dengan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 15 hari ditunjukkan pada Gambar 9.3. Korelasi terbaik antara peningkatan nilai pH dan penurunan kandungan sulfur-total tanah ditunjukkan pada rawatan D2B3 (rawatan media dedak 1:19 dan dos inokulum bakteri 10%) yaitu dengan

pH sebesar 4.18 dan kandungan sulfur-total tanah sebesar 0.35%. Hubungan antara kedua variabel ditunjukkan dengan persamaan $y = -0.5705x + 2.7775$ dimana penambahan pH akan menyebabkan penurunan kandungan sulfur-total tanah.



Gambar 9.4. Korelasi antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 20 hari
(Sumber: Taufieq, 2015)

Korelasi terbaik antara pH dan sulfur-total tanah ditunjukkan pada kondisi pH tertinggi dan sulfur-total tanah terendah. Perlakuan terbaik ditunjukkan pada perlakuan media dedak D2 (1:19) dan dosis inokulum bakteri B3 (10%) dengan pH 4.42 dan kandungan sulfur-total tanah 0.41%. Adapun persamaan antara pH dan sulfur-total tanah pada masa inkubasi 20 hari adalah $y = -0.0301x + 0.5651$. Hal ini menggambarkan bahwa penambahan nilai pH akan menyebabkan penurunan kandungan sulfur-total tanah (Gambar 9.4).

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pembiakan BPS menggunakan dosis media dedak 1:19 dan dosis inokulum bakteri 10% (D2B3) berpengaruh sebagai bioremediasi tanah sulfat masam. Hasil analisis awal sampel tanah memperlihatkan bahwa nilai pH tanah adalah 3.67 dan kandungan sulfur-total tanah adalah 2.85%. Setelah perlakuan dijalankan menggunakan D2B3 dan masa inkubasi 10 hari, nilai pH tanah meningkat menjadi pH 4.56 dan kandungan sulfur-total tanah menurun

menjadi 0.25%. Hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan nilai pH tanah sebesar 0.89 dan penurunan kandungan sulfur-total tanah sebesar 2.60%.

Masa inkubasi yang berpengaruh terhadap pertumbuhan bakteri *Desulfivibrio sp.* sebagaimana diungkapkan pada hasil kajian adalah masa inkubasi 10 hari. Masa inkubasi yang lebih lama cenderung tidak berpengaruh terhadap pertumbuhan bakteri. Penelitian Truong (Truong, Chen and Belzile, 2013) mendukung hasil kajian yang diperoleh. Penelitian ini menggunakan media larutan yang mengandung methylmercury. Kaedah yang digunakan yaitu membandingkan pertumbuhan bakteri *Desulfuvibrio* pada masa inkubasi tiga hari dalam dua jenis larutan yaitu tanpa sulfida dan dengan sulfida. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh gambaran bahwa semakin lama masa inkubasi semakin rendah pertumbuhan bakteri.

9.6 Penutup

Peningkatan kandungan kontaminan pada lingkungan akibat aktivitas pertambangan, pertanian serta industri tak dapat dikendalikan sehingga resiko kerusakan lingkungan merupakan ancaman terhadap kualitas kehidupan manusia. Teknik dan prosedur bioremediasi dapat diaplikasikan pada lingkungan yang tercemar dengan menggunakan potensi mikroorganisme yang tersedia pada lokasi terdekat. Oleh karena itu, bioremediasi sebagai bentuk pengolahan air dan tanah secara biologis merupakan pilihan yang aman dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, A. (2010) *Types of bioremediation: Role of biotechnology in bioremediation*. Available at: <http://www.biotecharticles.com/Others-Article/Types-of-Bioremediation-Role-of-Biotechnology-in-Bioremediation-122.html> (Accessed: 26 March 2015).
- Alexander, M. (1994) *Biodegradation and Bioremediation*. New York: Academic Press.
- Antizar-Ladislao, B. *et al.* (2007) 'The influence of different temperature programmes on the bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a coal-tar contaminated soil by in-vessel composting', *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier, 144(1-2), pp. 340-347.
- Antizar-Ladislao, B. *et al.* (2008) 'Microbial community structure changes during bioremediation of PAHs in an aged coal-tar contaminated soil by in-vessel composting', *International Biodeterioration & Biodegradation*. Elsevier, 61(4), pp. 357-364.
- Aust, S. D., Swaner, P. R. and Stahl, J. D. (2004) 'Detoxification and metabolism of chemicals by white-rot fungi', in: ACS Publications.
- Baker, K. H. and Herson, D. S. (1994) *Bioremediation*. McGraw-Hill, Inc.
- Benedetto, J. dos S. *et al.* (2005) 'Monitoring of sulfate-reducing bacteria in acid water from uranium mines', *Minerals Engineering*. Elsevier, 18(13-14), pp. 1341-1343.
- Danial, M. (1998) 'Kemampuan Enzim Glukoamilase dari *Aspergillus niger* dan *Aspergillus oryzae* dalam Memproduksi Glukosa.
- Davies, J. S. and Westlake, D. W. S. (1979) 'Crude oil utilization by fungi', *Canadian Journal of Microbiology*. NRC Research Press Ottawa, Canada, 25(2), pp. 146-156.
- Devita, I. (2008) 'Bioremediasi Air Asam Tambang Batubara dengan Inokulum Bakteri Pereduksi Sulfat'. IPB.
- Déziel, E., Comeau, Y. and Villemur, R. (1999) 'Two-liquid-phase bioreactors for enhanced degradation of hydrophobic/toxic compounds', *Biodegradation*. Springer, 10, pp. 219-233.
- Duddridge, J. E. and Wainwright, M. (1981) 'Heavy metals in river sediments—calculation of metal adsorption maxima using Langmuir and Freundlich isotherms', *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*. Elsevier, 2(5), pp. 387-397.

- Hatmanti, A. (2011) *Molecular Detection of Bacterial Community in Oilcontaminated Seawaters of Pari Island, Jakarta Bay*. Tesis. Institut Pertanian Bogor.
- Kästner, M. and Mahro, B. (1996) 'Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by the organic matrix of compost', *Applied Microbiology and biotechnology*. Springer, 44, pp. 668–675.
- Lubis, S. and Rachmat, R. (2002) 'Sudaryono., S. Nugraha. 2002', *Pengawetan Dedak Dengan Metode Inkubasi*.
- Mansur, M. *et al.* (2003) 'The white-rot fungus *Pleurotus ostreatus* secretes laccase isozymes with different substrate specificities', *Mycologia*. Taylor & Francis, 95(6), pp. 1013–1020.
- Mohanta, T. K., Mohanta, Y. K. and Mohanta, N. (2015) 'Role of biotechnology in bioremediation', in *Handbook of research on uncovering new methods for ecosystem management through bioremediation*. IGI Global, pp. 399–432.
- Montgomery, D. C. (2017) *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- Pertanian, D. (2005) 'Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk, 60-62', *Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian*.
- RI, D. P. O. M. D. (1995) 'Farmakope Indonesia', *Edisi IV. Depkes RI. Jakarta. hlm, 7*.
- Taufieq, N. A. S. (2015) *Peningkatan Kesuburan Tanah Asid Sulfat Secara Bioremediasi Menggunakan Bakteria Penurun Sulfat (Desulfovibrio sp.) dan Bokashi Hampas Tahu*. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Truong, H.-Y. T., Chen, Y.-W. and Belzile, N. (2013) 'Effect of sulfide, selenite and mercuric mercury on the growth and methylation capacity of the sulfate reducing bacterium *Desulfovibrio desulfuricans*', *Science of the total environment*. Elsevier, 449, pp. 373–384.
- Vidali, M. (2001) 'Bioremediation. an overview', *Pure and applied chemistry*. De Gruyter, 73(7), pp. 1163–1172.
- Widyati, E. (2007) 'Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat untuk bioremediasi tanah bekas tambang batubara', *Biodiversitas*, 8(4), pp. 283–286.
- Wischmann, H. and Steinhart, H. (1997) 'The formation of PAH oxidation products in soils and soil/compost mixtures', *Chemosphere*. Elsevier, 35(8), pp. 1681–1698.

BAB 10

BIOENERGI

Oleh Rahmawati

10.1 Pendahuluan

Kebutuhan energi primer bahan bakar minyak terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan teknologi terkini. Konsumsi bahan bakar dalam negeri terus meningkat dari tahun ke tahun. Konsumsi bahan bakar domestik per hari rata-rata antara 140.000 dan 180.000 kiloliter. Meningkatnya kebutuhan energi berarti pengembangan dan konsumsi energi yang berasal dari minyak bumi meningkat dan cadangan minyak semakin berkurang. Salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggali sumber energi terbarukan yang dapat berproduksi secara berkelanjutan dan berkelanjutan. Mengingat situasi ini pemerintah telah bekerja serius pada pengembangan bioenergi (Devita, 2015).

Bioenergi merupakan energi yang berasal dari organisme hidup atau bahan organik. Umumnya bioenergi menghasilkan tiga jenis sumber energi, yaitu biofuel (bioetanol dan biodiesel), biogas dan biomassa padat (biobriket serpihan kayu dan residu pertanian). Bioenergi dapat menghasilkan tiga jenis energi, yaitu bahan bakar transportasi, listrik dan panas. Bioenergi diharapkan mampu menggantikan peran dominan sumber energi terbarukan dari sumber energi fosil (Dharmawan, *et al.*, 2018).

Bioenergi memainkan peran penting dalam mencapai tujuan mengganti bahan bakar fosil minyak bumi dengan bahan baku alternatif dan mengurangi emisi karbon dioksida dalam jangka panjang. Salah satu bentuk bioenergi yang saat ini sedang dikembangkan adalah biofuel yaitu sumber energi yang

dihasilkan dari biomassa antara lain bioetanol untuk biodiesel dan biooil. Keunggulan bioenergi adalah dapat mempertahankan efek degradasi yang ramah lingkungan dan menjamin kelestarian bahan baku.

Bioenergi telah menjadi topik penting di Indonesia dalam satu dekade terakhir. Pertanian Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi biomassa yang besar dalam industri pengolahan hasil hutan hortikultura atau sampah organik perkotaan. Di sisi lain sebagai negara kepulauan dengan lautan luas Indonesia memiliki potensi besar untuk menghasilkan sumber daya bioenergi lainnya seperti biomassa dan alga. Sejumlah besar potensi diharapkan tersedia untuk mendukung kebutuhan energi negara yang terus meningkat (Hutrindo, 2015).

Menurut peraturan pemerintah tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) No. 79 Tahun 2014 menargetkan sektor energi dan sektor transportasi dalam pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan. Menurut Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (DJEBTKE) potensi biomassa Indonesia dapat menghasilkan listrik sebesar 32 GW per tahun. Namun demikian, dari potensi yang besar tersebut, hingga tahun 2014 baru terpasang sekitar 1, 74 GW atau 5,4 persen dari total potensi yang ada. Pada saat yang sama penggunaan bioenergi di sektor transportasi ditujukan khusus untuk mengganti bahan bakar, yaitu mengubah biodiesel menjadi solar dan bioetanol menjadi bensin. Kontribusi kedua bahan bakar cair tersebut yang disebut juga bahan bakar nabati (BBN) ini diharapkan mencapai 25 % campuran bahan bakar sektor transportasi pada tahun 2025. Dan bauran energi terbarukan di KEN ditargetkan mencapai 23 persen pada tahun 2025 dan 31 persen pada tahun 2050. Bioenergi tidak diragukan lagi akan menjadi salah satu sumber energi yang dapat diandalkan untuk mencapai tujuan tersebut (Hutrindo, 2015).

Penggunaan bioenergi untuk pembangkit listrik juga diperkirakan akan meningkat di seluruh dunia. Berbagai data kebijakan dan perencanaan energi dari banyak negara di dunia

yang ditabulasikan oleh IEA (*International Energy Agency*) menunjukkan bahwa tren pertumbuhan produksi listrik global dari bioenergi akan meningkat drastis pada tahun 2025.

Upaya Indonesia untuk memproduksi bioenergi dilatarbelakangi oleh motivasi penggunaan energi bersih untuk menjawab kekhawatiran tentang efek negatif emisi gas rumah kaca (GRK) dari penggunaan energi fosil. Bioenergi bukanlah energi bersih karena masih terkait dengan proses produksi yang tidak sepenuhnya berkelanjutan. Namun bioenergi dianggap sebagai sumber energi yang lebih hijau daripada energi fosil karena merupakan energi yang dihasilkan dari kegiatan produksi pertanian. Emisi karbon yang dihasilkan dari pembakaran bioenergi selanjutnya dapat diserap kembali ke dalam sistem siklus karbon kegiatan pertanian (Dharmawan, et al., 2018).

Bioenergi juga menjadi solusi untuk meningkatkan perekonomian daerah dan negara melalui pembangunan pertanian. Permintaan bahan baku bioenergi akan mendorong peningkatan produksi biomassa dari sumber dalam negeri yang selanjutnya mendorong pertumbuhan industri bioenergi memperluas kesempatan kerja dan meningkatkan pendapatan negara serta pertumbuhan ekonomi (Dharmawan, *et al.*, 2018).

Bahan Bakar Nabati (BBN) atau biofuel adalah bahan bakar transportasi berbahan dasar hasil pertanian yang biasa digunakan untuk makanan. Produk biofuel komersial yang populer adalah bioetanol dan biodiesel. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang menjanjikan, ramah lingkungan dan tidak menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan bila digunakan sebagai bahan bakar kendaraan yang dapat menurunkan emisi dibandingkan dengan minyak solar. Biodiesel dapat digunakan dalam bentuk murni atau campuran dan paling cocok untuk mesin diesel. Biodiesel digunakan untuk mengurangi konsumsi solar (Devita, 2015).

Produksi BBN di Indonesia juga menunjukkan pertumbuhan yang menggembirakan sejak tahun 2010.

Indonesia memproduksi 243.000 kiloliter BBN pada tahun 2010 dan produksi meningkat menjadi 1,8 juta kiloliter pada tahun 2011. Angka produksi ini terus meningkat dengan produksi BBN Indonesia mencapai 2,8 juta kiloliter pada tahun 2013. Dibandingkan dengan dalam negeri, konsumsi produksi biofuel di Indonesia terutama digunakan untuk tujuan ekspor (Hutrindo, 2015).

Sebagai negara agraris yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia kaya akan potensi bioenergi baik berupa cairan (bioethanol) gas padat (biogas) maupun bahan bakar untuk pembangkit listrik. Indonesia memiliki peluang besar untuk tidak hanya meningkatkan ketahanan energinya dengan menggunakan teknologi bioenergi, tetapi juga berkontribusi pada pasokan energi berkelanjutan masyarakat global. Sebagai produsen minyak sawit terbesar dunia, Indonesia berpotensi menjadi salah satu produsen biodiesel terbesar. Saat ini kapasitas terpasang biodiesel dari minyak sawit adalah 63 juta kilometer per tahun. Selain itu limbah kelapa sawit dari industri kelapa sawit memiliki potensi besar untuk diubah menjadi energi. Industri lain yang dapat menghasilkan bioenergi adalah industri gula yang mengolah bioetanol untuk menyediakan listrik nasional.

Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas pertanian terpenting untuk produksi bioenergi di Indonesia. Setidaknya dua bentuk energi yang dapat dihasilkan dari minyak sawit adalah biodiesel dan bioenergi. Pengolahan lebih lanjut minyak sawit menghasilkan biodiesel dan bioenergi dihasilkan dengan menggunakan sisa pengolahan tandan buah segar (TBS) sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Produksi minyak sawit (CPO) nasional meningkat dari 22 juta ton pada 2010 menjadi 31,1 juta ton pada 2015 ((BPS), 2016).

Pengembangan bioenergi dapat digunakan sebagai alat untuk mengendalikan harga komoditas termasuk komoditas pertanian. Pengembangan biodiesel berbasis sawit di Indonesia

merupakan salah satu langkah untuk membatasi pasokan minyak sawit di pasar global yang akan meningkatkan harga minyak sawit internasional dan menghidupkan kembali sektor sawit di Indonesia (Agustian, *et al.*, 2015).

Sumber energi terbarukan lainnya adalah pembangkit listrik berbasis bioenergi. Bioenergi dapat dikonversi menjadi listrik dengan menggunakan biofuel seperti biogas dan biomassa: 1) Mengembangkan pembangkit listrik biomassa dengan bahan baku tanaman pertanian dan sampah perkotaan; 2) Pengembangan listrik berbasis biogas yang dihasilkan dari kelapa sawit. Limbah cair dan limbah industri lainnya (tahu, singkong, dll); 3) Pengembangan listrik berbasis ganggang dan minyak sawit mentah (CPO). Bahan baku ganggang digunakan untuk menghasilkan biogas yang diubah menjadi listrik dan produk sampingannya adalah kompos (Lumbangaol, 2016).

Bioenergi sebagai salah satu bentuk energi baru terbarukan (EBT) akan menjadi jenis energi terbarukan yang paling banyak memberikan kontribusi dibandingkan dengan jenis EBT lainnya di masa mendatang.

Sumber energi alternatif tersebut berasal dari tumbuhan hewan dan limbah rumah tangga. Tumbuhan yang berpotensi besar untuk digunakan sebagai pengganti biodiesel antara lain bunga matahari (*Helianthus annuus L.*) 25-50 %, minyak jarak dan Minyak kesambi (*Schleichera oleosa Merr*) sekitar 70 % dan Kemiri sunan (*Alureites trisperma*) termasuk minyak mentahnya dengan kandungan sekitar 43.3 % (Steviano & Kustanti, 2021).

10.2 Jenis Bioenergi

Bioenergi adalah bentuk energi terbarukan yang bersumber dari bahan organik yang diperoleh dari hewan dan tumbuhan. Bahan organik yang dimaksud dapat diperoleh dari berbagai jenis tanaman yang dibudidayakan dalam energy farm dan dari limbah/residu organik (berupa limbah kayu dari limbah

rumah tangga pengolah gas buangan kotoran hewan dan gas metana yang berasal dari fasilitas pengolahan limbah). Indonesia memiliki banyak jenis bahan baku bioenergi (keanekaragaman hayati) dan distribusinya hampir merata di seluruh Indonesia dengan jumlah yang relatif besar. Ini adalah sumber daya yang sangat potensial untuk mendukung sistem pasokan energi nasional dalam jangka panjang.

Bioenergi merupakan bentuk baru energi terbarukan. Ada beberapa faktor yang membedakan bioenergi dari jenis EBT lainnya (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 10.1). Misalnya sebagian besar sumber bioenergi berasal dari sumber daya manusia seperti hutan pertanian. Jenis EBT lebih mengandalkan alam seperti solar wind dan hydropower. Selain itu, bentuk EBT lainnya harus digunakan di tempat untuk menyimpan bioenergi sebelum dapat digunakan dan diangkut (Hutrindo, 2015).

Tabel 10.1 Karakteristik Bioenergi dibanding dengan Energi baru Terbarukan lainnya

Komponen	Bioenergi	EBT Lainnya
Ketersediaan	Banyak dipengaruhi dengan usaha manusia	Lebih banyak tergantung kepada alam
Waktu Pemanfaatan	Dapat disimpan dan ditransportasikan	Pada saat harus dimanfaatkan di lokasi
Keberlanjutan	Sangat tergantung kepada pengelolaan	Sebagian besar terhanung kepada alam
Bentuk energi final	Padat, cair, gas, listrik (terus berkembang)	Umumnya dalam bentuk listrik
Sifat Bahan Baku	Umumnya harus dibelu	Sebagian besar gratis
Peluang Pengembangan	Sangat potensial	Sangat potensial
Teknologi	Sederhana-kompleks	Sederhana-kompleks

Komponen	Bioenergi	EBT Lainnya
Ketersebaran	Seluruh Wilayah Indonesia	Terbatas pada wilayah-wilayah tertentu (kecuali surya)

Sumber: (Hutrindo, 2015)

Bioenergi dapat dikelompokkan berdasarkan beberapa klasifikasi, misalnya berdasarkan sumber yang menghasilkan, berdasarkan kandungan materinya ataupun berdasarkan bentuk/wujudnya. Sedangkan dalam konteks pemanfaatannya sebagai bahan baku atau sumber energi, maka bioenergi dapat kita klasifikasikan sebagai berikut:

10.2.1 Bioenergi Padat (Biomassa)

Secara umum biomassa merupakan bahan yang dapat diperoleh secara langsung maupun tidak langsung dari tumbuhan dan digunakan dalam jumlah besar sebagai energi atau bahan. Biomassa merupakan sumber daya terbarukan dan energi yang diperoleh dari biomassa disebut energi terbarukan. Karena biaya bahan bakar fosil terus meningkat dalam beberapa dekade mendatang, energi biomassa akan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pasokan energi secara keseluruhan. Penggunaan biomassa sebagai sumber energi sangat menarik karena merupakan sumber energi dengan kandungan karbon bersih (CO₂) dan tidak berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca. Ini berarti bahwa biomassa bersifat karbon netral (Herlambang, *et al.*, 2017).

Bentuk biomassa yang paling sederhana adalah penggunaan kayu sebagai bahan memasak. Dalam perkembangannya jenis-jenis biomassa semakin beragam limbah industri pertanian/limbah peternakan dll (Hutrindo, 2015). Biomassa biasanya berarti kayu rami rapeseed eceng gondok rumput laut raksasa serbuk gergaji chlorella serpihan kayu

jerami sekam padi sisa dapur lumpur kompos kotoran hewan dll. Jenis tanaman biomassa seperti minyak kayu putih hybrid Arktik. Kategori ini termasuk rumput gajah bersama dengan tebu dan lainnya. Biomassa sangat beragam dan diklasifikasikan tetapi biasanya mengacu pada limbah pertanian seperti sekam padi, residu hutan, lumpur kundoli dll. Biomassa dalam spesies tanaman termasuk rumput laut tebu poplar minyak kayu putih hibrida dan lainnya (Herlambang, *et al.*, 2017).

10.2.2 Bioenergi Cair (Biofuel)

Biofuel yang berasal dari bahan organik dan produk sampingannya merupakan sumber bahan bakar cair. Biofuel sering dikaitkan dengan bahan bakar mobil namun tentunya biofuel digunakan tidak hanya untuk kendaraan tetapi juga untuk genset dan memasak (Hutrindo, 2015).

Produksi biofuel khususnya biodiesel telah berkembang pesat selama satu dekade terakhir sebagai sumber energi terbarukan. Karena negara-negara di seluruh dunia menggunakan biodiesel sebagai sarana penting untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, meningkatkan ketahanan energi, mempromosikan inovasi teknologi, menciptakan lapangan kerja, dan mengembangkan ekonomi regional (Asia, 2020).

Biofuel generasi pertama biasanya dimulai dengan campuran antara biofuel dalam jumlah yang kecil dengan bahan bakar konvensional. Di Indonesia, Pemerintah telah menetapkan target biofuel hingga tahun 2025 melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 25 Tahun 2013. Peraturan ini menargetkan penggunaan campuran biodiesel (B100), bioetanol (E100) dan minyak nabati murni (O100) dengan bahan bakar konvensional dengan pangsa antara 20% - 30% (Hutrindo, 2015).

10.2.3 Bioenergi Gas (Biogas)

Biogas merupakan salah satu sumber energi terakhir yang dihasilkan oleh proses mikroorganisme pengurai bahan organik dalam kondisi anaerobik. Produksi biogas membutuhkan reaktor

biogas yang tertutup (digester) agar proses penguraian bahan organik dapat berlangsung secara optimal. Biogas diproduksi oleh bakteri metanogenik yang tumbuh dari bahan anaerobik dalam kondisi penguraian alami.

Biogas adalah gas yang dihasilkan dari fermentasi bahan organik oleh bakteri anaerob (bakteri yang hidup dalam kondisi aerob). Secara umum semua jenis bahan organik dapat digunakan untuk menghasilkan biogas tetapi hanya bahan organik (padat dan cair) seperti kotoran hewan dan urine yang cocok untuk sistem biogas sederhana (Dewi & Kholik, 2018).

Biogas adalah gas kaya metana yang diperoleh dari pengolahan limbah organik anaerobik (tanpa udara). Bio gas dihasilkan dari kotoran hewan dan limbah pertanian. Biogas dapat langsung digunakan untuk memasak menggunakan kompor konvensional bertekanan rendah. Biogas digunakan untuk berbagai keperluan. Sebuah digester kecil di pedesaan dapat menghasilkan biogas untuk kebutuhan pangan keluarga. Digester besar dapat digunakan untuk menghasilkan bahan kimia elektrovapor dan bahan bakar kendaraan.

Pemanfaatan bioenergi di Indonesia masih terbatas dibandingkan ketersediaannya yang melimpah. Kenyataannya Indonesia tertinggal dari Thailand karena kapasitas produksi atau bahan baku bioenergi kita kurang. Secara keseluruhan kontribusi global bioenergi adalah 10% dari total permintaan energi dunia atau 78% dari total suplai energi terbarukan dunia (Hutrindo, 2015).

10.3 Kegunaan Bioenergi

Ada berbagai metode dan teknologi untuk produksi bioenergi. Bioenergi dihasilkan menurut jenis atau jenis biomassa dan jenis bioenergi yang dihasilkan. Beberapa proses produksi bioenergi sangat sederhana dan dapat digunakan secara langsung seperti penggunaan kayu bakar untuk memasak. Namun ada juga

jenis bioenergi yang membutuhkan proses produksi yang sangat kompleks seperti penggunaan alga untuk menghasilkan bahan bakar nabati (BBN) sebagai alternatif pengganti bahan bakar mobil. Penggunaan alga sebagai biofuel membutuhkan kondisi lingkungan yang spesifik dan proses produksi yang maju.

Bioenergi memiliki sejumlah manfaat atau kegunaan, mulai dari fungsi yang sederhana sebagai bahan bakar untuk memasak, bahan bakar kendaraan bermotor, hingga fungsinya untuk membangkitkan energi listrik. Secara umum pemanfaatan bioenergi telah melalui tiga tahapan yaitu pengumpulan bahan baku dan pemanfaatan teknologi untuk konversi dan pemanfaatan energi seperti terlihat pada Gambar 10.1. Banyak sumber mengklasifikasikan bioenergi berdasarkan hasil produksinya dan membaginya menjadi dua kategori besar: bioenergi (listrik) dan bahan bakar premium (seperti biofuel dan batu bata biomassa) (Hutrinindo, 2015).



Gambar 10.1 Skema Pemanfaatan Bioenergi
(Sumber: (Hutrinindo, 2015))

Teknologi konversi energi biomassa untuk memproduksi bioenergi juga ada berbagai macam tergantung pada jenis bahan

baku dan hasil akhir yang diharapkan. Skematik pada gambar 10.1 menunjukkan ada 3 kelompok besar proses konversi, yaitu:

1. Pembakaran langsung

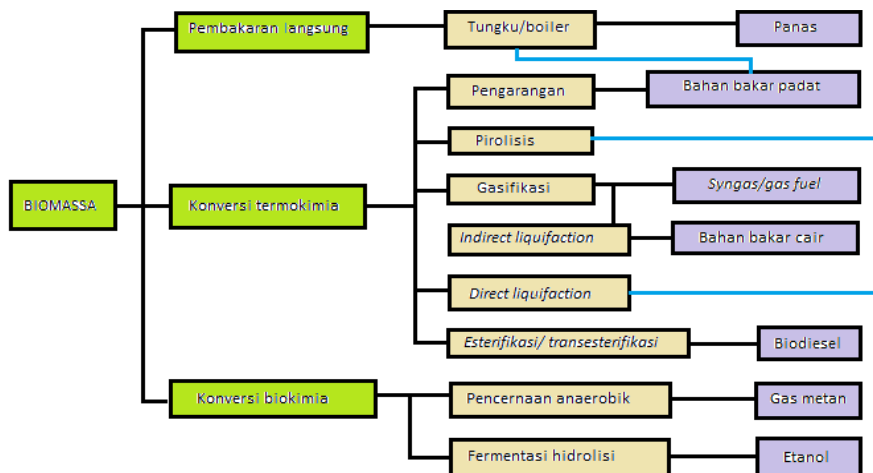
Teknologi yang paling sederhana karena biomassa dapat dibakar secara langsung. Proses yang terjadi adalah proses pembakaran dimana alat/teknologi yang digunakan adalah boiler atau tungku bakar untuk mendapatkan panas (*heat*) (Hutrindo, 2015).

2. Konversi Termokimia

Pada proses termokimia ada beberapa teknologi yang dapat digunakan seperti pengarangan (torefaksi, karbonisasi), pirolisis, gasifikasi, esterifikasi, liquefaction dan lain-lain. Hasil keluaran dari proses ini dapat berbentuk bahan bakar padat, syn-gas dan bahan bakar cair (biofuel). Proses termokimia biasa juga disebut dengan proses termal (panas) (Hutrindo, 2015). Teknologi konversi ini memerlukan bantuan suhu untuk mproses terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar (Parinduri & Parinduri, 2020).

3. Konversi Biokimia

Pada proses ini ada beberapa teknologi yang digunakan seperti: landfill, anaerob digestion, fermentasi dan lain-lain (seperti terlihat pada Gambar 10.2). Hasil keluarannya berupa bahan bakar cair dan biogas. Proses ini sering juga disebut dengan proses dingin (Hutrindo, 2015). Teknologi konversi ini dapat menggunakan mikroba dalam menghasilkan suatu bahan bakar (Parinduri & Parinduri, 2020).



Gambar 10.2 Teknologi Konversi Biomassa
(Sumber: (Hutrindo, 2015))

Bioenergi dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian berdasarkan kegunaannya, yaitu:

1. Biopower, energi listrik yang dihasilkan dari bahan baku berbasis biomassa (lihat Gambar 10.3). Biomassa padat dapat digunakan secara terpisah atau bersama-sama dengan bahan bakar lain seperti batu bara dalam ruang bakar yang sama (co-combustion). Biopower dapat menghasilkan lebih banyak bioenergi.



Gambar 10.3. Biopower dari pembakaran Biomassa

(Sumber: (Hutrindo, 2015))

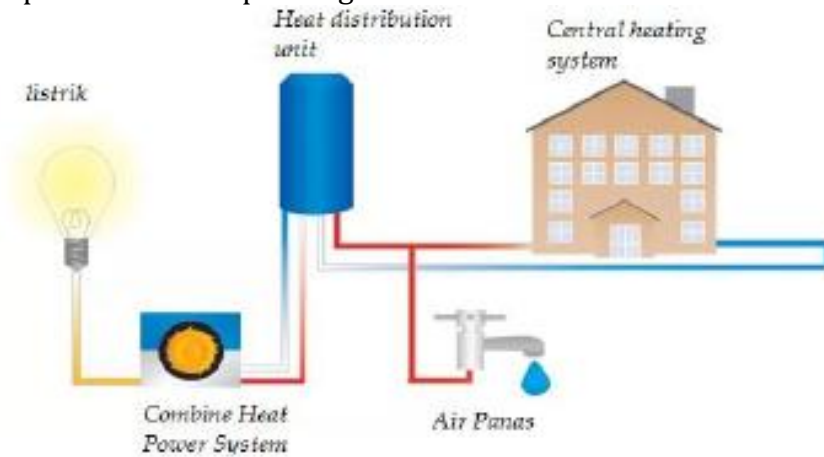
Bahan bakar nabati dalam bentuk *pure plant oil* (PPO) dapat digunakan secara langsung atau digunakan secara bersamaan dengan BBM sebagai bahan bakar PLTD untuk menghasilkan biopower. Pemanfaatan POME (*Palm Oil Mills Effluent*) dari pengolahan kelapa sawit untuk pembangkit listrik juga dapat dikategorikan sebagai biopower (seperti terlihat pada Gambar 10.4).



Gambar 10.4. Biopower dari *Palm Oil Mills Effluent*
(Sumber: (Hutrindo, 2015))

2. Bioheat merupakan panas yang dihasilkan dari bahan baku biomassa. Dengan panas ini dapat digunakan dalam berbagai proses industri seperti memanaskan rumah di musim dingin dan pengering memasak. Bahan baku yang digunakan biasanya biomassa padat dan teknik yang digunakan adalah teknologi pembakaran. Biomassa dibakar dalam ruang bakar dan panas yang dihasilkan dipindahkan ke cairan lain (cair atau gas) yang digunakan untuk pengeringan dalam berbagai proses industri.
3. Biomass, merupakan Biomassa (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.5) dengan metode pembangkit listrik

(umum) untuk menghasilkan listrik dan panas dalam proses pemanasan dan pendinginan di sektor industri dan komersial.



Gambar 10.5. Skematik *Combine Heat Power* (CHP)
(Sumber: (Hutrindo, 2015))

4. Biofuel, merupakan bahan bakar cair (biasanya untuk kendaraan) yang bersumber dari biomassa atau turunannya. Contoh biofuel yang saat ini tersedia secara komersial antara lain bioethanol dan biodiesel.
5. Biobriket adalah produk-produk komersial dan industri yang mengolah biomassa menjadi bahan bakar padat. Contoh: pellet biomassa, briket biomassa dan lain-lain (Hutrindo, 2015).

10.4 Biomassa

Biomassa disebut juga phytomass dan sering disebut sebagai sumber daya hayati atau kekayaan hayati. Basis sumber daya mencakup ratusan dan ribuan spesies tumbuhan, limbah darat dan laut, limbah pertanian, berbagai limbah kehutanan dan industri, limbah hewan, dan limbah. Tanaman energi yang membentuk pertanian energi skala besar akan menjadi salah satu biomassa yang paling menjanjikan meskipun tidak tersedia secara komersial saat ini (Herlambang, *et al.*, 2017).

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis berupa produk sampingan atau limbah. Contoh biomassa antara lain pohon tanaman rumput, ubi jalar, limbah pertanian, limbah hutan, pupuk kandang, dan peternakan. Biomassa digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar) selain digunakan sebagai bahan bangunan untuk pakan ternak, minyak sayur, dll. Biomassa yang biasa digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang memiliki nilai ekonomis rendah atau dibuang setelah dilakukan ekstraksi produk primer (Parinduri & Parinduri, 2020).

Indonesia merupakan penghasil utama biomassa dari limbah pertanian, limbah industri, dan limbah domestik, seperti tandan kosong buah sawit, kulit jagung, ampas tebu, sorgum manis, dan dedak padi. Oleh karena itu Indonesia memiliki peluang besar untuk mengembangkan teknologi konversi biomassa menjadi sumber energi (Hidayanto, 2017).

Pembakaran biomassa untuk energi menghasilkan karbon dioksida tetapi hampir semua karbon dalam bahan bakar diubah menjadi karbon dioksida untuk digunakan sebagai bahan bakar fosil yang dapat dikonsumsi. Namun biomassa dikatakan memiliki net zero carbon berdasarkan asumsi bahwa pohon baru atau vegetasi lain yang ditanam kembali akan menyediakan karbon dioksida yang dihasilkan selama penggunaan biomassa untuk energi. Konsep ini berlaku untuk ekonomi energi yang dikelola dengan baik tetapi tidak untuk negara berkembang di mana sebagian besar energi biomassa berasal dari hutan yang tidak ditanami kembali.

Biomassa sangat beragam dan berbeda sifat kimianya sifat fisik kadar air kekuatan mekanik dll. Dan teknologi untuk mengubahnya menjadi materi dan energi juga berbeda. Penelitian sedang dilakukan untuk mengembangkan teknologi konversi yang ramah lingkungan dan hemat biaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil mengurangi emisi CO₂ dan meningkatkan ekonomi pedesaan (Herlambang, *et al.*, 2017).

10.4.1 Karakteristik Biomassa

Berdasarkan siklus karbon dasar melalui proses fotosintesis sumber daya biomassa dapat digunakan berulang kali dan tidak terbatas. Sumber daya mineral di sisi lain secara inheren terbatas dan sementara. Selain itu, emisi CO₂ yang tidak dapat diubah dari pembakaran bahan bakar fosil akan berdampak serius pada iklim global.

Namun istilah terbarukan dan berkelanjutan tidak selalu berarti hal yang sama. Kapasitas daur ulang tanaman didasarkan pada prinsip ekologi yang kompleks. Prasyarat untuk ekosistem adalah perlindungan lingkungan lahan pertanian dengan menjaga keseimbangan tanaman dan tingkat pertumbuhan. Jika tidak, keberlanjutan jangka panjang dari sistem biomassa tidak akan terjamin.

Ada dua jenis energi: (1) sumber daya tak terbarukan (tipe penyimpanan) dan (2) sumber daya terbarukan (tipe aliran seperti pembangkit listrik tenaga angin surya dan biomassa). Sumber jenis lalu lintas tidak dibatasi tetapi harus dibatasi untuk beberapa waktu. Konsumsi berlebihan seperti penggundulan hutan dapat membuat sistem energi terbarukan ini tidak berkelanjutan.

Bahan bakar biomassa juga menghasilkan karbon dioksida melalui pembakaran. Namun CO₂ diambil oleh tanaman selama pertumbuhan. [CO₂ dirilis] = [CO₂ termasuk dalam proses pertumbuhan]. Batubara juga berasal dari biomassa tetapi jejak karbon batubara berarti jutaan tahun dalam jangka panjang. Tingkat toleransi CO₂ harus dievaluasi dengan mempertimbangkan periode pengembalian CO₂. Setelah pembakaran biomassa, CO₂ tidak dapat diproduksi lagi. Oleh karena itu [kekebalan CO₂ = 1] diperkirakan diperlukan berdasarkan hutan beriklim sedang (diperkirakan pertumbuhan 25 tahun). Untuk hutan subartik pertumbuhan baru = 100 tahun maka tingkat ketahanannya adalah [25/100 = 0,25]. Tingkat ketahanan batubara baru (25 juta tahun) hanya 1 ppm. Oleh

karena itu dapat disimpulkan bahwa bahan bakar fosil tidak memiliki siklus karbon dioksida yang efisien.

Harga bensin dan bahan bakar lainnya akan meningkat dengan efek ekonomi yang merugikan sehingga orang akan beralih ke alternatif bahan bakar fosil. Peningkatan penggunaan biomassa akan memperpanjang umur cadangan minyak mentah yang semakin menipis. Manfaat lingkungan yang signifikan dari penggunaan biomassa dalam hal mengurangi pasokan sumber daya alam memerlukan metode penilaian dampak yang lebih baik untuk diterapkan demi menunjukkan penambahan penggunaan biomassa (Herlambang, *et al.*, 2017).

Pemilihan teknologi yang akan digunakan untuk mengekstraksi energi yang terkandung dalam biomassa sangat tergantung pada sifat/properti/sifat dari biomassa tersebut. Secara umum karakteristik dari biomassa diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Parameter umumnya adalah: Ukuran biomassa, Jenis dan bentuk biomassa/rasio biomassa, Ukuran rata-rata komponen biomassa ketika biomassa heterogen (jika jenis biomassa dicampur).
2. Parameter fisik adalah: Densitas (berat jenis), Bentuk biomassa (padat gas cair), Viskositas Titik nyala, Titik lebur, Panas spesifik nyala, Bentuk fisik, dan hubungan suhu-viskositas.
3. Parameter kimia meliputi nilai kalor dan komposisi komponen biomassa pada analisis kedekatan (karbon dan abu terkait uap air) dan analisis akhir/komponen biomassa (C, H, O, N, S dan abu).

Secara umum biomassa diubah menjadi bioenergi menggunakan proses termokimia. Semakin tinggi nilai kalor biomassa semakin banyak energi yang dikandungnya. Proses konversi yang paling umum digunakan adalah proses termokimia tetapi kadar abu dan kadar air yang tinggi dari biomassa tidak diinginkan. Namun biomassa dengan kadar air yang tinggi masih

dapat digunakan untuk energi menggunakan proses biokimia seperti proses pembakaran sampah atau pencernaan anaerobik untuk menghasilkan biogas yang kaya akan metana (Hutrinindo, 2015).

10.4.2 Komposisi Biomassa

Ada banyak jenis biomassa dengan komposisi yang berbeda. Bahan utamanya meliputi pati selulosa hemiselulosa lignin dan protein. Kayu biasanya mengandung tanaman seperti selulosa hemiselulosa dan lignin tetapi dengan proporsi komponen yang berbeda-beda. Berbagai jenis biomassa memiliki komposisi yang berbeda. Misalnya gandum kaya pati dan kotoran ternak kaya protein. Karena komponen-komponen ini memiliki struktur kimia yang berbeda, mereka juga memiliki interaksi yang berbeda. Dari segi energi penggunaan biomassa lignoselulosa yang terutama terdiri dari selulosa dan lignin seperti pohon sangat melimpah dan memiliki potensi yang besar (Herlambang, *et al.*, 2017).

Biomassa dapat bersumber dari beberapa bahan-bahan sebagai berikut:

1. Limbah (Residu) Pertanian

Setiap limbah/residu pertanian memiliki manfaat yang berbeda dalam pengelolaan pertanian dan proses pasca panen (seperti terlihat pada Gambar 10.6). Sebagian besar limbah ini tidak digunakan dengan benar. Seringkali residu pertanian ini digunakan untuk perlindungan tanah (sebagai pupuk) atau pakan ternak meskipun tentu saja dapat digunakan sebagai sumber bioenergi.



Gambar 10.6. Contoh Limbah/Residu Pertanian
(Sumber: (Hutrindo, 2015))

2. Limbah hasil industry pengolahan hasil hutan

Residu dari proses penebangan di hutan produktif dapat menjadi sumber biomassa. Residu ini biasanya tertinggal atau dibakar. Keuntungan menggunakan residu/limbah hutan sebagai sumber biomassa adalah adanya infrastruktur yang sesuai untuk mengumpulkan bahan baku di hutan produktif dan mengangkut residu ini dengan mudah.

3. Sampah rumah tangga dan industry

Limbah organik rumah tangga organik dari bahan organik atau limbah dari kegiatan industri dapat digunakan sebagai bahan baku biomassa. Misalnya limbah dari tandan buah kosong dapat digunakan sebagai bahan baku biomassa di pabrik kelapa sawit. Biowaste dari limbah domestik dan kegiatan industri dapat dibakar di boiler suhu tinggi untuk menghasilkan uap dan menghasilkan listrik (Hutrindo, 2015).

Adapun potensi tanaman sumber biomassa dapat dilihat pada Tabel 10.2. Berdasarkan pada tabel di bawah ini, dapat dilihat bahwa saat ini biomassa yang paling potensial dari segi ketersediannya adalah biomassa dari kelapa sawit.

Tabel 10.2 Potensial Beberapa Limbah Pertanian Penghasil Biomassa di Indonesia

Biomassa	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)
Tandan kosong kelapa sawit	41,23–44,22	26,50–26,55	17,54–23,62
Pelepah kelapa sawit	36,33	30,34	16,77
Bagas tebu	34,48–36,53	27,04–27,48	22,45–25,42
Daun tebu	35,00	35,50	17,40
Sabut kelapa	44,2	12,1	32,8
Jerami padi	37,82	24,22	12,72
Tongkol jagung	37,0	29,99	13,9
Bagas sorgum	33,53–38,33	30,74–31,80	17,53–18,35
Bambu betung	44,77	18,71	25,38
<i>Eucalyptus globulus</i>	42,89	29,83	25,06
Kayu cepat tumbuh (5 jenis)	40,28–42,92	27,93–30,45	25,20–30,21

(Sumber: (Hermiati, 2019)

Komponen utama biomassa lignoselulosa adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Ketiganya membentuk ikatan kimia kompleks yang menjadi dasar dinding sel tumbuhan. Selulosa merupakan senyawa scaffold yang membentuk 40-50% batang berupa mikrofibril selulosa sedangkan hemiselulosa merupakan senyawa matriks yang terdapat diantara mikrofibril selulosa. Lignin di sisi lain adalah senyawa keras yang melapisi dan mengeraskan dinding sel. Peran ketiga unsur kimia ini dalam dinding sel dapat dibandingkan dengan peran lignin selulosa dan hemiselulosa dalam bahan bangunan beton bertulang dengan masing-masing bertindak sebagai baja struktural semen dan bahan penguat yang menyatukannya untuk memperbaiki ikatan (Hermiati, 2019).

10.4.3 Pengolahan Biomassa (Karbonisasi dan Biokimia)

Karbonisasi adalah proses atau teknik memanaskan biomassa padat seperti sekam bambu atau sekam padi hingga suhu 400–600 °C tanpa atau dengan sedikit atau tanpa udara atau oksigen untuk menghasilkan produk utama arang. Tar dapat diproduksi sebagai cuka kayu dan produk sampingan gas pembakaran. Arang adalah istilah yang digunakan untuk membedakannya dari karbonisasi yang menghasilkan pemulihan dan penggunaan produk cair. Istilah umum yang mencakup distilasi kering tetapi karbonisasi biasanya mengacu pada produksi arang.

Reaksi karbonisasi mirip dengan reaksi pirolisis dalam gas inert seperti nitrogen. Setelah hampir semua air menguap pada suhu 200°C. Ketiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin terurai menjadi fraksi cair dan fraksi gas pada suhu 200-500 °C terutama terdiri dari CO dan CO₂ sehingga terjadi penurunan berat yang cepat. Setiap komponen kayu pada zona ini mengalami dekomposisi dan rekombinasi molekul dan intramolekul melalui proses dehidrasi dan depolimerisasi yang menghasilkan fraksi molekul rendah yang terurai menjadi produk cair dan gas dan fraksi molekul tinggi yang terbentuk melalui kondensasi, dibuat arang bersama dengan bagian yang belum terurai Meskipun kehilangan beratnya menjadi lebih kecil pada suhu di atas 500 °C, karbon aromatik polikondensasi meningkat dengan evolusi H₂ dari arang pada suhu 80 °C hingga 700 °C. Dengan peningkatan suhu lebih lanjut, struktur karbon polikondensasi mengembang untuk meningkatkan kandungan C tanpa produksi H₂ lebih lanjut.

Penggunaan batubara sebagai bahan bakar padat untuk memasak dan memanaskan dan sebagai pakan ternak untuk memperbaiki tanah dan mengontrol kelembapan banyak digunakan. Gunakan kapasitas ketel (sebagaimana mereka menyebut batu bara untuk penggunaan baru). Produk cair asam pirolat memiliki titik didih yang lebih rendah dan dijual sebagai agrokimia sebagai deodoran. Di sisi lain, fraksi bitumen mendidih

yang lebih tinggi memiliki kegunaan obat yang mirip dengan kreosot. Produksi skala laboratorium dan konversi pengikat resin fenolik untuk pengawet kayu menjadi karbon konduktif telah dilaporkan. Penggunaan fraksi gas dapat digunakan sebagai bahan bakar tambahan untuk proses karbonisasi (Herlambang, *et al.*, 2017).

Pemanfaatan energi lain dari biomassa terjadi melalui proses biokimia seperti fermentasi hidrolisis dan pencernaan anaerobik. Pencernaan anaerobik adalah pemecahan biokimia bahan organik atau selulosa menjadi CH_4 dan gas lainnya. Proses untuk menghasilkan etanol dari biomassa selain digesti anaerobik diklasifikasikan sebagai biokimia konversi. Biomassa yang kaya akan karbohidrat atau glukosa dapat difermentasi untuk diurai menjadi etanol dan CO_2 . Namun karbohidrat harus dipecah (dihidrolisis) menjadi glukosa.

Etanol hasil fermentasi umumnya memiliki kandungan air yang tinggi dan tidak cocok digunakan sebagai pengganti bensin. Etanol ini harus didistilasi dengan cara mencapai kadar etanol di atas 99,5% (Parinduri & Parinduri, 2020).

10.5 Biofuel

Biofuel adalah bahan bakar padat cair atau gas yang dihasilkan dari bahan organik. Penganekaragaman energi selain energi berbasis fosil dalam penyediaan energi nasional diversifikasi energi adalah energi berbasis bahan nabati (biodiesel). Biodiesel merupakan energi alternatif terbarukan dan ramah lingkungan serta digunakan dalam bauran energi global. Biofuel dapat diproduksi langsung dari tanaman atau secara tidak langsung dari limbah industri rumah tangga komersial atau pertanian (Heryani, 2019).

Biodiesel adalah bahan bakar yang terdiri dari mono-alkyl ester asam lemak rantai panjang yang digunakan sebagai alternatif bahan bakar mesin diesel yang dihasilkan dari sumber terbarukan seperti minyak nabati: minyak kelapa sawit minyak

kelapa minyak kemiri minyak jarak. Dan minyak kelapa. Berbagai tumbuhan yang mengandung trigliserida. Biodiesel tergolong bahan bakar terbarukan karena dihasilkan dari hasil pertanian antara lain minyak kelapa sawit jarak pagar kapas jagung dan juga dapat dibuat dari lemak hewani. Biodiesel bersifat biodegradable tidak beracun dan pada dasarnya bebas sulfur (Hidayanto, 2017).

Biofuel dapat diproduksi langsung dari tanaman atau secara tidak langsung dari limbah/limbah pertanian domestik dan industri. Bahan baku biofuel dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Tanaman kaya gula seperti tebu bit dan jagung manis. Jenis tumbuhan tersebut dapat menghasilkan etil alkohol dengan menggunakan teknologi fermentasi.
2. Tumbuhan yang mengandung pati/polisakarida seperti jagung. Jagung dapat menghasilkan etil alkohol melalui proses fermentasi.
3. Tumbuhan tinggi minyak nabati/nabati seperti minyak sawit, minyak kedelai, atau minyak jarak. Pemanasan mengurangi kekentalan minyak nabati sehingga dapat digunakan pada mesin diesel. Minyak nabati dapat diproses secara kimia untuk menghasilkan biofuel.
4. Limbah dari kegiatan memasak. Belakangan ini minyak goreng sering digunakan sebagai bahan baku bahan bakar fosil. Banyak inisiatif kecil mencoba mengumpulkan minyak goreng yang digunakan dalam kegiatan memasak di rumah dan mengubah minyak tersebut menjadi sumber bahan bakar mobil (Hutrindo, 2015).

Proses fermentasi dalam produksi biofuel menghasilkan dua jenis bahan bakar alkohol dan ester. Secara teori bahan ini dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Namun membutuhkan perubahan dan penyesuaian mendasar pada mesin agar siap untuk segera digunakan. Oleh karena itu biofuel sering dicampur dengan bahan bakar fosil agar dapat digunakan pada teknologi mesin saat ini.

Bahan baku dari biofuel perlu dibudidayakan untuk menghindari kelangkaan di masa yang akan datang seperti yang terlihat pada gambar 10.8. Jadwal panen untuk bahan baku biofuel perlu direncanakan dengan hati-hati untuk memastikan ketersediaannya dalam jangka panjang.



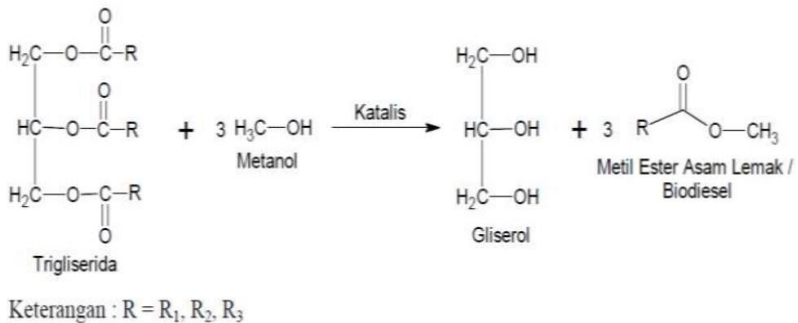
Gambar 10.8 Kemiri sebagai salah satu Bahan Baku Biofuel
(Sumber: (Hutrindo, 2015))

Biodiesel memiliki keuntungan sebagai berikut:

1. Mengandung bahan bakar terbarukan
2. Tidak memerlukan perkuatan mesin diesel yang ada
3. Siklus karbon pendek yang terlibat tidak meningkatkan efek rumah kaca.
4. Kandungan energinya hampir sama dengan solar (sekitar 80 % dari solar)
5. Biodiesel memberikan pelumasan yang lebih baik daripada solar dan dapat memperpanjang umur mesin diesel.
6. Ini 10 kali lebih tidak beracun daripada garam karena terurai lebih cepat daripada solar. Titik nyala solar sekitar 70°C tetapi biodiesel memiliki titik nyala setinggi 200 °C.
7. Bilangan setana yang lebih tinggi daripada solar
8. Hasil pembakaran dari biodiesel sekitar 90% mengurangi total hidrokarbon yang tidak terbakar, sekitar 75-90% mengurangi senyawa hidrokarbon aromatik, secara signifikan

mengurangi gas CO dan 90% mengurangi resiko kanker (Hidayanto, 2017).

Biodiesel diproduksi dengan mereaksikan asam lemak bebas dengan alkohol menggunakan katalis dalam proses yang dikenal sebagai transesterifikasi trigliserida, dengan bantuan katalis menghasilkan metil ester atau etil ester asam lemak (FAME), seperti pada gambar 10.9 berikut,



Gambar 10.9 Reaksi Transesterifikasi Minyak Nabati menjadi Biodiesel
(Sumber: (Hidayanto, 2017))

Metode transesterifikasi terdiri dari empat tahapan:

1. Katalis basa biasanya natrium hidroksida atau KOH dicampur dengan alkohol biasanya metanol dan etanol dengan konsentrasi katalis 0,5 - 1% wt dan 10 - 20% wt metanol dalam minyak.
2. Campuran alkohol dan katalis dengan minyak pada suhu 55°C sambil terus diaduk. Reaksi berlangsung sekitar 30-40 menit
3. Setelah reaksi berhenti campuran didiamkan sampai terjadi pemisahan metil ester dan gliserol. Metil ester yang dihasilkan pada tahap ini sering disebut biodiesel mentah karena metil ester yang dihasilkan mengandung sisa katalis metanol dan pengotor seperti sabun.
4. Metil ester yang dihasilkan pada tahap ini dicuci dengan air panas untuk memisahkan pengotornya kemudian

dikeringkan untuk menguapkan air yang mengandung biodiesel (Heryani, 2019).

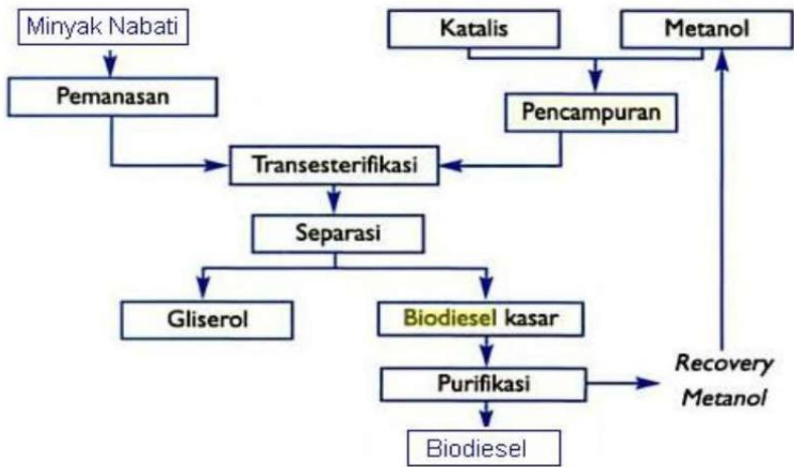
Biodiesel biasanya diproduksi dari: Katalis dan stearin dimasukkan ke dalam reaktor diikuti dengan metanol yang didistilasi ke bagian bawah reaktor. Katalis yang umum digunakan adalah natrium hidroksida (soda kaustik). Campuran direaksikan pada 150 °F selama 1 sampai 8 jam dengan pengadukan kuat. Katalis yang ditambahkan harus cukup untuk mendorong reaksi dan bereaksi dengan asam lemak bebas. Sabun terbentuk jika kandungan asam lemak bebas terlalu tinggi (0,5 %-1 % atau lebih tinggi) atau jika terdapat air dalam reaksi. Ini pertama diemulsi dengan metanol dan minyak untuk mencegah dekomposisi metanol. Minyak yang digunakan harus diolah untuk menghilangkan asam lemak bebas dan terhindar dari air dengan menjaga laju umpan yang masuk.

Metanol ditambahkan berlebih dalam produksi biodiesel sehingga minyak atau lemak bekas diubah seluruhnya menjadi ester. Kelebihan metanol dapat dipisahkan dengan proses distilasi. Metanol yang diperoleh kembali dapat digunakan kembali untuk proses produksi biodiesel lebih lanjut. Penting juga untuk memastikan bahwa air tidak terkumpul di saluran metanol selama langkah ini. Setelah selesainya reaksi dan pemisahan metanol, terbentuk dua produk utama yaitu gliserol dan metil ester. Karena perbedaan densitas (gliserin 10 lbs/gal dan metil ester 735 lbs/gal) keduanya dapat dipisahkan oleh gravitasi. Gliserin terbentuk di lapisan bawah sedangkan metil ester di lapisan atas.

Gliserin yang dihasilkan mengandung katalis dan sabun yang tidak terpakai. Pembersihan gliserin dapat dilakukan dengan menambahkan asam untuk membentuk garam dan menuangkannya ke tempat penyimpanan gliserin yang kotor. Gliserin yang dihasilkan biasanya sekitar 80-88 % murni dan dapat dijual sebagai gliserin mentah.

Setelah dipisahkan dari gliserol metil ester dicuci dengan air panas untuk menghilangkan residu katalis dan sabun kemudian dikeringkan dan dikirim ke penyimpanan. Metil ester yang dihasilkan biasanya memiliki kemurnian tinggi 98 % dan siap untuk dijual sebagai bahan bakar (biodiesel) (Hidayanto, 2017).

Pada proses transesterifikasi produk sampingan dari produksi biodiesel adalah gliserol (gliserin). Gliserin dapat digunakan untuk membuat sabun karena bahan baku sabun ini berfungsi sebagai pelembab. Langkah-langkah pembuatan biodiesel dari minyak nabati adalah sebagai berikut (Gambar 10.10):



Gambar 10.10 Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Nabati
(Sumber: (Hidayanto, 2017))

Biodiesel bersifat lebih ramah lingkungan, dapat diperbarui (*renewable*), dapat terurai (*biodegradable*), memiliki sifat pelumasan terhadap mesin piston karena termasuk kelompok minyak tidak mengering (*non-drying oil*), mampu mengeliminasi efek rumah kaca, dan kontinuitas ketersediaan bahan baku terjamin. Biodiesel bersifat ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang yang jauh lebih baik dibandingkan

diesel/solar, yaitu bebas sulfur, bilangan asap (*smoke number*) rendah, dan angka setana (*cetane number*) berkisar antara 57-62 sehingga efisiensi pembakaran lebih baik, terbakar sempurna (*clean burning*), dan tidak menghasilkan racun (*nontoxic*).

Standar biodiesel dalam bentuk metil ester telah dikembangkan di sejumlah negara untuk menjamin kualitasnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa bilangan cetana (CN) biodiesel lebih tinggi dari pada minyak diesel (solar). Angka cetana rata-rata minyak diesel 45, sedangkan biodiesel 62 untuk yang berbasis kelapa sawit, 51 untuk jarak pagar dan 62,7 untuk yang berbasis kelapa sayur (Hidayanto, 2017).

Tahun 2002, di Amerika Serikat telah dikembangkan standar biodiesel *American Society for Testing and Materials* (ASTM D6751). Berikut dapat dilihat pada Tabel 10.3 sebagai berikut.

Tabel 10.3 Standar Biodiesel Menurut ASTM D6751

Karakteristik	Batasan	Satuan
Titik nyala	130,0 (minimum)	°C
Kadar Air	0,05 (minimum)	% volume
Densitas 40 °C	0,82-0,90	g/cm ³
Viskositas kinematik, 40 °C	1,60-5,80	cSt atau mm ² /s
Abu sulfur	0,02 (maksimum)	% berat
Sulfur	0,05 (maksimum)	% berat
Bilangan sentana	47 (minimum)	-
Residu karbon	0,05 (maksimum)	% berat
Bilangan asam	0,80 (maksimum)	mg KOH/g
Gliserol bebas	0,02	
Gliserol total	0,24	% berat
Kadar FFA	0,45 (maksimum)	% berat
Bilangan penyabunan	500 (maksimum)	mg KOH/g
Bilangan iodium	115 (maksimum)	g I ₂ /100 g

Karakteristik	Batasan	Satuan
Kandungannosfor	0,001 (maksimum)	% berat
Kandungan (Natrium + kalium)	5,0 (maksimum)	mg/kg
Kandungan (kalsium + magnesium)	-	-

Sumber: (Knothe, 2005)

10.6 Biogas

Biogas merupakan salah satu energi baru terbarukan dengan pemanfaatan konversi limbah kotoran hewan menjadi energi. Biogas merupakan gas yang dapat diperoleh melalui proses fermentasi dalam keadaan anaerob. Produksi biogas dapat dilakukan dengan penggunaan digester dalam keadaan anaerob, sehingga bahan-bahan organik dapat terurai oleh mikroorganisme secara optimal. Digester merupakan suatu instalasi kedap udara sehingga proses penguraian bahan organik dapat berjalan secara optimal. Komposisi gas yang terkandung dalam biogas pada umumnya terdiri dari metana (CH_4) sebesar 40-70 %, karbondioksida (CO_2) sebesar 30-60 %, Hidrogen Sulfida (H_2S) sebesar 0-3 %, dan Hidrogen (H_2) sebesar 0-1 %, dan (Dewi & Kholik, 2018).

Biogas dilepaskan ketika gas melewati proses metana dalam biodegrader dengan merebus limbah organik seperti kotoran hewan, kotoran manusia, limbah rumah tangga, atau limbah organik lainnya. Metana merupakan komponen penting yang menjadi standar energi atau nilai kalor dalam biogas. Jika harga metana tinggi biogas memiliki energi yang tinggi dan sebaliknya. Metana tidak berwarna tetapi memiliki bau yang kuat. Ketika metana dibakar menghasilkan api biru tanpa asap. Minyak tanah menghasilkan tingkat panas yang lebih tinggi daripada pembakaran batu bara dan bahan konvensional lainnya. Oleh karena itu biogas memiliki sifat mudah terbakar sehingga dapat

digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk kebutuhan rumah tangga seperti memasak dan penerangan (Steviano & Kustanti, 2021).

10.6.1 Bahan Baku Penghasil Biogas

Biogas biasanya dihasilkan dari metana yang dihasilkan dari dekomposisi bahan organik dalam kondisi anaerobik. Sejumlah gas metana yang dikumpulkan dapat digunakan untuk memasak dan listrik. Sebagian besar limbah organik alami kecuali lignin dapat diolah menjadi biogas. Digester anaerobik dapat menggunakan sejumlah besar bahan organik seperti limbah makanan tanaman kotoran manusia dan limbah lainnya atau satu atau lebih kombinasi dari limbah ini. Kotoran hewan dipilih sebagai bahan produksi biogas karena ketersediaannya yang tinggi. Keseimbangan nutrisi zat ini mudah diencerkan dan relatif dapat terurai secara hayati.

Perlakuan biologis terhadap organisme berkisar antara 28 hingga 70 % tergantung pada pakannya. Misalnya meningkatkan persentase silase pada tanaman jagung yang digunakan sebagai hijauan mengurangi pencernaan karena tingginya persentase lignoselulosa dalam silase. Kompos segar lebih mudah ditangani daripada kompos lama dan/atau kering karena substrat padat yang mudah menguap hilang selama pengeringan.

Bahan dengan rasio C/N tinggi seperti gandum dan jerami dapat dicampur dengan kotoran hewan dan manusia. Bahan-bahan tersebut harus dipotong-potong terlebih dahulu dan diperkecil menjadi ukuran fisik untuk memudahkan proses fermentasi (Steviano & Kustanti, 2021).

Bahan baku biogas terdiri dari:

1. Tempat pengolahan limbah cair. Limbah cair dari kegiatan domestik dan industri juga merupakan sumber gas metana yang dapat digunakan untuk listrik atau memasak. Penggunaan digester anaerobik untuk pengolahan unggun cair berguna untuk mengurai limbah cair dan melepaskan biogas yang dapat dipanen dan diubah menjadi energi. Contoh

- pemanfaatan sumber bahan baku ini adalah pemanfaatan limbah cair kelapa sawit (POME) untuk pembangkit listrik di pabrik kelapa sawit atau untuk memasak di kawasan industri.
2. Gas metana dilepaskan dari kotoran ternak terutama dari sapi perah (Gambar 10.11). Indonesia mulai menggunakan kotoran hewan untuk menghasilkan energi. Beberapa inisiatif telah diluncurkan untuk memanfaatkan kotoran hewan dalam digester kecil yang dapat digunakan di rumah.



Gambar 10.11 Kooran Ternak Sebagai Bahan Baku Biogas
(Sumber : (Hutrindo, 2015))

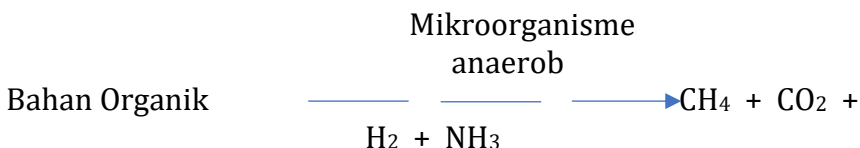
3. Pembuangan sampah (TPS). Sampah organik yang tertimbun di TPS menghasilkan karbondioksida dan metana. Metode pemulihan gas dapat digunakan untuk menangkap metana yang kemudian dapat digunakan untuk pembangkit listrik dan gabungan panas dan tenaga (CHP) (Hutrindo, 2015).

10.6.2 Proses Pembentukan Biogas

Semua jenis limbah sayuran, buah, limbah organik dan kotoran hewan merupakan bahan baku pembuatan biogas. Proses pembuatan biogas dilakukan melalui fermentasi. Proses fermentasi ini membutuhkan waktu 7 hingga 10 hari untuk menghasilkan biogas pada suhu optimum 35 °C dan kisaran pH optimum 6,4 - 7,9 (Steviano & Kustanti, 2021).

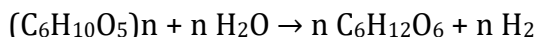
Proses produksi biogas membutuhkan ruang tertutup atau tertutup untuk menjamin kestabilannya. Biogas dibuat oleh

serangkaian proses yang terjadi di lingkungan anaerobik atau anaerobik. Proses ini bermanfaat bagi lingkungan karena efeknya menghilangkan bau dari bahan mentah karena dilakukan di ruang tertutup. Metode umum pembuatan biogas adalah sebagai berikut :



Ada tiga tahapan pembentukan biogas, yaitu tahap pelarutan (hidrolisis), pengasaman (asidifikasi), dan pembentukan gas metana (metanogenesis). Seluruh tahapan dari proses pembentukan biogas memerlukan peran mikroorganisme anaerob.

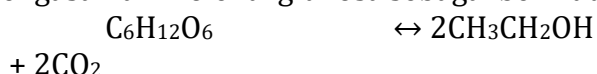
1. Fase Pelarutan (hidrolisis): awal dari proses fermentasi. Selama ini bahan organik dipecah menjadi senyawa yang lebih sederhana. Senyawa-senyawa yang terbentuk selama fase hidrolisis akan digunakan sebagai sumber energi oleh mikroorganisme selama fase pengasaman atau acidification. Tahapan reaksi hidrolisis:

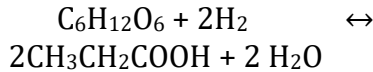


Reaksi pada persamaan diatas merupakan reaksi selulosa ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) ditambah air (H_2O) akan membentuk glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) sebagai produk utama dan melepaskan gas hidrogen (H_2) yang berlangsung pada temperaur 25 °C.

2. Fase Pengasaman (asidifikasi): Pada fase pengasaman bakteri menghasilkan senyawa asam organik seperti asam asetat asam propionat asam butirat dan asam laktat serta produk sampingan seperti alkohol CO_2 hidrogen dan amonia. Bakteri metanogenik seperti *Methanococcus*, *methanosarcina*, *Methanobacterium*, mengubah produk lanjutan dari tahap pengasaman metana menjadi karbon dioksida dan air yang merupakan komponen biogas.

Tahapan reaksi pengasaman molekul glukosa sebagai berikut:

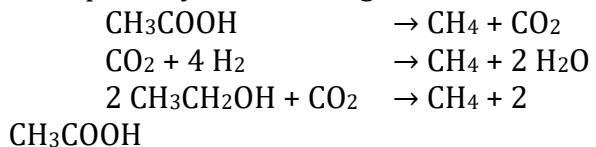




Reaksi tahap pembentukan asam ditunjukkan dalam persamaan diatas. Persamaan (1) menunjukkan proses glukosa diubah menjadi etanol, sedangkan persamaan (2) menunjukkan proses glukosa diubah menjadi propionate yang berlangsung pada suhu 25 °C -30 °C di digester.

3. Tahap metanogenik (pembentukan gas metana): Pada tahap ini energi yang dihasilkan selama pembentukan biogas terutama bergantung pada konsentrasi gas metana. Lebih banyak tenaga dihasilkan karena lebih banyak metana dihasilkan. Bakteri asam dan gas metana bersatu. Bakteri metanogen acidogenic menciptakan lingkungan yang optimal dan metanogen akan menggunakan asam yang dihasilkan oleh bakteri acidogenic. Proses ini berlangsung selama 14 hari dengan suhu 25 °C-35 °C derajat di dalam digester. Proses ini menghasilkan 50 -70 % CH₄, dan 30 % CO₂ serta H₂ dan H₂S.

Reaksi metanogenik dapat dinyatakan sebagai berikut:



Persamaan (1) menunjukkan perubahan asam asetat (CH³COOH) menjadi methan (CH₄) dan karbondioksida (CO₂). CO₂ yang terbentuk direduksi menjadi CH₄ melalui gas H₂ pada Persamaan (2) dan terakhir persamaan (3) menunjukkan pembentukan CH₄ melalui penghilangan karboksilat CH₃CH₂OH.

10.6.3 Cara Pembuatan Biogas

Bahan baku untuk produksi biogas berasal dari kotoran hewan dari peternakan kecil. Berikut adalah data kapasitas produksi pupuk kandang untuk setiap jenis ternak agar lebih jelas.

Tabel 10.4 Potensi Produksi Kotoran Per Jenis Ternak

Jenis Ternak	Bobot Ternak (kg/ekor)	Produksi kotoran (kg/ekor)
Sapi potong	400 – 500	20 – 29
Sapi Perah	500 – 600	30 – 50
Ayam Petlur	1,5 – 2,0	0,10
Ayam Pedaging	1,0 – 1,5	0,06
Domba	30 - 40	2,00

Sumber : (Steviano & Kustanti, 2021)

Adapun cara pembuatan biogas, sebagai berikut:

1. Kotoran sapi dikumpulkan lalu dilarutkan dalam air supaya terbentuk konsentrasi bobot kering yang sesuai (7 % - 9 %)
2. Kondisi di reaktor biogas perlu diperhatikan. Perbandingan unsur karbon dan nitrogen atau ratio C/N yang dibutuhkan sebesar 20 – 24. Jika ratio C/N terlalu tinggi, maka metanogen akan mengambil lebih banyak unsur nitrogen sehingga diperoleh gas metan lebih sedikit. Apabila ratio C/N rendah maka unsur nitrogen akan terlepas dan lingkungan reaktor akan menjadi full dengan penumpukan amonia.
3. pH lingkungan reaktor dipastikan sekitar 6,8 – 8 supaya bakteri pembentuk gas metana dapat tumbuh secara optimal. Jika pH terlalu asam atau basa maka akan terhambat pertumbuhan bakteri metanogenik yang berfungsi menghasilkan gas metana.
4. Faktor penghambat bakteri metanogenik dihindari yaitu logam-logam berat meliputi Cr, Cd, dan Cu, serta penggunaan antibiotik, disinfektan dan deterjen juga dapat mempengaruhi pembentukan biogas.
5. Setelah larutan feedstock masuk ke dalam reaktor biogas dibutuhkan waktu sekitar satu minggu agar biogas siap digunakan sebagai energi alternatif.
6. Sebanyak 600-1000 liter biogas diproduksi setiap hari dari ternak. Sementara satu keluarga membutuhkan energi untuk memasak dan membakar rata-rata 2.000 pon biogas per hari.

Jadi satu keluarga membutuhkan bahan baku untuk 3-4 ekor sapi (Steviano & Kustanti, 2021).

DAFTAR PUSTAKA

- (BPS), B. P. S., 2016. *Statistika Kelapa Sawit Indonesia (Indonesia oil palm statistics) 2015*, Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Agustian, A. et al., 2015. *Kajian Kebijakan Pengembangan Bioenergi Di Sektor Pertanian*, Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Asia, T. E., 2020. *Working Paper 2: Pemanfaatan dan Pengelolaan Biofuel (Biodiesel) Pmbiasaan dan Praktik Baik Dari Berbagai Negara*, Jakarta: Traction Energy Asia.
- Devita, L., 2015. Biodiesel sebagai Bioenergi Alternatif dan Prospektif. *Agricia Extensia*, 9(2), pp. 23-26.
- Dewi, R. P. & Kholik, M., 2018. Kajian Potensi Pemanfaatan Biogas Sebagai Salah Satu Sumber Energi Alternatif Di Wilayah Magelang. *Journal of Mechanical Engineering*, 2(1), pp. 8-14.
- Dharmawan, A. H. et al., 2018. *Working Papaer 242 (Pengembangan Bioenergi di Indonesia: Peluang dan Tantangan Kebijakan Industri Biodiesel)*. Bogor: CIFOR.
- Herlambang, S. et al., 2017. *Biomassa Sebagai Sumber Energi Masa Depan*. Yogyakarta: Lembaga Penelitian dan Pengembangan Masyarakat Universitas Pembangunan Nasional "Veteran".
- Hermiati, E., 2019. *Pengembangan Teknologi Konversi Biomassa menjadi Bioetanol Bioproduk Sebagai Substitusi Produk Berbahan Baku Fosil*, Jakarta: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Heryani, H., 2019. *Teknologi Produksi Biodiesel*. Pertama ed. Banjarmasin: Lambung Mangkurat University Press.
- Hidayanto, A. P., 2017. *Modul Bioenergi*. Jakarta: Universitas Esa Unggul.
- Hutrindo, E., 2015. *Modul Pengenalan Bioenergi*. Jakarta: Pada Pusdiklat Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi.
- Knothe, G., 2005. Dependence Of Biodiesel Fuel Properties on The Structure Of Fatty Acid Alkyl Ester. *Fuel Proc. Technol.*, 86(10), pp. 1059-1070.

- Lumbangaol, P. H., 2016. *ENERGI TERBARUKAN untuk Pembangunan Berkelanjutan Di Indonesia*, Medan: Jurusan Sipil, Fakultas Teknik Universitas HKBP Nommensen.
- Parinduri, L. & Parinduri, T., 2020. Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), pp. 88-92.
- Steviano, O. & Kustanti, E., 2021. *Biogas Untuk Kehidupan*. Pertama ed. Bogor: Pusat Perpustakaan dan Penyebaran Teknologi Pertanian.

BAB 11

ISU GLOBAL KETERKAITAN AKTIVITAS MANUSIA DAN PENGARUHNYA TERHADAP MIKROORGANISME

Oleh Ahmad Zil Fauzi

11.1 Pendahuluan

Kita semua tahu bahwa manusia memiliki segala ide dan kreativitas yang menjadikannya penentu seluruh aspek yang berkaitan dengan kehidupan dan kemajuan peradaban hingga saat ini. Dengan segala potensi yang ada, manusia memainkan peran besar dalam membentuk tatanan dunia. Akan tetapi pernahkah kita berpikir tentang organisme lain tak kasat mata yang terpengaruh oleh tindakan kita setiap hari? Ya, mikroorganisme memang memainkan peranan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem.

Walaupun berukuran sangat kecil, disadari atau tidak, mikroorganisme merupakan organisme yang memiliki peranan paling banyak atas sebagian besar siklus dan proses yang penting di lingkungan, termasuk penguraian, siklus nutrisi, dan produksi di alam raya. Mikroorganisme bertanggungjawab untuk membersihkan polusi udara hingga berperan dalam produksi oksigen yang kita hirup. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam membersihkan polusi di perairan, seperti tumpahan minyak dan bahan kimia beracun, dan juga terlibat dalam produksi gas esensial, seperti oksigen dan nitrogen. Seyogyanya jika kita ingin membangun dunia yang lebih baik dan berkelanjutan, maka kita seharusnya memiliki pemahaman yang lebih baik tentang lingkungan dan makhluk hidup lain, tidak terkecuali dengan mikroorganisme, mengingat hubungan antara aktivitas manusia dan mikroorganisme merupakan hubungan

yang sangat menarik dan sangat kompleks. Itulah mengapa sangat penting untuk memahami hubungan antara aktivitas manusia dan mikroorganisme. Kita perlu mengetahui dan menyadari implementasi dari keseluruhan tindakan kita terhadap lingkungan dan apa konsekuensi dari tindakan itu bagi generasi yang akan datang.

11.1.1 Definisi Aktivitas Manusia

Aktivitas manusia mengacu pada tindakan dan keputusan yang dibuat oleh individu dan masyarakat yang berdampak pada lingkungan dan organisme hidup di dalamnya. Aktivitas manusia seperti pertanian, transportasi, industrialisasi, dan urbanisasi memiliki dampak yang luas terhadap lingkungan, termasuk mikroorganisme. Namun, mikroorganisme juga rentan terhadap dampak aktivitas manusia, dan tindakan kita seringkali mengganggu keseimbangan ekosistem mikroorganisme tersebut.

11.1.2 Pentingnya Memahami Hubungan dengan Mikroorganisme

Mikroorganisme memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan secara langsung dipengaruhi oleh aktivitas manusia. Memahami hubungan antara aktivitas manusia dan mikroorganisme adalah penting karena hal ini membantu kita memahami dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan dan konsekuensinya bagi kesehatan dan kesejahteraan manusia. Meskipun penting, mikroorganisme rentan terhadap dampak aktivitas manusia. Sebagai contoh, polutan dari aktivitas manusia dapat mengubah keseimbangan mikroorganisme di tanah dan air, yang menyebabkan perubahan ekosistem dan berpotensi menimbulkan konsekuensi negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Penggunaan pestisida dan herbisida dapat membunuh mikroorganisme yang bermanfaat, sementara polusi udara, air, dan tanah dapat membahayakan atau bahkan menghancurkan seluruh populasi mikroorganisme. Perubahan iklim juga dapat memiliki dampak yang signifikan, mengubah

suhu dan mengubah pola curah hujan dengan cara yang dapat membahayakan mikroorganisme.

Pemahaman yang lebih baik memungkinkan kita untuk mengembangkan strategi dalam mengelola dan mengurangi dampak negatif dari aktivitas manusia terhadap lingkungan dan mempromosikan pembangunan berkelanjutan. Dengan mengeksplorasi hubungan antara aktivitas manusia dan mikroorganisme, kita dapat memperoleh wawasan yang berharga tentang bagaimana kita dapat membangun dunia yang lebih sehat dan berkelanjutan, dan memastikan bahwa mikroorganisme terus memainkan peran penting mereka dalam menjaga keseimbangan planet kita. Hal ini yang dapat kita jadikan sebagai pedoman awal dan fokus utama sehingga kita dapat memahami hubungan lebih lanjut antara aktivitas manusia dan mikroorganisme.

11.2 Mikroorganisme dan Peranannya dalam Lingkungan

Dunia mikroskopis yang terdapat di lingkungan memainkan peranan penting dan menjadi tulang punggung yang menyokong keberlangsungan ekosistem di planet kita. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam segala hal, mulai dari mengurai materi tanaman dan hewan yang mati hingga memproduksi gas esensial seperti oksigen. Sebagai contoh, mikroorganisme yang berada di dalam tanah, yakni bakteri dan jamur menguraikan materi tanaman dan hewan yang mati, melepaskan nutrisi penting kembali ke tanah untuk mendukung kehidupan baru. Alga yang terdapat di lautan menghasilkan lebih dari 50% oksigen di atmosfer melalui proses fotosintesis. Contoh lainnya, ragi untuk pembuatan roti, membuat bir, dan memproduksi bahan bakar nabati. Bakteri yang terdapat dalam usus kita membantu kita mencerna makanan dan menjaga sistem kekebalan tubuh yang sehat. Beberapa contoh lebih lanjut diuraikan kemudian.

11.2.1 Mikroorganisme dalam Ekosistem

Kita telah mengetahui bahwa mikroorganisme tersebut memainkan peranan penting dalam fungsi-fungsi ekosistem di planet kita. Mikroorganisme yang terdiri dari berbagai bentuk dan relung, maka mikroorganisme pun memiliki tingkat keanekaragaman spesies yang sangat melimpah. Keanekaragaman mikroorganisme merupakan faktor penting dalam berfungsinya ekosistem karena memungkinkan terjadinya berbagai fungsi dan interaksi. Keanekaragaman ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan lingkungan dan memastikan kelangsungan hidup spesies. Dalam sub bab ini kemudian kita akan mengeksplorasi peran mikroorganisme dalam ekosistem dan mengapa mikroorganisme sangat penting bagi kelangsungan hidup kita di Bumi.

11.2.1.1 Peranan Mikroorganisme dalam Siklus Nitrogen

Salah satu peran terpenting mikroorganisme dalam ekosistem adalah keterlibatan mereka dalam siklus nitrogen. Siklus nitrogen dapat diuraikan secara singkat sebagai berikut :

- a) Fiksasi Nitrogen :
Mikroorganisme seperti kelompok cyanobacteria, mampu memfiksasi nitrogen di atmosfer ke dalam bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman.
- b) Amonifikasi :
Penguraian bahan-bahan organik dari organisme lain yang sudah mati oleh bakteri dan jamur dan selanjutnya akan melepaskan nitrogen dalam bentuk amonium.
- c) Nitrifikasi :
Amonium kemudian dioksidasi oleh bakteri yang dikenal sebagai nitrifier yang akan mengubah ammonium menjadi nitrit dan nitrat.
- d) Denitrifikasi :
Bakteri lain yang dikenal sebagai denitrifier, akan mereduksi nitrat kembali menjadi gas nitrogen, yang kemudian dilepaskan ke atmosfer.

e) Asimilasi Nitrogen :

Merupakan tahapan akhir ketika organisme lain kemudian menggunakan nitrat dan mengubahnya kembali menjadi bentuk organik.

Mikroorganisme menjaga keseimbangan nitrogen di lingkungan dan memastikan bahwa nitrogen cukup tersedia untuk digunakan oleh tanaman, hewan, dan organisme lain, sekaligus dapat mencegah terakumulasinya nitrogen tersebut ke tingkat yang beracun. Nitrogen adalah nutrisi penting bagi tanaman, tetapi sebagian besar ditemukan di atmosfer dalam bentuk yang tidak dapat digunakan oleh tanaman. Bakteri pengikat nitrogen mengubah nitrogen di atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman, sehingga mereka dapat tumbuh dan berkembang. Hal ini membantu menjaga keseimbangan nitrogen di dalam tanah, yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Berikut ini adalah beberapa contoh mikroorganisme yang berperan dalam siklus nitrogen :

- a) Nitrosomonas : Bakteri ini mengoksidasi amonia menjadi nitrit.
- b) Nitrobacter : Bakteri ini mengoksidasi nitrit menjadi nitrat.
- c) Anabaena: Sianobakteri berfilamen ini mampu memfiksasi nitrogen atmosfer ke dalam bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman.
- d) Rhizobia: Kelompok bakteri ini mampu membentuk hubungan simbiosis dengan akar tanaman tertentu, menyediakan nitrogen tetap untuk ditukar dengan senyawa karbon.
- e) Azotobacter: Bakteri ini mampu memfiksasi nitrogen di atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman.

11.2.1.2 Peranan Mikroorganisme dalam Penguraian

Peran penting lainnya dari mikroorganisme dalam ekosistem adalah dalam proses penguraian. Pengurai, seperti jamur dan bakteri, menguraikan bahan organik mati, seperti daun

dan hewan mati, dan mendaur ulang unsur hara kembali ke dalam tanah. Hal ini membantu menjaga kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan kehidupan tanaman baru. Proses ini juga berperan dalam mengendalikan tingkat karbon dioksida di atmosfer, yang penting untuk menjaga keseimbangan iklim Bumi. Berikut adalah tahapan proses penguraian yang dilakukan oleh mikroorganisme :

a) Penguraian Awal:

Tahapan ini dimulai ketika bahan organik seperti bahan tanaman atau kotoran hewan mulai terurai, bahan tersebut diserang oleh berbagai mikroorganisme termasuk jamur, bakteri, dan protozoa. Mikroorganisme selanjutnya memecah senyawa organik yang kompleks menjadi molekul yang lebih kecil.

b) Pembusukan:

Ketika bahan organik terurai, nutrisi yang larut dalam air akan tercuci ke tanah di sekitarnya, di mana mereka akan diambil oleh tanaman dan organisme lainnya.

c) Penguraian Selulosa dan Lignin:

Jamur memainkan peran penting dalam mengurai serat selulosa dan lignin yang kuat yang ditemukan dalam bahan tanaman, sehingga memungkinkan mikroorganisme lain untuk mengakses nutrisi yang terkunci di dalamnya.

d) Penguraian Lebih Lanjut :

Bakteri dan mikroorganisme lainnya terus mengurai bahan organik yang tersisa, melepaskan lebih banyak nutrisi ke dalam tanah.

e) Penguraian akhir/ Siklus unsur hara:

Ketika penguraian berlanjut, unsur hara diubah menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman dan organisme lain, dan dengan demikian siklus kembali ke tahapan awalnya.

Dengan cara ini, mikroorganisme memainkan peran penting dalam proses penguraian, mengurai bahan organik, melepaskan unsur hara, dan mendaur ulangnya kembali ke dalam ekosistem, sehingga dapat digunakan seterusnya. Berikut adalah beberapa

contoh spesies mikroorganisme yang berperan dalam penguraian :

a) Bakteri :

Spesies seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Streptomyces* memainkan peran penting dalam mengurai senyawa organik yang kompleks.

b) Jamur :

Spesies seperti *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Rhizopus* berperan penting dalam mengurai serat selulosa dan lignin dalam bahan tanaman.

c) Protozoa :

Spesies seperti *Amoeba* dan *Paramecium* memakan bakteri dan mikroorganisme lainnya, berperan dalam mengendalikan populasi mereka dan membantu mengatur proses penguraian.

d) Nematoda :

Makhluk kecil seperti cacing ini memakan jamur, bakteri, dan mikroorganisme lainnya, membantu mengatur populasi mereka dan mengendalikan proses dekomposisi

11.2.1.3 Peranan Mikroorganisme dalam Proses Fotosintesis

Bakteri fotosintetik bertanggung jawab untuk memproduksi oksigen melalui fotosintesis. Proses ini sangat penting bagi kehidupan di Bumi, karena menyediakan oksigen yang kita hirup. Bakteri fotosintetik juga memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan karbon dioksida dan oksigen di atmosfer. Dengan menyerap karbon dioksida dan memproduksi oksigen, mereka membantu mengatur iklim Bumi. Berikut ini adalah penjelasan langkah demi langkah mengenai bagaimana mikroorganisme berperan dalam fotosintesis :

a) Penyerapan energi cahaya:

Mikroorganisme yang berfotosintesis, seperti alga dan cyanobacteria, menyerap energi cahaya dari matahari dengan menggunakan molekul pigmen yang disebut klorofil.

b) Konversi energi cahaya menjadi energi kimia:

Energi cahaya yang diserap digunakan untuk mendorong perpindahan elektron dari molekul air ke karbon dioksida,

menghasilkan oksigen dan senyawa organik berenergi tinggi, seperti glukosa.

c) Penyimpanan energi :

Senyawa organik berenergi tinggi yang dihasilkan oleh fotosintesis disimpan dalam sel mikroorganisme untuk kemudian digunakan sebagai sumber energi.

d) Pelepasan oksigen :

Selama fotosintesis, kelebihan oksigen yang dihasilkan oleh transfer elektron dari air ke karbon dioksida dilepaskan ke atmosfer.

e) Pembentukan jaring-jaring makanan :

Mikroorganisme fotosintesis berfungsi sebagai produsen utama di banyak ekosistem akuatik dan terestrial, memberikan fondasi bagi seluruh jaring makanan dengan berfungsi sebagai titik awal untuk transfer energi dan materi ke atas rantai makanan.

Rincian proses yang tepat dapat bervariasi tergantung pada jenis mikroorganisme, kondisi lingkungan, dan faktor lainnya. Berikut beberapa contoh mikroorganisme yang berperan dalam fotosintesis karena mampu menghasilkan makanan mereka sendiri melalui fotosintesis dengan menangkap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia :

a) Cyanobacteria : *Nostoc*, *Anabaena*, *Oscillatoria*

b) Alga : *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella salina*

c) Bakteri fotosintetik : *Rhodospseudomonas palustris*,
Chloroflexus aurantiacus, *Heliobacterium modesticaldum*

d) Bakteri belerang hijau : *Chlorobium tepidum*, *Chlorobium limicola*, *Chlorobium chlorochromatii*

e) Bakteri hijau non-sulfur : *Chloroflexus*, *Prochlorococcus*,
Blastochloris.

11.2.1.4 Mikroorganisme sebagai Probiotik

Probiotik adalah mikroorganisme bermanfaat yang hidup di dalam usus dan membantu menjaga kesehatan sistem pencernaan. Mereka dapat membantu mencegah infeksi dan meningkatkan kesehatan usus. Probiotik telah menjadi semakin

populer dalam beberapa tahun terakhir, dan penelitian telah menunjukkan bahwa probiotik dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap kesehatan manusia. Berikut adalah beberapa contoh mikroorganisme yang berperan dalam probiotik :

- a) *Lactobacillus* sp. : Genus bakteri ini biasanya digunakan dalam produk susu fermentasi seperti yogurt dan kefir, dan dikenal untuk mendukung kesehatan usus.
- b) *Bifidobacterium* sp. : Genus bakteri lain yang umum digunakan dalam probiotik, *Bifidobacterium* ditemukan dalam produk susu fermentasi dan dikenal karena kemampuannya untuk meningkatkan kesehatan usus dan meningkatkan sistem kekebalan tubuh.
- c) *Saccharomyces boulardii* : Ragi ini sering digunakan dalam suplemen makanan sebagai probiotik dan dikenal karena kemampuannya untuk mengobati diare dan masalah pencernaan lainnya.
- d) *Streptococcus thermophilus* : Bakteri ini biasanya digunakan dalam produksi yogurt dan dikenal karena kemampuannya untuk mendukung kesehatan usus dan meningkatkan pencernaan laktosa.
- e) *Escherichia coli* (Nissle 1917) : Jenis *E.coli* ini sering digunakan sebagai probiotik dan dikenal karena kemampuannya untuk meningkatkan kesehatan usus dan mencegah diare.

11.2.2 Interaksi Mikroorganisme dengan Aktivitas Manusia

Interaksi mikroorganisme dengan manusia tidak selalu membawa hasil yang positif bagi kedua pihak. Mikroorganisme sering kali menjadi pihak yang terdampak akibat aktivitas manusia yang berlebihan. Berbagai aktivitas manusia berdampak pada keanekaragaman mikroorganisme, yang menyebabkan hilangnya spesies dan mengubah keseimbangan ekosistem. Hal ini mengakibatkan berkurangnya ketahanan terhadap stres dan menurunnya kemampuan untuk menyediakan kemampuan yang penting, seperti penguraian dan siklus nutrisi. Adanya penggunaan pestisida yang berlebihan misalnya, telah

mengganggu ekosistem yang alami. Hal tersebut menyebabkan perubahan keseimbangan mikroorganisme dan interaksi yang diperoleh dari dampak tersebut.

Salah satu dampak yang paling menonjol dari aktivitas manusia terhadap mikroorganisme adalah berkembangnya bakteri yang kebal terhadap antibiotik, yang merupakan ancaman serius bagi kesehatan masyarakat. Penggunaan antibiotik yang berlebihan telah menyebabkan evolusi bakteri yang kebal terhadap obat-obatan ini, dan hal ini telah menjadi tantangan besar bagi para profesional medis dan organisasi kesehatan masyarakat.

Untuk memahami sepenuhnya dampak manusia terhadap mikroorganisme, perlu untuk mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk pertumbuhan populasi, perkembangan ekonomi, dan kemajuan teknologi. Faktor-faktor ini telah berkontribusi pada meluasnya penggunaan bahan kimia dan sumber daya lainnya, yang pada gilirannya menyebabkan pelepasan polutan ke lingkungan, mengganggu ekosistem, dan mengubah hubungan antara mikroorganisme dan lingkungannya.

11.3 Aktivitas Manusia dan Dampaknya Terhadap Mikroorganisme

Aktivitas manusia memiliki dampak yang besar terhadap alam, termasuk sistem mikroorganisme yang kompleks dan rumit yang membantu menopang kehidupan di Bumi. Mulai dari penggunaan pestisida dan bahan kimia hingga perubahan tata guna lahan, aktivitas manusia telah mengganggu ekosistem alami, yang menyebabkan perubahan keseimbangan mikroorganisme yang selanjutnya akan memberikan perubahan terhadap kemampuan mikroorganisme tersebut. Beberapa aktivitas manusia yang dapat memberikan dampak langsung maupun tidak langsung terhadap mikroorganisme diuraikan secara singkat dibawah ini.

11.3.1 Penggundulan Hutan / Deforestasi

Deforestasi adalah aktivitas manusia yang memiliki dampak signifikan terhadap mikroorganisme dan lingkungan secara keseluruhan. Deforestasi didefinisikan pula sebagai kegiatan penghancuran hutan dan area berhutan lainnya, yang mengakibatkan hilangnya habitat dan berkurangnya keanekaragaman hayati. Hal ini dapat berdampak signifikan terhadap populasi mikroorganisme yang hidup di dalam ekosistem tersebut. Penebangan hutan yang terjadi dalam skala besar telah terjadi selama berabad-abad yang digunakan dengan tujuan untuk membuka lahan untuk pertanian, pembangunan perkotaan, dan tujuan lainnya. Penebangan hutan dapat menyebabkan perubahan signifikan pada ekosistem setempat, termasuk perubahan keseimbangan mikroorganisme.

Dalam ekosistem hutan yang sehat, mikroorganisme berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan. Sebagai contoh, jamur dan bakteri menguraikan materi tanaman yang mati dan mendaur ulang nutrisi kembali ke dalam tanah. Proses ini membantu menjaga kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman baru. Namun, ketika hutan ditebang, keseimbangan yang rumit ini terganggu, yang menyebabkan perubahan komposisi dan kelimpahan mikroorganisme di dalam tanah. Deforestasi dapat berdampak signifikan pada mikroorganisme dalam beberapa cara, yang memengaruhi kelimpahan dan keanekaragaman mikroorganisme di daerah yang terkena dampak. Beberapa contoh mikroorganisme yang dapat terdampak oleh deforestasi antara lain:

- a) Mikroba tanah. Deforestasi dapat menyebabkan perubahan struktur tanah dan kimia tanah, yang dapat mengubah populasi mikroba tanah dan jenis mikroorganisme yang ada. Hal ini dapat memengaruhi fungsi ekosistem tanah secara keseluruhan, termasuk siklus nutrisi dan proses penguraian.
- b) Jamur. Deforestasi dapat menyebabkan perubahan kelimpahan dan distribusi jamur di daerah yang terkena dampak, termasuk pengurai dan patogen tanaman. Hal ini

dapat mempengaruhi kesehatan ekosistem secara keseluruhan, termasuk pertumbuhan tanaman dan keberhasilan pertumbuhan kembali setelah deforestasi.

- c) Bakteri. Deforestasi dapat mengubah populasi bakteri di daerah yang terkena dampak, termasuk bakteri patogen dan bakteri yang menguntungkan. Hal ini dapat memengaruhi kesehatan organisme lain dalam ekosistem, serta fungsi ekosistem secara keseluruhan, termasuk siklus nutrisi dan proses penguraian.
- d) Protozoa. Deforestasi juga dapat berdampak pada populasi protozoa, yang memainkan peran penting dalam rantai makanan di dalam tanah dan membantu mengendalikan populasi mikroorganisme lain di dalam ekosistem.

11.3.2 Polusi

Polusi adalah salah satu dampak utama dari aktivitas manusia terhadap lingkungan, dan memiliki efek yang luas pada keseimbangan mikroorganisme dalam ekosistem kita. Polusi yang terjadi kemudian dapat mengganggu tatanan alam dan menyebabkan perubahan besar dalam populasi mikroorganisme yang hidup di lingkungan sekitar kita. Misalnya, sampah-sampah plastik yang dibuang di laut dan bahan kimia yang mencemari pasokan air minum, yang dapat membuat membuat keseimbangan mikroorganisme dalam ekosistem kita menjdai terancam. Bahan kimia dan polutan yang dilepaskan ke lingkungan dapat memiliki efek toksik pada mikroorganisme, mengurangi populasi mikroorganisme tersebut dan mengubah kemampuannya untuk menjalankan fungsi-fungsi penting. Sebagai contoh, polutan seperti logam berat dan pestisida dapat membunuh mikroorganisme yang bermanfaat, seperti mikroorganisme yang bertanggung jawab untuk mengurai polutan di dalam tanah. Hal ini dapat mengakibatkan penumpukan polutan di lingkungan, yang menyebabkan kerusakan lebih lanjut pada spesies dan ekosistem lainnya.

Dampak lain dari polusi terhadap mikroorganisme adalah dapat mengubah susunan genetik populasi. Bahan kimia dan polutan dapat menyebabkan mutasi pada DNA mikroorganisme, yang mengarah pada terciptanya jenis baru yang mungkin lebih tahan terhadap tekanan lingkungan. Hal ini dapat berdampak luas pada keseimbangan ekosistem, karena strain baru ini dapat mengungguli mikroorganisme lain dalam memperebutkan sumber daya dan berpotensi mengganggu keseimbangan lingkungan.

Efek polusi pada mikroorganisme juga dapat berdampak secara tidak langsung pada kesehatan manusia. Sebagai contoh, berkurangnya populasi mikroorganisme tertentu dapat menyebabkan penyebaran penyakit, karena bakteri dan virus yang mereka bantu kendalikan tidak lagi terkendali. Selain itu, polutan dapat masuk ke dalam rantai makanan kita, yang memengaruhi kesehatan manusia dan hewan yang menjadi sumber makanan kita. Beberapa contoh dari dampak ini meliputi :

- a) Tumpahan minyak. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam mengurai minyak di lautan, tetapi prosesnya lambat dan minyak dapat menimbulkan efek toksik pada mikroorganisme yang terlibat dalam proses penguraian. Hal ini dapat menyebabkan penurunan populasi mereka, yang pada gilirannya dapat memengaruhi rantai makanan dan ekosistem.
- b) Polusi kimia. Bahan kimia dari polutan seperti pestisida, logam berat, dan plastik dapat menjadi racun bagi mikroorganisme, mengubah keseimbangan komunitas mikroba dan berpotensi mengurangi kemampuannya untuk menjalankan fungsi ekologis yang penting.
- c) Polusi air. Mikroorganisme yang hidup di dalam air dapat terpengaruh oleh polutan seperti limbah, limpasan pertanian, dan limbah industri. Polutan ini dapat mengubah kimiawi air, mengurangi kualitas habitat mikroorganisme air dan berpotensi mengurangi populasi mikroorganisme yang menguntungkan.

Beberapa dampak polusi pada mikroorganisme dapat memiliki konsekuensi yang luas terhadap lingkungan, termasuk penurunan keanekaragaman hayati dan perubahan pada jaring makanan dan proses ekosistem. Ada berbagai spesies mikroorganisme yang berperan dalam dampak aktivitas manusia, khususnya polusi. Beberapa contohnya antara lain:

- a) *Pseudomonas aeruginosa*. Jenis bakteri yang biasa ditemukan di air dan tanah yang tercemar, dan diketahui berkontribusi pada degradasi polutan minyak bumi.
- b) *Deinococcus radiodurans*. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk menahan polutan tingkat tinggi, termasuk radiasi dan logam berat, dan telah digunakan dalam proses bioremediasi untuk membersihkan lokasi yang terkontaminasi.
- d) *Bacillus subtilis*. Bakteri ini digunakan dalam proses bioremediasi untuk mengurai bahan kimia beracun seperti benzena dan toluena, yang umumnya ditemukan dalam air tanah yang terkontaminasi.
- e) *Alcaligenes sp.* Bakteri ini dikenal mampu mendegradasi berbagai polutan, termasuk hidrokarbon alifatik dan aromatik, dan digunakan dalam proses bioremediasi untuk membersihkan tumpahan minyak.

11.3.3 Perubahan Iklim

Perubahan iklim adalah isu utama saat ini, dan dampaknya terasa di seluruh planet ini, termasuk di dunia mikroorganisme. Dalam beberapa dekade terakhir, suhu bumi telah meningkat karena meningkatnya emisi gas rumah kaca, terutama disebabkan oleh karbon dioksida yang dilepas secara simultan ke atmosfer. Hal ini telah menyebabkan pergeseran yang signifikan pada kondisi banyak ekosistem, yang mengarah pada perubahan distribusi, kelimpahan, dan keanekaragaman mikroorganisme.

Perlu kita ingat kembali bahwa, penting untuk memahami tentang mikroorganisme yang memiliki peranan penting dalam menjaga keseimbangan sistem alami di Bumi. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam proses-proses seperti siklus

nutrisi, penguraian bahan organik, dan menjaga kesuburan tanah. Perubahan iklim dapat berdampak pada proses-proses ini, yang mengarah ke berbagai konsekuensi bagi mikroorganisme dan ekosistem yang lebih luas.

Salah satu dampak perubahan iklim yang paling menonjol terhadap mikroorganisme adalah perubahan suhu dan pola curah hujan. Banyak mikroorganisme memiliki persyaratan suhu dan kelembapan yang spesifik untuk pertumbuhannya, dan perubahan kondisi ini dapat memengaruhi distribusi, kelimpahan, dan kelangsungan hidupnya. Sebagai contoh, ketika suhu meningkat, beberapa mikroorganisme yang beradaptasi dengan suhu dingin dapat punah, sementara spesies lain yang lebih termofilik dapat berkembang biak. Misalnya, beberapa spesies bakteri dan arkea dapat tumbuh subur di lingkungan yang sangat panas, seperti ventilasi panas bumi di lautan. Ketika suhu terus meningkat karena perubahan iklim, mikroorganisme termofilik ini dapat menjadi lebih dominan, yang berpotensi mengubah komposisi dan fungsi ekosistem.

Dampak lain dari perubahan iklim terhadap mikroorganisme adalah perubahan ketersediaan air dan nutrisi. Perubahan pola curah hujan dapat mengubah waktu dan jumlah air yang tersedia bagi mikroorganisme, yang berdampak pada pertumbuhan dan aktivitas mereka. Perubahan iklim juga dapat berdampak pada interaksi antara mikroorganisme dan organisme inangnya. Sebagai contoh, perubahan suhu dan kondisi kelembapan dapat mengubah waktu interaksi inang-mikroba, seperti waktu berbunga dan berbuahnya tanaman, yang pada gilirannya dapat berdampak pada perilaku dan distribusi penyerbuk dan serangga lainnya.

Penting untuk memahami peran mikroorganisme di lingkungan dan bagaimana aktivitas manusia dapat memengaruhi populasi dan distribusinya, karena

mikroorganisme memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem bumi dan melakukan proses penting seperti penguraian, siklus nitrogen, dan pembentukan tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, Y., & Li, Y. (2017) '*Microorganisms in polluted environments: interactions and implications for bioremediation*', *Frontiers in Microbiology*, 8, 2221.
- Huang, Y., & Lee, D. J. (2017) '*Microbial communities in response to environmental stressors: from adaptation to evolution*', *Environmental Microbiology*, 19(5), 1406-1419.
- Jain, R., & Trevors, J. T. (2010) '*Microorganisms and environmental pollution*', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(1), 1-10.
- Kim, H. K., & Kim, Y. S. (2017) '*Microorganisms and environmental issues*', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(1), 15-25.
- Lu, X., Ma, J., & He, Z. (2015) '*Microbial degradation and bioremediation of emerging environmental pollutants*,' *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(12), 4963-4976.
- Mitchell, R., & Gu, J. D. (Eds.) (2010) *Environmental Microbiology: Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Oliveira, H. B., Rocha, E., Teles, T., & Florentino, L. A. (2022). '*Microbial Activity in the Agricultural and Forestry System*', *Research, Society and Development*, 11(2), e56211226184. doi: 10.33448/rsd-v11i2.26184
- Shukla, M., & Verma, V. (2018) '*Microbial bioremediation: current status and future perspectives*', *Frontiers in Microbiology*, 9, 575.
- Wang, L., He, J., & Fang, H. (2020) '*Microbial responses to environmental pollutants: mechanisms and applications in bioremediation*', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(4), 1249-1258.

BIODATA PENULIS



Muhammad Faizal Fathurrohman, S.Pd., M.Si

Dosen Pendidikan Biologi Universitas Sali Al-Aitaam

Penulis lahir di Bandung, 26 Maret 1993. Penulis sudah menikah dan memiliki istri bernama Adhitya Eka Praja serta telah dikaruniai seorang anak laki-laki bernama Delfandria Al Fatih. Penulis telah menyelesaikan studi S1 di Prodi Pendidikan Biologi Universitas Pasundan pada tahun 2015. Penulis melanjutkan studi S2 di Universitas Padjadjaran di Program Studi Magister Biologi dan lulus pada tahun 2018. Penulis adalah seorang dosen tetap di Program Studi Pendidikan Biologi Universitas Sali Al-Aitaam dan merangkap sebagai tenaga Guru honorer IPA di SMP Darul Falah Kabupaten Bandung Barat. Saat ini penulis aktif sebagai seorang pendidik, penulis jurnal penelitian bersama praktisi lain dan penulis artikel di Kompasiana. Sejak tahun 2018 penulis sudah melakukan publikasi ilmiah sebanyak 14 jurnal dan 3 buah buku chapter.

BIODATA PENULIS



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

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

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 23 Maret 1973. Saat ini penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kebidanan, Institut Kesehatan dan Bisnis Kurnia Jaya Persada di Kota Palopo. Menyelesaikan Gelar Sarjana Biologi pada Program Studi Biologi Universitas Hasanuddin tahun 1997 dan memperoleh gelar Magister pada Program Studi Biomedik, Konsentrasi Mikrobiologi Universitas Hasanuddin tahun 2009. Penulis menekuni bidang Biologi dan Mikrobiologi. Sebelumnya, penulis adalah dosen pada Prodi Farmasi, Universitas Indonesia Timur mengampuh matakuliah Biologi Sel, Anatomi dan Fisiologi Tumbuhan, Mikrobiologi Farmasi, dan Mikrobiologi Farmasi Terapan. Penulis juga mengampuh matakuliah Mikrobiologi, Bakteriologi, Mikologi, dan Parasitologi pada Prodi D3 Analisis Kesehatan Universitas Indonesia Timur. Penulis juga telah menghasilkan *Book Chapter* dengan judul: 1) Biologi Lingkungan, dan 2) Hygiene Sanitasi Makanan dan Minuman.

BIODATA PENULIS



Mujahidah Basarang, S.Si., M.Kes.

Dosen Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Media
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Enrekang tahun 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi dan melanjutkan S2 pada Program Studi Biomedik Konsentrasi Mikrobiologi. Penulis mengampu mata kuliah Bakteriologi 1, Media dan Reagensia, Virologi, Sitohistoteknologi dan Kewirausahaan. Penulis menjadi kontributor pada antologi berjudul Daring oh Daring di tahun 2021.

BIODATA PENULIS



Andi Fatmawati, S.Si., M.Kes.

Dosen Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Makassar, 09 Oktober 1977. Penulis adalah dosen tetap Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis, Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi FMIPA UNHAS dan melanjutkan S2 pada Program Studi Biomedik Konsentrasi Mikrobiologi.

BIODATA PENULIS



**Dodi Satriawan, S.T., M.Eng., CPHCEP., CPMP., CPRW., CBOA.,
CNPHRP., CLMA., NNLP.**

Staf Dosen Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan,
Politeknik Negeri Cilacap

Penulis lahir di Bengkulu tanggal 07 Mei 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D-IV Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia, Magister Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang bioproses, bioenergi, dan pengolahan air limbah.

BIODATA PENULIS



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

Pendidikan Biologi FKIP Universitas PGRI Mahadewa Indonesia

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

Fungsional di UPMI serta beberapa jabatan organisasi di luar kampus. Penulis pernah memenangkan beberapa kali hibah penelitian dan pengabdian dari Perguruan Tinggi, Pemda dan Kementerian, termasuk hibah dari BRIN tahun 2020. Penulis hingga kini mengajar di Prodi Pendidikan Biologi FKIP Universitas PGRI Mahadewa Indonesia, di Denpasar-Bali. Penulis fokus dalam riset dan menulis artikel ilmiah, Modul/Diklat mengajar serta beberapa produk Pupuk Organik, Pestisida Organik dan pengelolaan Sumber Daya Hayati (SDH) termasuk produk Hasil Fermentasi, serta menjadi Asesor Nasional BKD. Penulis juga menghasilkan buku ber ISBN berjudul: “Pertanian Berkelanjutan, Sebuah Pendekatan Konsep dan Praktis”, ISBN: 978-623-7559-45-0 terbit Juli 2020 (<https://drive.google.com/file/d/13MOryloskcY-b-W8ZhMX3X1zSunsJPDX/view?usp=sharing>).

Penulis Buku: “Manisnya Brotowali (*Tinospora crispa* L. Mier) sebagai Fitofarmasida”.

ISBN: 978-623-6259-74-0 terbit: Juli 2021.

(https://drive.google.com/folderview?id=14LFZTSDwsgqORvHx0phf_Z6NFo6TUBz-)

Penulis Buku: STROBERI SEHAT “PETIK LANGSUNG” *Trend AGROWISATA*. ISBN 978-623-198-089-2 terbit: Februari 2023

(https://drive.google.com/file/d/1d_3AlBy9CdPPql8qxfhjEddbZVeNInzd/view?usp=sharing)

Penulis Buku: BIOLOGI DASAR untuk Perguruan Tinggi. ISBN: 978-623-8051-54-0

terbit: Nopember 2022

(https://drive.google.com/file/d/1XtpXSWLFe2JTV2vIYk-9zGANEQVQuJFU/view?usp=share_link)

Penulis Buku: “Pertanian Organik” ISBN 978-623-8102-10-5 terbit: Desember 2022

(<https://drive.google.com/file/d/1dyDgvGjAEPfoVltuIDkj4de1DIE-fenq/view?usp=sharing>)

Penulis Buku: :PERLINDUNGAN TANAMAN” ISBN: 978-623-198-115-8 terbit: Maret 2023

(<https://drive.google.com/file/d/1dkrhJh6WyrDkPqSw6fT8bO7mE0eDjWJU/view?usp=sharing>)

BIODATA PENULIS



Ni'matul Murtafi'ah, S.Pd., M.Sc.

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medik
Fakultas Kesehatan Institut Kesehatan Rajawali

Penulis lahir di Surakarta tanggal 26 Desember 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Laboratorium Medik Fakultas kesehatan Institut Kesehatan Rajawali Bandung. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Pendidikan Biologi di Universitas Sebelas Maret dan melanjutkan S2 pada Jurusan Biologi di Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang Menulis dibidang Pendidikan dan Mikrobiologi khususnya bakteri, jamur, virus dan parasit.

BIODATA PENULIS



Dr. Waode Rustiah, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Pangkep pada tanggal 30 Januari 1979. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Laboratorium Medis, Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2002 pada Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin, dan melanjutkan S2 pada tahun 2005 di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada bidang konsentrasi Kimia Analitik. Pada tahun 2019 telah menyelesaikan pendidikan S3 pada Program Doktor Ilmu Kimia di Universitas Hasanuddin.

BIODATA PENULIS



Nur Anny Suryaningsih Taufieq, S.P., M.Si., Ph.D.

Dosen Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan
Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar

Penulis lahir di Ujung Pandang, 26 Juni 1969. Penulis adalah dosen tetap pada Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin tahun 1993, menyelesaikan S2 pada Program Studi Pengelolaan Lingkungan Hidup Kekhususan Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin tahun 2002 dan meraih gelar Doctor of Philosophy dari School of Environmental and Natural Resource Sciences, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia tahun 2015. Penulis menekuni bidang bioremediasi lingkungan dan pemanfaatan limbah pertanian sebagai *green material* yang *eco-friendly*. Mata kuliah yang diampu adalah Ilmu Ukur Tanah dan Pemetaan, Pengantar Ilmu Lingkungan, Bahasa Inggris, Metode Penelitian dan Statistika.

BIODATA PENULIS



Dr. Rahmawati, S. Si, M. Kes.

Dosen Tetap Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis (TLM)
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Desa Kasiwang Kecamatan Suli Kabupaten Luwu pada tanggal 12 April 1980, merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Abd. Muis dan Rapidah Hasan. Penulis adalah dosen tetap yayasan pada Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis (TLM) Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 20 Cimpu Kecamatan Suli Kabupaten Luwu pada tahun 1992. Pada tahun 1995 telah menyelesaikan pendidikan sekolah menengah pertama pada SMP Negeri 2 Kabupaten Takalar. Kemudian pada tahun 1998 menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas pada Sekolah Menengah Farmasi (SMF) Depkes Ujungpandang, Makassar.

Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin pada tahun 2003. Pada tahun 2004 melanjutkan S2 pada Jurusan Kesehatan Lingkungan Fakultas Kesehatan Masyarakat (FKM) Universitas Hasanuddin dan berhasil menyelesaikan studi pada tahun 2006. Kemudian pada tahun 2013 melanjutkan S3 pada jurusan Ilmu Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin dan berhasil meraih gelar Doktor pada tahun 2018. Penulis menekuni bidang ilmu kimia analitik dan biokimia serta toksikologi klinik.

BIODATA PENULIS



Ahmad Zil Fauzi, S.Si.,M.Kes.

Dosen Politeknik Kesehatan Kementerian Kendari

Penulis lahir di Makassar tanggal 29 Oktober 1985. Meraih gelar Magister Kesehatan dari Sekolah Pasca Sarjana Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin pada tahun 2017. Selain menyukai karya karya Pram, Pamuk dan Coelho, serta bertindak sebagai produser pada film dokumenter yang diproduksi oleh Rumah IDE *Production House* di Makassar, penulis juga menikmati kegiatan kepenacintaan (gunung dan laut dalam). Sejak tahun 2018-sekarang, penulis menjadi dosen tetap di Politeknik Kesehatan Kementerian Kendari.