



FUTURE SCIENCE

# BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN

Editor : Eka Imbia Agus Diartika, S.Pd., M.Pd.

Syarif Irwan Nurdiansyah, Hamzah Fansuri, Said Ali Akbar, Hasrianti,  
Aris Sunandar, Rina Ningtyas, Nabila Swarna Puspa Hermana,  
Dyah Setyaningrum, Suci Lestari, Pramesti Dewi, Loso Judijanto,  
Annisa Yuliana Angeline

Bunga Rampai

# **Bioteknologi Lingkungan**

## **UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta**

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# Bioteknologi Lingkungan

Penulis :

Syarif Irwan Nurdiansyah  
Hamzah Fansuri  
Said Ali Akbar  
Hasrianti  
Aris Sunandar  
Rina Ningtyas  
Nabila Swarna Puspa Hermana  
Dyah Setyaningrum  
Suci Lestari  
Pramesti Dewi  
Loso Judijanto  
Annisa Yuliana Angeline

Editor :

Eka Imbia Agus Diartika, S.Pd., M.Pd.



# BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN

Penulis:

Syarif Irwan Nurdiansyah  
Hamzah Fansuri  
Said Ali Akbar  
Hasrianti  
Aris Sunandar  
Rina Ningtyas  
Nabila Swarna Puspa Hermana  
Dyah Setyaningrum  
Suci Lestari  
Pramesti Dewi  
Loso Judijanto  
Annisa Yuliana Angeline

Editor: **Eka Imbia Agus Diartika, S.Pd., M.Pd.**

Desain Cover: **Nada Kurnia, S.I.Kom.**

Tata Letak: **Samuel, S.Kom.**

Halaman: **A5 Unesco (15,5 x 23 cm)**

Ukuran: **xiv, 227**

e-ISBN: **978-623-8665-69-3**

p-ISBN: **978-623-8665-70-9**

Terbit Pada: **Oktober 2024**

---

Hak Cipta 2024, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2024 by Future Science Publisher**

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT FUTURE SCIENCE  
(CV. FUTURE SCIENCE)**

Anggota IKAPI (348/JTI/2022)

Jl. Terusan Surabaya Gang 1 A No. 71 RT 002 RW 005, Kel. Sumbersari, Kec. Lowokwaru, Kota  
Malang, Provinsi Jawa Timur.  
[www.futuresciencepress.com](http://www.futuresciencepress.com)

## KATA PENGANTAR

Ucapan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa kami haturkan karena hanya dengan izin-Nya buku **Bioteknologi Lingkungan** ini dapat tersusun sebagaimana yang telah kami rencanakan. Penulisan buku ini sebagai ikhtiar untuk mengembangkan substansi keilmuan dalam bidang bioteknologi lingkungan.

Buku Bioteknologi Lingkungan merupakan kumpulan gagasan para penulis yang menawarkan solusi inovatif dalam menjawab berbagai permasalahan lingkungan saat ini. Terdapat dua belas (12) bab di dalam buku ini yang ditulis oleh para akademisi maupun praktisi di bidang bioteknologi lingkungan. Bab tersebut meliputi Prinsip Dasar Bioteknologi Lingkungan, Biogas: Teknologi Pengolahan Limbah Organik dan Energi Terbarukan, Aplikasi Fitoremediasi dalam Pengendalian Polusi Tanah dan Air, Bioteknologi Tanah dan Reklamasi Lahan Terdegradasi, Bioteknologi dalam Manajemen Sampah, Bioplastik dan Alternatif Ramah Lingkungan untuk Plastik Konvensional, Aplikasi Bioteknologi dalam Konservasi Sumber Daya Alam, Bioremediasi Air Limbah Industri: Kasus-kasus Studi, Inovasi Genetik untuk Meningkatkan Ketahanan Lingkungan, Bioteknologi dalam Pertanian Berkelanjutan, Etika dan Aspek Sosial dalam Pengembangan Bioteknologi Lingkungan, dan Masa Depan Bioteknologi Lingkungan.

Kami ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang turut berkontribusi atas terbitnya buku ini. Semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan keberkahan kepada kita semua.

Tulungagung, Oktober 2024

Editor

Eka Imbia Agus Diartika

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
<b>BAB 1 PRINSIP DASAR BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN .....</b>	<b>1</b>
Syarif Irwan Nurdiansyah .....	1
PENDAHULUAN .....	1
BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN .....	3
FUNGSI EKOLOGIS MIKROORGANISME.....	5
MATERI GENETIK.....	7
PROSES BOKIMIA DALAM TRANSFORMASI LINGKUNGAN.....	7
APLIKASI BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN .....	8
KESIMPULAN.....	17
<b>BAB 2 BIOGAS: TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH ORGANIK DAN ENERGI TERBARUKAN .....</b>	<b>23</b>
Hamzah Fansuri .....	23
PENDAHULUAN .....	23
PROSES PRODUKSI BIOGAS .....	25
ANAEROBIC DIGESTION (AD) (PENGURAIAN SECARA ANAEROBIK) .....	27
Hidrolisis (Hydrolysis).....	28
Asidogenesis (Acidogenesis) .....	29
Asetogenesis (Acetogenesis).....	31
Metanogenesis (Methanogenesis) .....	32
Keuntungan dan Kerugian Anaerobic Digestion (AD).....	33

	KESIMPULAN.....	35
BAB 3	APLIKASI FITOREMEDIASI DALAM PENGENDALIAN POLUSI TANAH DAN AIR .....	41
	Said Ali Akbar .....	41
	PENDAHULUAN .....	41
	PENGHILANGAN POLUTAN DARI AIR LIMBAH OLEH SPESIES TANAMAN.....	43
	APLIKASI FITOREMEDIASI DALAM PENGENDALIAN POLUSI TANAH.....	47
	Mekanisme Fitoremediasi .....	47
	Jenis Tanaman yang Digunakan.....	48
	Aplikasi dalam Pengendalian Polusi Tanah .....	48
	Tantangan dalam Fitoremediasi .....	49
	Prospek Masa Depan.....	50
	KESIMPULAN.....	51
BAB 4	BIOTEKNOLOGI TANAH DAN REKLAMASI LAHAN TERDEGRADASI.....	55
	Hasrianti.....	55
	PENDAHULUAN .....	55
	BIOTEKNOLOGI TANAH.....	57
	DEGRADASI LAHAN.....	60
	REKLAMASI LAHAN TERDEGRADASI .....	62
	PEMANFAATAN BIOTEKNOLOGI DALAM REKLAMASI LAHAN .....	65
	Fitoremediasi.....	66
	KESIMPULAN.....	68
BAB 5	BIOTEKNOLOGI DALAM MANAJEMEN SAMPAH ...	75

	Aris Sunandar .....	75
	PENDAHULUAN .....	75
	APLIKASI BIOTEKNOLOGI DALAM MANAJEMEN SAMPAH.....	77
	BIOREMEDIASI DAN BIODEGRADASI POLUTAN SINTETIS .....	77
	PEMANFAATAN BIOMASSA MIKROBA.....	80
	BIOREMING DAN BIOLEACHING .....	82
	TANTANGAN DAN PROSPEK MASA DEPAN .....	84
	KESIMPULAN.....	85
<b>BAB 6</b>	<b>BIOPLASTIK DAN ALTERNATIF RAMAH LINGKUNGAN UNTUK PLASTIK KONVENSIONAL.</b>	<b>93</b>
	Rina Ningtyas .....	93
	PENDAHULUAN .....	93
	BIOPLASTIK DAN JENISNYA.....	95
	Bioplastik yang berasal dari fosil, tetapi bersifat biodegradable.....	97
	Bioplastik berasal dari bahan alami atau bio (biobased) tetapi bersifat non-biodegradable .....	98
	Bioplastik berasal dari bahan alami atau bio (biobased) dan bersifat biodegradable .....	99
	MANFAAT DAN APLIKASI BIOPLASTIK .....	99
	HAMBATAN DAN TANTANGAN PENGGUNAAN BIOPLASTIK .....	102
	KESIMPULAN.....	105
<b>BAB 7</b>	<b>APLIKASI BIOTEKNOLOGI DALAM KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM.....</b>	<b>111</b>
	Nabila Swarna Puspa Hermana .....	111

	PENDAHULUAN .....	111
	KONSERVASI IN SITU .....	113
	KONSERVASI EX SITU .....	114
	KULTUR JARINGAN UNTUK KONSERVASI.....	115
	KRIOPRESERVASI.....	115
	MIKROPROPAGASI DAN KLONING.....	116
	EMBRIOGENESIS SOMATIK DAN ORGANOGENESIS .....	117
	KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM MELALUI BIOTEKNOLOGI PERTANIAN .....	118
	MARKER MOLEKULAR.....	120
	GENOMIK KONSERVASI.....	121
	METABARCODING.....	123
	KESIMPULAN .....	124
<b>BAB 8</b>	<b>BIOREMEDIASI AIR LIMBAH INDUSTRI: STUDI KASUS BERBAGAI MEKANISME BIOREMEDIASI .</b>	<b>127</b>
	Dyah Setyaningrum.....	127
	PENDAHULUAN .....	127
	Urgensi yang Mendasari Pembahasan .....	128
	Peran Berbagai Mikroba dalam Bioremediasi .....	129
	Metabolisme Mikroba Perombak .....	133
	Aplikasi Teknologi Bioremediasi.....	134
	Studi Kasus Mekanisme Bioremediasi Limbah Cair Industri.....	135
	KESIMPULAN DAN PERSPEKTIF KE DEPAN .....	138
<b>BAB 9</b>	<b>INOVASI GENETIK UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN LINGKUNGAN .....</b>	<b>145</b>

Suci Lestari .....	145
PENDAHULUAN .....	145
INOVASI GENETIK UNTUK KETAHANAN LINGKUNGAN.....	146
PERKEMBANGAN DAN POTENSI SISTEM CRISPR/Cas.....	149
Hubungan Sistem Pengeditan Genom dan CRISPR/Cas9	149
MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS TANAMAN DENGAN CRISPR/Cas9 .....	151
Karakterisasi Fungsional Gen .....	151
Piramida Gen .....	153
Domestikasi De novo .....	153
MENGATASI TEKANAN ABIOTIK.....	154
Kekeringan.....	154
Salinitas.....	155
Stres Panas .....	156
Halofit.....	157
RELEVANSI PERTANIAN .....	159
Spesies Biji Minyak .....	159
Spesies Biofuel .....	160
KESIMPULAN.....	161
<b>BAB 10 BIOTEKNOLOGI PADA PERTANIAN BERKELANJUTAN.....</b>	<b>167</b>
Pramesti Dewi.....	167
PENDAHULUAN .....	167
BIOTEKNOLOGI PADA TAHAP BUDIDAYA TANAMAN .....	171

	BIOTEKNOLOGI PADA PENGOLAHAN HASIL PANEN .....	177
	BIOTEKNOLOGI PADA PENANGANAN LIMBAH PERTANIAN .....	179
BAB 11	ETIKA DAN ASPEK SOSIAL DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN.....	187
	Loso Judijanto .....	187
	PENDAHULUAN .....	187
	ETIKA DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN ...	187
	Prinsip-Prinsip Etika dalam Bioteknologi .....	191
	Isu Etika Utama dalam Bioteknologi Lingkungan.....	192
	ASPEK SOSIAL DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN.....	194
	Pengaruh Bioteknologi Terhadap Masyarakat.....	194
	Penerimaan dan Persepsi Publik Terhadap Bioteknologi Lingkungan .....	195
	Keadilan Sosial dan Akses terhadap Teknologi .....	197
	Partisipasi Publik dalam Pengembangan Bioteknologi ....	199
	Bioteknologi dan Kearifan Lokal .....	200
	Tanggung Jawab Sosial Korporat (CSR) dalam Bioteknologi Lingkungan .....	202
	KESIMPULAN .....	204
BAB 12	MASA DEPAN BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN.....	211
	Annisa Yuliana Angeline .....	211
	PENDAHULUAN .....	211
	KASUS 1: PENGOLAHAN LIMBAH KURMA .....	213
	Kolaborasi Bioteknologi dengan Teknologi (Artificial Inteleigent dan Machine Learning).....	213

Potensi masa depan limbah kurma menjadi energi terbarukan .....	214
Potensi masa depan limbah kurma sebagai bahan bioplastik.....	215
<b>KASUS 2: APLIKASI CRISPR CAS DALAM GREEN BIOTECHNOLOGY .....</b>	<b>216</b>
CRISPR-Cas dalam keberlanjutan lingkungan.....	216
CRISPR-Cas dalam pemrosesan biofuel .....	217
CRISPR-Cas untuk Bioremediasi .....	218
<b>KASUS 3: DEGRADASI MIKROPLASTIK DI EKOSISTEM.....</b>	<b>220</b>
Masa depan pengelolaan mikroplastik .....	220
<b>KESIMPULAN.....</b>	<b>224</b>



# BAB 1

## PRINSIP DASAR BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN

Syarif Irwan Nurdiansyah  
Universitas Tanjungpura  
Email: syarifirwan@fmipa.untan.ac.id

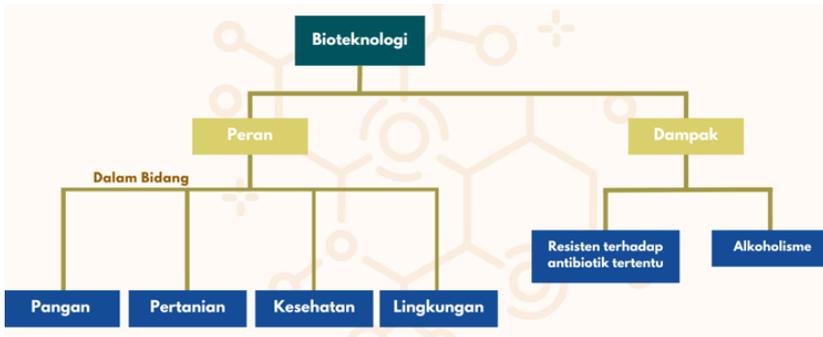
### PENDAHULUAN

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi sangat dipengaruhi oleh kemajuan bioteknologi, yang telah mengalami percepatan pesat selama dua dekade terakhir. Pertumbuhan ilmu bioteknologi yang luar biasa ini terdorong oleh semakin meningkatnya tuntutan hidup manusia dan kebutuhan untuk menghasilkan barang-barang yang dapat memenuhi kebutuhan tersebut. Di negara-negara maju, bioteknologi merupakan fokus utama, menerima dukungan sepenuhnya dari pemerintah untuk memenuhi kebutuhan manusia dan meningkatkan produksi industri. Sektor-sektor kunci dalam pengembangan bioteknologi meliputi produksi pangan, farmasi, pengelolaan limbah, dan rekayasa genetika (Pramashinta *et al.*, 2014). Tujuan pengembangan bioteknologi adalah untuk meningkatkan kesejahteraan dan kualitas hidup manusia.



Gambar 1.1. Dampak dan keterkaitan multidisipliner dalam bioteknologi

Bioteknologi melibatkan penggunaan sistem kehidupan dan organisme untuk mengembangkan produk baru, atau untuk memodifikasi produk atau proses yang sudah ada, dengan tujuan mencapai kualitas dan kuantitas keluaran yang lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat. Istilah *bioteknologi* berasal dari kata Yunani *bios* (kehidupan), *teuchos* (alat), dan *logos* (studi), yang jika diartikan lebih mendasar menunjukkan bioteknologi ini sebagai bidang ilmu yang berfokus pada pemanfaatan organisme hidup dan produknya untuk menghasilkan barang dan jasa. yang bermanfaat bagi umat manusia terutama dalam pemenuhan pangan dan kesehatan (Snehal & Dubey, 2019). Primrose (2001) mendefinisikan bioteknologi sebagai penerapan prinsip-prinsip biologi, biokimia, dan rekayasa dalam pengolahan bahan dan pemanfaatan organisme hidup serta komponennya untuk menghasilkan barang dan jasa yang bermanfaat. Menurut Kantor Bantuan Teknis (OTA) Amerika Serikat, bioteknologi adalah teknik yang menggunakan organisme hidup atau bagian organisme untuk membuat atau memodifikasi produk guna memperbaiki atau meningkatkan sifat-sifat tumbuhan atau hewan (Vaishnav & Demain, 2017). Federasi Bioteknologi Eropa menggambarkan bioteknologi sebagai integrasi ilmu alam dan teknik untuk meningkatkan penerapan organisme hidup, sel, atau bagiannya dalam memproduksi barang dan jasa. Definisi ini selanjutnya lebih berkembang sejak ditemukannya metode pembuatan DNA rekombinan dan fusi sel, yang mengarah pada proses bioteknologi modern. Organisasi untuk Kerja Sama dan Pembangunan Ekonomi (OECD) mendefinisikan bioteknologi sebagai penerapan pengetahuan ilmiah dan prinsip-prinsip teknik untuk menangani dan memproses bahan dengan menggunakan agen biologis, untuk menghasilkan barang dan jasa yang mendukung pertumbuhan ekonomi.



Gambar 1.2. Skema peran dan dampak bioteknologi

Bioteknologi lingkungan adalah salah satu bentuk penerapan bioteknologi yang banyak menggunakan mikroorganisme untuk meningkatkan kualitas lingkungan hidup manusia dan alam sekitarnya. Upaya peningkatan kualitas lingkungan ini meliputi pencegahan masuknya polutan agar lingkungan tetap bersih, membersihkan lingkungan yang sudah terkontaminasi, serta memanfaatkan sumber daya alam yang masih bernilai untuk meningkatkan kesejahteraan manusia. Bioteknologi lingkungan merupakan bidang yang menjanjikan dalam menganalisis dampak lingkungan untuk menjaga kelestarian lingkungan hidup, khususnya dalam era industrialisasi modern. Salah satu penerapan teknologi dalam bioteknologi lingkungan adalah melalui mikrobiologi, seperti pengolahan limbah hewan dan manusia, serta pencernaan anaerobik. Bioteknologi lingkungan juga berperan dalam menangani masalah lingkungan seperti detoksifikasi zat-zat kimia berbahaya.

## **BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN**

Lingkungan sangat penting bagi kehidupan manusia untuk mendukung keberlangsungan hidupnya. Keberlanjutan lingkungan fisik menunjukkan tingkat kesejahteraan masyarakatnya. Pembuangan zat berbahaya setiap hari, sebagai

limbah industri ataupun limbah rumah tangga, merupakan suatu tantangan besar yang harus diselesaikan. Cara terbaik untuk melestarikan lingkungan adalah dengan meminimalkan timbunan sampah dan menjaga keseimbangan harmonis antara estetika dan kesehatan. Aspek biologis dari kelestarian lingkungan dieksplorasi melalui tinjauan terhadap bioteknologi yang tersedia. Bioteknologi lingkungan memungkinkan kemajuan besar dalam teknologi remediasi yang akan membantu meminimalkan potensi pelepasan limbah dari fasilitas industri ataupun rumah tangga. Teknologi ini juga akan menghasilkan produk-produk yang bermanfaat dalam upaya pencegahan keluarnya limbah. Bioteknologi menawarkan potensi luar biasa untuk mengubah limbah dan polutan berbahaya menjadi produk sampingan yang berguna dengan menggunakan komunitas mikroba atau dengan membiarkan mikroba dan tanaman mendegradasi limbah tersebut menjadi metabolit yang tidak berbahaya.

Dengan cakupan multidisiplin yang luas seperti biologi, kimia, biokimia, biologi molekuler, genetika, imunologi, dan mikrobiologi, bioteknologi dibagi menjadi beberapa kategori kategori berdasarkan bidang aplikasi dan tujuan penggunaannya, antara lain bioteknologi merah, hijau, biru, serta putih/abu-abu. Bioteknologi merah berfokus pada aplikasi medis, termasuk pencegahan, diagnosis, dan pengobatan penyakit, bioteknologi hijau berkaitan dengan aplikasi pertanian dan peternakan sehingga sering disebut sebagai bioteknologi ramah lingkungan, bioteknologi biru berfokus pada lingkungan perairan, termasuk wilayah laut, dengan melibatkan penggunaan tanaman laut sebagai sumber energi dan biofuel, dan bioteknologi putih yang melibatkan aplikasi industri, memanfaatkan mikroorganisme atau enzim untuk menghasilkan berbagai produk seperti makanan, biomaterial, biopolimer, dan senyawa baru dalam skala industri. Bioteknologi lingkungan juga tergolong dalam

bioteknologi putih/abu-abu yang diaplikasikan untuk perlindungan lingkungan, pengelolaan limbah, dan perbaikan ekosistem yang terdegradasi, yang bertujuan untuk mengurangi polusi, memperbaiki kerusakan lingkungan, dan mengelola sumber daya alam secara berkelanjutan. Bioteknologi lingkungan melibatkan penggunaan proses biologis dan organisme untuk memecahkan masalah lingkungan dan meningkatkan kesehatan ekosistem. Ini adalah bidang multidisiplin yang menggabungkan prinsip-prinsip biologi, mikrobiologi, kimia, ekologi, dan teknik untuk mengatasi masalah seperti polusi, pengelolaan limbah, dan konservasi sumber daya. Beberapa prinsip dasar yang perlu dipahami dalam bioteknologi lingkungan adalah fungsi ekologis dari mikroorganisme, peran materi genetik, dan proses biokimia yang bertanggung jawab atas transformasi lingkungan.

## **FUNGSI EKOLOGIS MIKROORGANISME**

Mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga memainkan peran kunci dalam siklus biogeokimia, penguraian bahan organik, dan transformasi polutan. Pemahaman tentang berbagai jenis mikroorganisme dan karakteristik serta habitat tumbuh dan berkembangnya sangat penting untuk aplikasi bioteknologi lingkungan, karena menjadi dasar dalam perencanaan strategi dan teknik bioremediasi yang efektif. Mikroorganisme berinteraksi dengan organisme lain dalam ekosistem dan berkontribusi pada keseimbangan ekologi melalui siklus nutrisi, degradasi bahan organik, dan pemurnian air. Mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, menguraikan bahan organik seperti daun gugur, kayu mati, dan bangkai hewan menjadi senyawa yang lebih sederhana. Hasil degradasi bahan organik oleh mikroorganisme berkontribusi pada pembentukan humus yang memperkaya tanah dengan nutrisi penting. Mikroorganisme mengubah bahan organik menjadi

karbon dioksida melalui respirasi, yang kemudian dilepaskan ke atmosfer dan digunakan oleh tumbuhan dalam fotosintesis, sedangkan dalam kondisi anaerobik, beberapa mikroorganisme menghasilkan metana dari bahan organik. Beberapa spesies bakteri seperti *Rhizobium* dan *Cyanobacteria* mengubah nitrogen atmosfer menjadi amonia yang dapat digunakan oleh tumbuhan (siklus nitrogen). Beberapa bakteri memiliki peran mengubah amonia menjadi nitrat untuk dapat diserap kembali oleh tanaman (nitrifikasi), selain itu juga ada spesies bakteri yang berperan mengembalikan nitrogen ke atmosfer dengan mengubah nitrat menjadi gas nitrogen (denitrifikasi).

Mikroorganisme tertentu berperan untuk melepaskan fosfor dan sulfur dari bahan organik dan batuan, menjadikannya tersedia bagi tanaman.

Pada pembentukan struktur tanah, beberapa bakteri tanah menghasilkan exopolysaccharides yang membantu mengikat partikel tanah, membentuk agregat yang meningkatkan struktur tanah, sedangkan jenis jamur mikoriza akan membentuk jaringan dengan akar tanaman, meningkatkan penyerapan air dan nutrisi, serta memperbaiki struktur tanah. Aktivitas mikroorganisme dalam tanah membantu meningkatkan porositas dan aerasi tanah, yang mendukung pertumbuhan tanaman dan organisme tanah lainnya. Mikroorganisme juga digunakan sebagai pengendali polusi dan monitoring kesehatan ekosistem melalui mekanisme penguraian polutan organik dan anorganik di lingkungan, seperti minyak, pestisida, dan logam berat, serta membantu memulihkan ekosistem yang terkontaminasi dengan mempercepat penguraian polutan.

Mikroorganisme tanah dapat bersaing dengan patogen tanaman, mengurangi penyakit tanaman melalui kompetisi ruang dan nutrisi. Beberapa mikroorganisme menghasilkan senyawa antibiotik yang menghambat pertumbuhan patogen. Mikroorganisme antagonis dapat digunakan untuk

mengendalikan hama dan patogen tanaman, seperti *Bacillus thuringiensis* yang menghasilkan toksin untuk serangga.

## **MATERI GENETIK**

Materi genetik dalam bioteknologi lingkungan melibatkan penggunaan DNA, RNA, dan protein untuk mengembangkan dan memodifikasi organisme agar lebih efektif dalam menangani masalah lingkungan (Lanigan *et al.*, 2020). Dengan rekayasa genetik, metagenomik, dan pengembangan biosensor, ilmuwan dapat menciptakan solusi inovatif untuk membersihkan polusi, memantau kondisi lingkungan, dan mengelola limbah secara berkelanjutan. Aplikasi ini membantu mengurangi dampak negatif aktivitas manusia terhadap lingkungan dan mendukung keberlanjutan ekosistem.

Pemahaman tentang genom mikroorganisme akan membantu dalam mengidentifikasi gen yang bertanggung jawab atas degradasi polutan dan adaptasi terhadap lingkungan yang terkontaminasi, selanjutnya teknik rekayasa genetik digunakan untuk meningkatkan kemampuan mikroorganisme dalam menguraikan polutan secara spesifik atau bertahan/beradaptasi dalam kondisi lingkungan yang ekstrem. Penggunaan penanda genetik untuk melacak mikroorganisme di lingkungan dan memantau efektivitas proses bioremediasi, dan pemahaman tentang transfer gen horizontal antara mikroorganisme di lingkungan yang dapat berkontribusi pada penyebaran kemampuan degradasi polutan (genetik molekular).

## **PROSES BIOKIMIA DALAM TRANSFORMASI LINGKUNGAN**

Mikroorganisme menggunakan enzim untuk mengkatalisasi reaksi biokimia yang menguraikan polutan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya, untuk itu identifikasi jalur metabolisme yang digunakan mikroorganisme

untuk menguraikan berbagai polutan, seperti hidrokarbon, logam berat, dan senyawa organik beracun sangat menentukan teknik bioremediasi yang digunakan. Degradasi biologis adalah proses biodegradasi di mana polutan organik diuraikan menjadi senyawa sederhana seperti karbon dioksida, air, dan biomassa mikroba, sedangkan biotransformasi adalah proses kimiawi yang dilakukan oleh organisme hidup atau sistem biologis untuk mengubah senyawa kimia menjadi bentuk lain. dengan melibatkan enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme, tanaman, atau hewan untuk mengubah struktur kimia suatu zat, yang sering kali menghasilkan senyawa yang lebih sederhana, lebih mudah dikelola, dan lebih bermanfaat. Biotransformasi memiliki berbagai aplikasi dalam industri farmasi, lingkungan, dan bioteknologi.

Prinsip-prinsip inti dari bioteknologi lingkungan mencakup pemahaman mendalam tentang mikroorganisme dan fungsi ekosistemnya, peran materi genetik dalam kemampuan mikroorganisme untuk menguraikan polutan, dan proses biokimia yang memungkinkan transformasi dan degradasi bahan berbahaya menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Pemahaman ini memungkinkan pengembangan dan penerapan berbagai teknik bioteknologi untuk mengatasi tantangan lingkungan secara efektif dan berkelanjutan.

## **APLIKASI BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN**

Beberapa teknik dan aplikasi bioteknologi lingkungan dengan berbagai proses dan mekanisme di antaranya adalah sebagai berikut :

### **1. Biodegradasi**

Biodegradasi adalah proses alami di mana mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga memecah bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Proses ini terjadi di lingkungan tanpa campur tangan manusia dan

merupakan bagian integral dari siklus alami nutrisi (Turista, 2017). Biodegradasi berlangsung secara enzimatik, dimana mikroorganisme menghasilkan enzim yang memecah molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana yang bisa dimetabolisme. Produk akhir dari biodegradasi biasanya adalah karbon dioksida, air, biomassa mikroba, dan senyawa anorganik sederhana lainnya. Contoh proses biodegradasi adalah penguraian pada bahan organik seperti sisa makanan, daun, dan kotoran hewan oleh mikroorganisme di tanah (Ammar, 2022). Contoh lain adalah degradasi minyak bumi yang terjadi secara alami di lingkungan laut melalui aktivitas mikroorganisme.

Proses ini merupakan bagian alami dari siklus kehidupan di mana bahan organik dikembalikan ke lingkungan dalam bentuk yang dapat digunakan oleh organisme lain. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi laju dan efektivitas biodegradasi di antaranya adalah kemampuan mikroorganisme yang berbeda dalam menguraikan jenis bahan tertentu, sifat dari bahan yang diuraikan, misalnya bahan yang lebih kompleks secara kimiawi atau yang mengandung ikatan kimia akan cenderung lebih sulit dan memakan waktu lebih lama untuk diselesaikan. Suhu, pH, ketersediaan oksigen, dan kelembaban adalah beberapa faktor yang mempengaruhi aktivitas mikroorganisme. Mikroorganisme membutuhkan nutrisi, seperti nitrogen dan fosfor, untuk tumbuh dan berkembang biak, yang pada gilirannya meningkatkan aktivitas penguraian. Proses biodegradasi ini dapat berlangsung secara aerobik dan anaerobik (Mukhlis, 2014). Pada proses aerobik, degradasi berlangsung dengan adanya oksigen yang selanjutnya mikroorganisme akan menguraikan bahan organik menjadi karbon dioksida, udara, dan energi. Pada proses secara anaerobik, berlangsung tanpa oksigen, di mana bahan organik akan terurai menjadi gas metana, karbon dioksida, dan produk sampingan lainnya.

## 2. Bioremediasi

Bioremediasi adalah proses pemanfaatan mikroorganisme, tanaman, enzim, atau makhluk hidup lainnya untuk mengurangi, menghilangkan, atau menetralkan polutan dari lingkungan, terutama tanah dan air yang terkontaminasi (Dewi *et al.*, 2022).

**Bioremediasi** adalah aplikasi teknologi yang memanfaatkan proses biodegradasi untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi, proses yang dirancang dengan intervensi manusia untuk mempercepat atau mengarahkan proses alami penguraian polutan (Evitasari *et al.*, 2020). Tujuan utama bioremediasi adalah untuk mengembalikan kondisi lingkungan yang terkontaminasi menjadi lebih bersih dan aman bagi makhluk hidup melalui mekanisme penguraian atau pemecahan zat berbahaya menjadi senyawa yang kurang beracun atau tidak beracun. Metode remediasi dapat diaplikasikan dalam pengolahan tanah, air, dan udara yang terkontaminasi (Priadie, 2012). Berdasarkan lokasi berlangsungnya proses bioremediasi, dapat dibedakan :

- a. Bioremediasi in situ adalah proses bioremediasi yang dilakukan langsung di lokasi yang terkontaminasi (Höhener & Ponsin, 2014). Contohnya termasuk bioventing, biosparging, dan fitoremediasi (pemanfaatan tanaman untuk menyerap atau memecah polutan). Fitoremediasi adalah salah satu bagian dari bioteknologi lingkungan dengan memanfaatkan tumbuhan dalam menyerap, mengakumulasi, dan mendetoksifikasi polutan dari tanah dan air (Kumar & Prasad, 2019). Beberapa penerapan dari fitoremediasi ini antara lain adalah fitoekstraksi yaitu penyerapan kontaminan oleh akar tanaman, fitostabilisasi yaitu imobilisasi kontaminan dalam tanah, dan fitodegradasi yaitu penguraian polutan melalui proses metabolisme di dalam tanaman (Satya & Sarkar, 2018).

- b. Bioremediasi *ex situ* adalah proses bioremediasi yang melibatkan transfer material yang terkontaminasi ke lokasi lain untuk diolah. Contohnya termasuk biopiles, windrows, dan bioreaktor. Bioreaktor adalah perangkat atau sistem yang digunakan untuk mendukung reaksi biokimia dalam kondisi terkendali. Alat ini memungkinkan pertumbuhan mikroorganisme atau sel secara optimal untuk menghasilkan produk yang diinginkan, seperti enzim, protein, biofuel, atau untuk memproses bioteknologi lainnya seperti bioremediasi. Bioreaktor memainkan peran penting dalam industri bioteknologi, farmasi, makanan, dan lingkungan. Bioreaktor sangat penting dalam bioteknologi lingkungan dan industri terkait, memungkinkan produksi yang efisien dan terkendali dari berbagai produk biologi serta menghasilkan lingkungan yang lebih bersih dan efektif (Azubuike *et al*, 2016).

Beberapa keuntungan bioremediasi adalah bersifat ramah lingkungan, mengatasi berbagai jenis polutan, termasuk bahan organik dan anorganik serta biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan metode fisik dan kimia lainnya (Melati, 2020). Adapun kekurangannya antara lain adalah waktu yang diperlukan bisa lama tergantung pada tingkat kontaminasi dan kondisi lingkungan seperti suhu, pH, dan keberadaan nutrisi. Secara keseluruhan, bioremediasi adalah teknik yang penting dan efektif untuk pengelolaan dan pemulihan lingkungan yang terkontaminasi (Puspitasari & Khaeruddin, 2016).

### **3. Biofiltrasi**

Biofiltrasi adalah proses di mana mikroorganisme yang menempel pada media filter digunakan untuk menguraikan polutan dalam udara atau air. Prinsip dasar biofiltrasi meliputi kombinasi antara filtrasi fisik, adsorpsi kimia, dan degradasi

biologi untuk menghilangkan kontaminan (Widayat, 2015). Mikroorganisme (bakteri, jamur, atau alga) yang melekat pada media filter bertanggung jawab untuk menguraikan polutan organik dan anorganik. Media tempat mikroorganisme hidup bisa berupa bahan alami (seperti tanah, kompos, atau serbuk kayu) atau bahan sintetis (seperti plastik atau keramik), yang menyediakan permukaan yang luas untuk pertumbuhan mikroorganisme dan memastikan aliran udara atau udara yang baik. Kontaminan dibawa oleh aliran udara atau udara melalui media filter, tempat mereka teradsorpsi dan disaring oleh mikroorganisme. Langkah awal dalam proses biofiltrasi adalah filtrasi secara fisik terjadi melalui penyaringan partikel padat oleh media filter saat air atau udara melewati sistem biofilter. Polutan kimia akan teradsorpsi pada permukaan media filter, dan selanjutnya mikroorganisme yang menempel pada media filter akan menguraikan polutan kimia yang teradsorpsi melalui proses metabolisme. Polutan organik diuraikan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya, seperti udara, karbon dioksida, dan biomassa mikroba. Proses ini bisa bersifat aerobik (dengan oksigen) atau anaerobik (tanpa oksigen), tergantung pada jenis biofilter dan mikroorganisme yang digunakan (Haerun *et al.*, 2018).

Biofiltrasi umumnya diaplikasikan dalam pengolahan air limbah untuk menghilangkan bahan organik, nitrogen, fosfor, dan polutan lainnya dari air limbah domestik dan industri. Pada sistem pengolahan air limbah rumah tangga dan industri, biofiltrasi digunakan untuk meningkatkan kualitas air sebelum dibuang ke lingkungan (Mulyadi & Ajid, 2020). Teknik biofiltrasi juga digunakan dalam menghilangkan senyawa organik volatil (VOC), gas berbau, dan polutan udara lainnya dari aliran udara, sehingga banyak digunakan pada pabrik pengolahan makanan, industri kimia, dan tempat pembuangan sampah untuk mengontrol emisi udara berbahaya dan bau.

Biofiltrasi diaplikasikan dalam pengendalian bau dari fasilitas pengolahan limbah, peternakan, dan tempat pembuangan sampah dengan menguraikan senyawa penyebab bau. Selain ramah lingkungan, kelebihan dari teknik ini adalah biaya operasi dan pemeliharaan yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pengolahan kimia atau fisik, dapat menghilangkan berbagai jenis polutan dengan efisiensi tinggi (Mangiri, 2017). Yang menjadi kendala dalam teknik ini adalah pemeliharaan filter media yang harus dibersihkan secara berkala untuk mencegah penyumbatan dan menjaga efektivitas, selain mengontrol kondisi seperti kelembaban, pH, dan suhu untuk memastikan kinerja mikroorganisme yang optimal. Biofiltrasi adalah teknologi yang efektif dan berkelanjutan untuk pengolahan udara dan udara yang terkontaminasi, dengan penerapan luas di berbagai sektor industri dan lingkungan (Apelabi *et al.*, 2021).

#### **4. Bioaugmentasi**

Bioaugmentasi adalah teknik bioremediasi di mana mikroorganisme tertentu yang telah dipilih atau direayasa dimasukkan ke dalam lingkungan yang terkontaminasi untuk mempercepat proses penguraian polutan. Mikroorganisme ini biasanya memiliki kemampuan khusus untuk menguraikan atau menguraikan polutan tertentu yang mungkin tidak dapat diuraikan secara efektif oleh mikroorganisme alami yang ada di lingkungan tersebut. Bioaugmentasi digunakan dalam berbagai konteks, termasuk pengolahan air limbah, pemulihan tanah yang terkontaminasi, dan penguraian senyawa kimia berbahaya di lingkungan (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022). Teknik ini pada umumnya diaplikasikan untuk penjernihan air pada instalasi pengolahan air limbah dan lokasi tanah yang terkontaminasi untuk mempercepat proses biodegradasi. Langkah awal dalam teknik ini adalah menentukan jenis dan

konsentrasi polutan yang ada di lingkungan yang terkontaminasi, sebagai dasar dalam pemilihan dan rekayasa mikroorganisme yang akan digunakan. Pemilihan mikroorganisme berupa bakteri, jamur, atau alga didasarkan pada kemampuannya dalam menguraikan polutan tersebut. Kondisi lingkungan dalam proses bioaugmentasi ini harus terkontrol, menyesuaikan dengan karakteristik pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme yang ditambahkan, seperti penyesuaian pH, suhu, atau penambahan nutrisi (Garcia & Purwanti, 2022). Setelah penambahan mikroorganisme terpilih ke lingkungan yang terkontaminasi untuk menguraikan polutan, dilakukan pemantauan kemajuan proses penguraian dan melakukan penyesuaian jika diperlukan untuk memastikan efektivitas bioaugmentasi.

Beberapa keunggulan dari teknik bioaugmentasi antara lain adalah memiliki efektivitas tinggi dan fleksibilitas. Mikroorganisme yang ditambahkan biasanya memiliki kemampuan spesifik untuk menguraikan polutan tertentu, sehingga proses pembersihan bisa lebih cepat dan efisien, dan dapat diterapkan pada berbagai jenis polutan dan lingkungan yang berbeda. Dengan penambahan mikroorganisme terpilih yang tepat, maka efisiensi dan laju biodegradasi alami dapat ditingkatkan. Kendala yang dihadapi dalam menggunakan teknik ini antara lain adalah adaptasi mikroorganisme yang ditambahkan tidak selalu berlangsung dengan baik terhadap kondisi lingkungan yang baru. Kemungkinan lain juga adalah bahwa mikroorganisme yang ditambahkan menghadapi persaingan dengan mikroorganisme asli yang sudah ada di lingkungan tersebut, terutama terutama dalam penggunaan nutrisi/substrat yang tersedia.

Teknik ini memerlukan pengendalian dan pemantauan yang cermat untuk memastikan kondisi yang optimal bagi mikroorganisme yang ditambahkan. Secara keseluruhan,

bioaugmentasi adalah teknik yang berguna dalam upaya pembersihan lingkungan yang terkontaminasi, terutama ketika polutan yang sulit diuraikan oleh mikroorganisme alami.

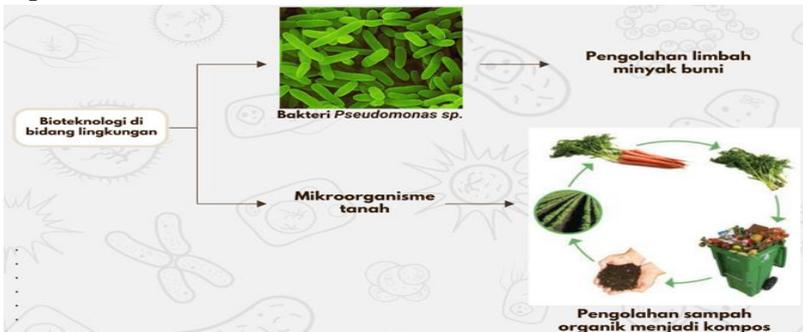
## **5. Pengomposan**

Pengomposan bertujuan untuk mengurangi limbah buangan ke lingkungan melalui proses dekomposisi biologis bahan organik oleh mikroorganisme (seperti bakteri, jamur, dan protozoa) dalam kondisi aerobik yang terkendali (kelembaban dan suhu yang tepat). Prinsip pengomposan adalah mendaur ulang unsur hara melalui perombakan bahan organik, seperti sisa makanan, daun, dan kotoran hewan, menjadi kompos, yaitu material yang kaya akan nutrisi dan dapat digunakan sebagai pupuk alami untuk meningkatkan kesuburan tanah (Ayumi *et al.*, 2017). Beberapa faktor yang mempengaruhi berlangsungnya pengomposan adalah rasio Karbon-Nitrogen (C-N), yaitu rasio yang seimbang antara karbon (bahan kering, seperti daun kering) dan nitrogen (bahan basah, seperti sisa makanan) penting untuk keberhasilan pengomposan. Oksigen diperlukan untuk mikroorganisme aerobik yang memecah bahan organik, untuk itu secara berkala, tumpukan kompos perlu dibalik untuk memastikan aerasi yang baik. Kadar air optimal (sekitar 40-60%) diperlukan untuk aktivitas mikroorganisme, harus cukup lembap tetapi tidak terlalu basah. Suhu optimal (40-60°C) mendukung aktivitas mikroorganisme dan mempercepat proses dekomposisi.

Bahan organik untuk pembuatan kompos terdiri dari bahan hijau (sisa makanan, potongan rumput, kotoran hewan, yang kaya nitrogen) serta bahan coklat (daun kering, cabang, serbuk gergaji, yang kaya karbon), selanjutnya ditumpuk secara bergantian untuk memastikan rasio C yang seimbang.

Bahan organik yang digunakan, sebelumnya dipotong kecil-kecil untuk meningkatkan luas permukaan dan mempercepat

dekomposisi. Jika bahan kompos terlalu kering dapat ditambahkan dengan air, atau jika bahan terlalu basah dapat ditambahkan dengan bahan kering. Berdasarkan suhu pengomposan, terdapat 2 fase yaitu fase mesofilik, di mana suhu tumpukan material organik naik ke 20-40°C, dan mikroorganisme mesofilik mulai bekerja. Selanjutnya adalah fase termofilik, di mana suhu meningkat ke 40-60°C, dapat mempercepat penguraian bahan organik. Setelah dekomposisi utama selesai, suhu mulai turun, dan mikroorganisme mesofilik kembali mendominasi untuk menyelesaikan dekomposisi. Waktu pematangan kompos berkisar selama 2-6 bulan, tergantung kondisi. Kompos matang memiliki tekstur yang remah, berwarna gelap, dan tidak berbau, dan siap untuk diaplikasikan ke tanah untuk kesuburan tanaman.



Sumber: google.doc

Gambar 1.3. Bioteknologi lingkungan tanah dan perairan

Selain mengurangi volume limbah organik yang masuk ke tempat pembuangan akhir, pengomposan juga bermanfaat untuk mengurangi emisi gas metana dari dekomposisi anaerobik di tempat pembuangan sampah, sebagai pupuk alami yang menyediakan nutrisi penting untuk tanaman, meningkatkan kesuburan tanah serta meningkatkan struktur tanah, aerasi, dan kemampuan menahan air (Turista, 2017). Pengomposan dapat

mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia dan biaya pembuangan sampah, karena hanya memanfaatkan kembali sisa makanan dan limbah organik dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan.

## **KESIMPULAN**

Bioteknologi lingkungan merupakan cabang bioteknologi yang berfokus pada penggunaan organisme hidup dan proses biologis untuk memecahkan masalah lingkungan dan mempromosikan keberlanjutan ekosistem. Mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga memainkan peran kunci dalam proses bioteknologi lingkungan, termasuk bioremediasi, pengolahan limbah, dan pengolahan air. Untuk itu sangat penting untuk memahami interaksi antara mikroorganisme dan komponen ekosistem lainnya membantu mengembangkan strategi untuk mengelola polusi dan meningkatkan kesehatan lingkungan. Teknik rekayasa genetika digunakan untuk meningkatkan kemampuan mikroorganisme dalam menguraikan polutan atau memproduksi enzim tertentu yang bermanfaat. Studi tentang materi genetik yang diambil langsung dari sampel lingkungan (tanah, air) untuk mengidentifikasi mikroorganisme dan fungsi gen yang terlibat dalam transformasi bahan kimia.

Proses biokimia seperti dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme adalah dasar untuk banyak aplikasi bioteknologi lingkungan, termasuk pengomposan dan pengolahan air limbah. Proses biotransformasi melibatkan perubahan struktur kimia senyawa oleh mikroorganisme, yang dapat mengubah polutan menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau lebih mudah dikelola. Beberapa implementasi dari teknik bioteknologi lingkungan adalah bioremediasi, yaitu penggunaan mikroorganisme untuk membersihkan polutan dari tanah, air, dan udara (penggunaan bakteri untuk menguraikan hidrokarbon dalam tumpahan minyak). Selain itu adalah phytoremediasi,

yaitu penggunaan tanaman untuk menyerap atau memetabolisme polutan dari lingkungan. Penggunaan bioteknologi untuk menguraikan limbah organik dan meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah.

Bioteknologi lingkungan memanfaatkan prinsip-prinsip biologi dan teknologi untuk mengembangkan solusi inovatif yang berkelanjutan dalam mengelola masalah lingkungan. Dengan memahami dan memanipulasi mikroorganisme, materi genetik, dan proses biokimia, bioteknologi lingkungan dapat berkontribusi secara signifikan terhadap perlindungan dan perbaikan ekosistem, pengelolaan limbah, serta pemantauan dan pengurangan polusi. Aplikasi dari bioteknologi ini tidak hanya menawarkan solusi praktis untuk masalah lingkungan, tetapi juga mendukung praktik-praktik keberlanjutan yang penting untuk masa depan planet kita.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Ammar, E.E. (2022). Environmental Impact of Biodegradation dalam Handbook of Biodegradable Materials. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83783-9\\_27-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83783-9_27-1).
- Apelabi, M.M., Rasman., & Rostina. (2021). Pengaruh Proses Biofilter Aerob Anaerob Terhadap Penurunan Kadar Bod Pada Limbah Cair Rumah Tangga (Studi Literatur), *Sulolipu*, 21 (1).
- Azubuiké CC, Chikere CB, Okpokwasii GC. (2016). Bioremediation techniques– classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol.* 32:180. DOI 10.1007/s11274-016-2137-x.
- Ayumi, I.dE. Lutfi, M., & Nugroho, W.A. (2017). Efektivitas Tipe Pengomposan (Konvensional, Aerasi, dan Rak Segitiga) terhadap sifat fisik dan kimia komposdari sludge

- biogas dan Serbuk Gergaji. *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 5 (3).
- Dewi, E.R.S. (2020). Bioremediasi : Mikroorganismen sebagai Fungsi Bioremediasi pada Perairan Tercemar. Penerbit Universitas PGRI : Semarang.
- Dewi, I G. A. K. S. P., Sunariani, N. L. G. A., & Suprihatin, I. E.. (2022). Remediasi Tanah Tercemar Timbal (Pb) Dan Akumulasinya Pada Tanaman Gumitir (*Tagetes erecta L.*). *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*, 16 (2).
- Evitasari., Sukono, G.A.B., Hikmawan, F.R., & Satriawan, D. (2020). Karakter Organisme Biologis dalam Bioremediasi – Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan*, 2 (2).
- Garcia, A.D., & Purwanti, I.F. (2022). Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta, *Jurnal Teknik ITS*, 11 (3).
- Haerun, R., Mallongi, A., & Natsir, M.F. (2018). Efisiensi Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Biofilter Sistem Upflow Dengan Penambahan Efektif Mikroorganismen 4. *Jurnal Nasional Ilmu Kesehatan*, 1 (2).
- Ho`hener P, Ponsin V. (2014). In situ vadose zone bioremediation. *Curr Opin Biotechnol* 27:1– 7. doi:10.1016/j.copbio.2013.08.018.
- Kumar, A. & Prasad, M. N. V. (2019). Plant genetic engineering approach for the Pb and Zn remediation: Defense reactions and detoxification mechanisms. *Transgenic Plant Technology for Remediation of Toxic Metals and Metalloids*, 359- 381.
- Lanigan, T. M., Kopera, H. C., & Saunders, T. L. (2020). Principles of Genetic Engineering. *Genes*. 11 (291): 1-21.
- Mangiri. S.. (2017). Studi Kemampuan Media Papan Pakis Sebagai Biofilter Dalam Menurunkan Kadar BOD dan COD

- pada Air Limbah Pemotongan Ayam. Skripsi. Jurusan Kesehatan Lingkungan. Politeknik Kesehatan Makassar.
- Melati, I. (2020). Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan Dan Prospek Riset. Prosiding Seminar Nasional Biotik 2020.
- Mukhlis. (2014). Biodegradasi Bahan Organik Oleh Mikroba Dan Pengaruhnya Terhadap Tanaman Padi Di Lahan Gambut, *Agric*, 6 (1).
- Muliyadi & Ajid, S.H. (2020). Efektivitas Bonggol Jagung sebagai Media Biofiltrasi dalam Menurunkan Beban Pencemar Limbah Domestik. *HIGEIA*, 2 (2).
- Pramashinta, A., Riska, L., & Hadiyanto. (2014). Bioteknologi Pangan: Sejarah, Manfaat, dan Potensi Resiko. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 3(1), 1-6.
- Priadie, B. (2012). Teknik Bioremediasi Sebagai Alternatif Dalam Upaya Pengendalian Pencemaran Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 10 (1).
- Primrose, S. T. (2001). Principles of Gene. Manipulation Sixth Edition. UK: Blackwell Publishing, Oxford.
- Puspitasari, D.J., & Khaeruddin. (2016). Kajian Bioremediasi Pada Tanah Tercemar Pestisida *Kovalen*, 2 (3).
- Rahayu, D.R & Mangkoedihardjo, S. (2022). Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya). *Jurnal Teknik ITS*, 11 (1).
- Satya, P., & Sarkar, D. (2018). Plant Biotechnology and Crop Improvement. In *Biotechnology for Sustainable Agriculture* (pp. 93–140). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812160-3.00004-0>
- Snehal, S. & Dubey, A. (2019). Role of biotechnology in food processing. *Acta Scientific Agriculture*, 3(5), 60-61.

- Thesiwati, A.S. (2018). Peranan Kompos Sebagai Bahan Organik Yang Ramah Lingkungan, Fakultas Pertanian, Universitas Tamansiswa Padang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Dewantara*, 1 (1).
- Turista, D.D.R. (2017). Biodegradasi Limbah Cair Organik Menggunakan Konsorsium Bakteri Sebagai Bahan Penyusunan Buku Ajar Matakuliah Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia*, 3 (2).
- Vaishnav, P., & Demain, A. L. (2017). Industrial Biotechnology (Overview) ☆. In Reference Module in Life Sciences. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.13064-X>
- Widayati, W. (2015). Pilot Plant Kombinasi Biofiltrasi Dengan Ultrafiltrasi Untuk Penyediaan Air Minum. *Jurnal Air Indonesia*, 8 (1).

## PROFIL PENULIS



### **Syarif Irwan Nurdiansyah**

Penulis lahir di Pemangkat pada tanggal Juni 1985. Penulis ini lulusan Program Studi Biologi Universitas Tanjungpura (S1) dan Program Studi Biologi Universitas Sudirman (S2). Penulis adalah dosen tetap di Program Studi Ilmu Kelautan, FMIPA Untan, dengan kajian bidang utama adalah Bioekologi dan Konservasi. Beberapa buku yang telah disusun antara lain Meretrix sp. : Bioekologi, Mikrobiologi Kimiawi, Pemanfaatan sebagai Bahan Pangan Fungsional dan Fitoplankton : Bioekologi, Kultur dan penginderaan jauh. Book Chapter Bioteknologi Lingkungan merupakan buku ketiga yang ditulis bersama dengan dosen-dosen dan praktisi lingkungan dari berbagai perguruan tinggi di seluruh Indonesia. Semoga buku ini menjadi bacaan bermanfaat dan rujukan bagi mahasiswa.



## **BAB 2**

# **BIOGAS: TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH ORGANIK DAN ENERGI TERBARUKAN**

Hamzah Fansuri  
Universitas Trunojoyo Madura, Bangkalan  
E-mail: hamzah.fansuri@trunojoyo.ac.id

### **PENDAHULUAN**

Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat dua krisis besar yang disebabkan oleh meningkatnya konsumsi energi global bahan bakar fosil (80% dari energi yang dibutuhkan) yaitu pencemaran lingkungan dan percepatan pengurangan sumber daya energi (Zupančič & Grilc, 2012). Oleh karena itu, mencari dan menemukan energi bersih dan terbarukan menjadi agenda utama dunia untuk mengurangi krisis tersebut. Biomassa merupakan sumber daya terbarukan utama di dunia yang dapat menggantikan bahan bakar fosil (Atelge *et al.*, 2020). Salah satu keuntungan penting produksi energi dari biomassa, misalnya dengan konversi menjadi biogas, adalah kebutuhan investasi modal yang lebih sedikit dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya seperti hidro, matahari, dan angin (Sawyerr *et al.*, 2019).

Dalam hal ini, produksi biogas dari limbah organik memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan energi alternatif lainnya, misalnya insinerasi, bio-oil, bioetanol, biobutanol, biohidrogen, listrik, dan biodiesel (Faaij, 2006). Hasil energi yang lebih tinggi, dampak lingkungan yang lebih kecil, dan persyaratan investasi modal yang lebih sedikit adalah beberapa keuntungan dari produksi biogas (Rittmann, 2008). Biogas merupakan campuran yang mudah terbakar jika konsentrasi biometana lebih tinggi dari 40%. Biogas diproduksi melalui proses yang melibatkan empat tahap, yaitu hidrolisis,

asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis (Obileke *et al.*, 2021), dan menggunakan konsorsium mikroba yang terdiri dari berbagai jenis bakteri.

Hidrolisis bahan organik dilakukan oleh bakteri yang berbeda, termasuk genus *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteriodes*, *Acetovibrio*, dan *Microbispora*. Lebih lanjut, bakteri *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Bacillus*, dan *Escherichia* bertanggung jawab dalam proses asidogenesis (Christy *et al.*, 2014). Pada proses asetogenesis, beberapa bakteri yang terlibat yaitu *Acetobacterium*, *Syntrophomonas*, *Clostridium*, *Sporomusa*, *Syntrophospora*, *Thermosyntropha*, dan *Eubacterium*. Sejumlah arkeobakteri, termasuk *Methanococcus*, *Methanosarcina*, dan *Methanobus*, dimanfaatkan pada proses metanogenesis (Nzila, 2017; Ostrem & Themelis, 2004; Sekiguchi *et al.*, 2001). Konsorsium mikroba ini membutuhkan kondisi spesifik untuk produksi biogas yang optimal, yaitu pH pada kisaran 6-7,5 dan suhu pada kisaran 35-55 °C (Naycharan, 2015).

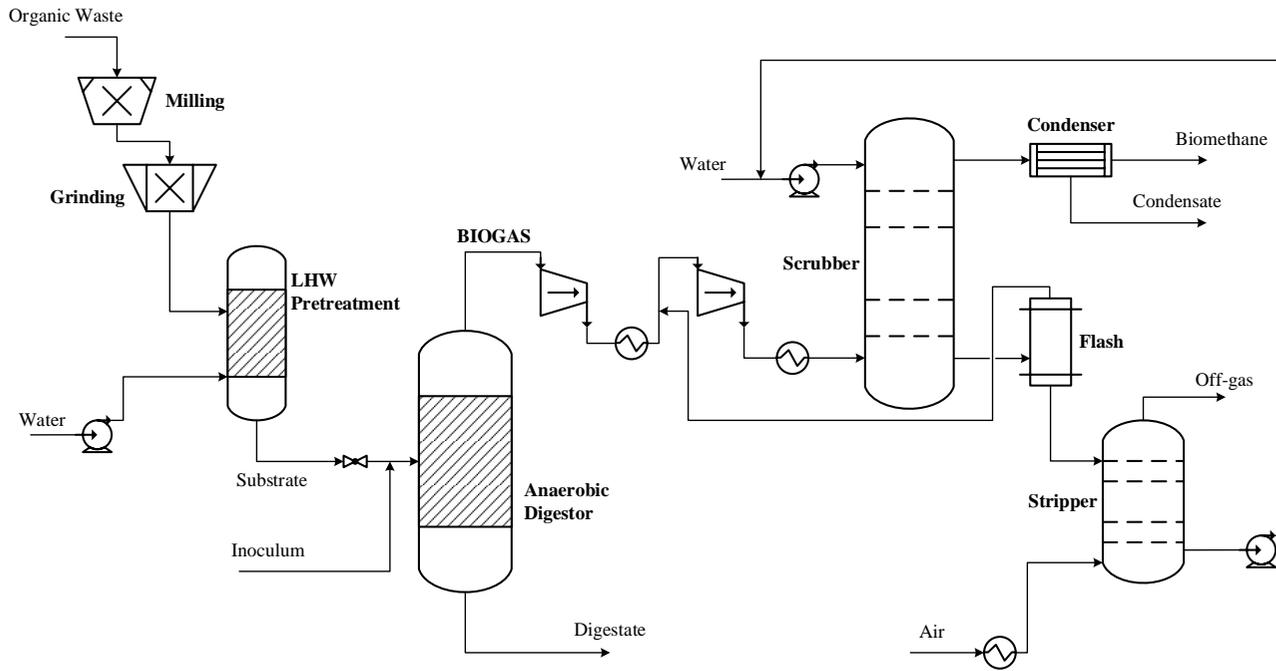
Biogas (yang dianggap sebagai sumber bahan bakar rendah karbon) menawarkan peluang terbaik bagi masyarakat pedesaan terutama di Indonesia yang mayoritas penduduknya adalah petani untuk memenuhi kebutuhan energi mereka. Penggunaan biogas menawarkan banyak manfaat, seperti (1) peningkatan pertanian di masyarakat pedesaan, yang secara langsung meningkatkan ekonomi masyarakat melalui penciptaan lapangan kerja; (2) pengurangan limbah melalui penggunaan limbah pertanian organik dan sampah kota untuk produksi energi; dan (3) peningkatan kualitas lingkungan melalui pengurangan emisi  $CO_2$  (Soccol *et al.*, 2019).

Konsep pengolahan limbah organik dapat mengubah paradigma akan krisis energi yaitu dengan mengkonversinya menjadi energi bahan bakar terbarukan (biogas). Bayangkan jika semua desa menerapkan metode konversi ini, bukan tidak

mungkin kemandirian energi bahan bakar akan tercapai di seluruh wilayah Indonesia. Pada prinsipnya, limbah organik merupakan sumber biomassa yang tidak memiliki nilai ekonomis karena merupakan limbah hasil pertanian dan peternakan, maupun hasil samping rumah tangga dan industri. Akan tetapi, dengan memanfaatkan proses fermentasi secara anaerob, maka limbah ini dapat di konversi menjadi biogas yang dapat digunakan untuk energi listrik, kompor, maupun kebutuhan industri.

### **PROSES PRODUKSI BIOGAS**

Pengumpulan dan pengangkutan sampah organik ke instalasi biogas adalah langkah pertama dalam proses produksi biogas. Setelah sampah organik dikirim ke fasilitas produksi, sampah organik akan mengalami serangkaian proses penguraian anaerobik, di mana mikroorganisme mengurai bahan limbah dan menghasilkan biogas sebagai produk sampingan. Biogas kemudian ditangkap dan dimurnikan untuk menghilangkan kotoran seperti hidrogen sulfida dan karbon dioksida, sehingga menghasilkan sumber energi yang bersih dan terbarukan yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi. Sisa kotoran yang kaya akan nutrisi dapat digunakan sebagai pupuk alami untuk tanaman, sehingga menutup siklus praktik pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Secara keseluruhan, proses produksi biogas tidak hanya membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga berkontribusi pada ekonomi sirkular dengan mengubah limbah organik menjadi sumber daya yang berharga.

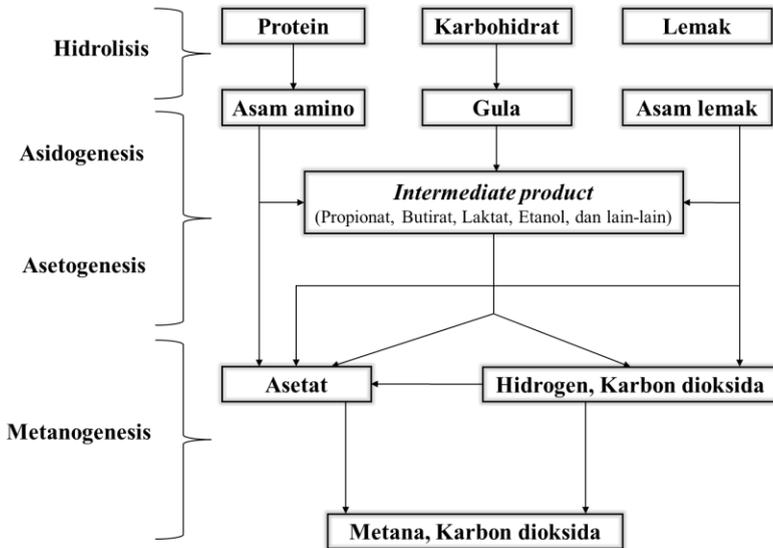


Gambar 2.1. *Process Flow Diagram (PFD) produksi biometana (biogas) dengan Liquid Hot Water (LHW) pretreatment*

Secara detail, diagram alir atau *Process Flow Diagram* (PFD) produksi biogas disajikan dalam Gambar 2.1. Limbah organik yang tersedia dicacah hingga mendapatkan ukuran yang lebih kecil. *Liquid Hot Water* (LHW) *pretreatment* dapat digunakan sebagai proses perlakuan awal sebelum limbah diumpankan ke *Digestor*. Biogas akan terbentuk dari proses *anaerobic digestion* (AD), dan sisa hasil proses tersebut (*digestate*) dapat dimanfaatkan untuk digunakan sebagai bahan baku pupuk organik. Selanjutnya, biogas diumpankan ke kolom *Scrubber* dan *Stripper* untuk mendapatkan biometana yang memiliki nilai kalor panas (*Heat Heating Value*) yang lebih tinggi.

### **ANAEROBIC DIGESTION (AD) (PENGURAIAN SECARA ANAEROBIK)**

Ada empat tahap dasar yang terlibat dalam AD. Keempat tahap dasar ini membentuk proses produksi biogas dari berbagai bahan organik yang terjadi di dalam digester anaerobik (*anaerobic digester*). Keempat tahap tersebut adalah hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis seperti yang diuraikan pada Gambar 2.2 (Oobileke *et al.*, 2021). Keempat tahap AD ini sangat penting karena menunjukkan keseluruhan proses yang menggambarkan reaksi kimia di mana bahan organik dicerna secara biokimiawi menjadi karbon dioksida ( $CO_2$ ) dan metana ( $CH_4$ ) oleh mikroorganisme anaerobik.



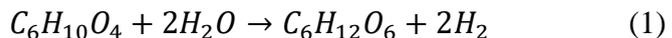
Gambar 2.2. Empat tahapan proses *anaerobic digestion* (AD)

### **Hidrolisis (*Hydrolysis*)**

Proses hidrolisis melibatkan penguraian bahan polimer organik kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lipid. Senyawa organik kompleks ini dihidrolisis menjadi senyawa yang lebih kecil dan larut dalam air seperti gula, asam amino, dan asam lemak rantai panjang oleh enzim yang dihasilkan oleh bakteri fermentatif (mikroorganisme) (Eastman & Ferguson, 1981). Pada akhir tahap hidrolisis, senyawa organik sederhana dihasilkan. Senyawa-senyawa tersebut kemudian mengalami penyerapan dan degradasi oleh berbagai bakteri anaerobik fakultatif dan obligat pada tahap asidogenik, menghasilkan asam lemak volatil rantai pendek (*volatile fatty acids*) (VFA). Asam-asam ini bergabung dengan alkohol dan diubah menjadi asetat, hidrogen, dan karbon dioksida (Chandra *et al.*, 2012). Fase ini melibatkan hidrolisis polisakarida menjadi monosakarida, lemak menjadi gliserin dan asam lemak serta protein menjadi asam amino. Katalisis enzimatik mempercepat proses hidrolisis

melalui oksidasi bahan organik melalui proses yang disebut proses biologis aerobik (Uddin *et al.*, 2021).

Proses hidrolisis dan degradasi aerobik merupakan proses yang cepat dan biogas yang dihasilkan diubah menjadi karbon dioksida ( $CO_2$ ) dari oksigen (Uddin *et al.*, 2021). Ketika substrat telah dihidrolisis, substrat menjadi tersedia untuk transportasi sel dan bakteri fermentatif kemudian dapat mendegradasi substrat ini selama tahap asidogenesis. Bagaimanapun, optimalisasi proses hidrolisis merupakan langkah penting untuk mencegah degradasi makromolekul yang tidak efisien, yang dapat berdampak negatif pada laju penguraian atau aktivitas biologis lainnya, dan akibatnya pada hasil biogas. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa kultur mikroorganisme beroperasi secara aktif agar proses kedua (asidogenesis) dapat berlangsung. Perlakuan fisikokimia juga dapat digunakan untuk mendorong pelarutan bahan organik. Namun, tidak boleh ada udara masuk ke dalam sistem, karena keberadaan udara dalam biomassa tidak akan memungkinkan biomassa untuk bertindak sebagai unit anaerobik. Reaksi pengubahan bahan organik menjadi gula dalam proses hidrolisis ditunjukkan dalam persamaan (1).



Produksi biogas dipengaruhi oleh banyak faktor seperti nutrisi, pH bahan baku, suhu, laju aliran umpan (*loading rate*) dan waktu retensi (*retention time*). Faktor-faktor ini dapat memperlambat atau menghentikan proses produksi biogas jika nilai faktor-faktor tersebut tidak berada dalam kisaran tertentu (Angelidaki *et al.*, 2009).

### **Asidogenesis (*Acidogenesis*)**

Proses asidogenesis mengubah asam organik yang dihasilkan selama tahap kedua menjadi asam asetat, turunan asam, karbon dioksida, dan hidrogen. Menurut (Fang *et al.*,

2010), sangat penting bahwa tingkat hidrogen harus rendah agar reaksi asidogenik menguntungkan secara termodinamika. Pada tahap proses AD ini, produk dari tahap hidrolisis dipecah lebih lanjut oleh berbagai mikroorganisme fermentatif obligat dan fakultatif untuk menghasilkan asam lemah (sebagian besar asam organik) seperti asam asetat, asam propionat, asam butirat (VFA), asam laktat, alkohol, hidrogen, dan karbondioksida ( $CO_2$ ) (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000). Tahap asidogenesis melibatkan produksi hidrogen konsentrasi tinggi oleh bakteri penghasil asam yang disebut mikroorganisme asidogenik dan biasanya merupakan langkah tercepat dalam proses anaerobik yang seimbang.

Proses asidogenesis dijelaskan dengan adanya akumulasi laktat, etanol, propionat, butirat, dan VFA yang lebih tinggi yang disebut *intermediate products* seperti yang disajikan dalam

Tabel 2.1. Asidogenesis merupakan respons bakteri terhadap peningkatan konsentrasi hidrogen dalam sistem untuk menghasilkan asetat oleh mikroorganisme asetogenik (Schink, 1997). Degradasi bahan organik untuk menghasilkan biogas juga bergantung pada interaksi kompleks dari berbagai kelompok bakteri, dengan dua kelompok utama adalah bakteri penghasil asam (asidogen) dan bakteri penghasil metana (metanogen). Oleh karena itu, menjaga hubungan simbiosis antara bakteri asidogenik dan metanogenik sangat penting dalam mempertahankan keberhasilan pengoperasian digester anaerobik (*anaerobic digester*). Langkah ini sangat penting karena menghubungkan fase fermentasi dengan fase produksi metana.

Tabel 2.1. Produk utama dari proses asidogenesis

Nama produk	Rumus kimia
Asam propionat	$CH_3CH_2COOH$
Asam butirrat	$CH_3CH_2COOH$
Asam asetat	$CH_3COOH$
Asam format	$HCOOH$
Asam laktat	$C_2H_6O_3$
Etanol	$C_2H_5OH$
Metanol	$CH_3OH$

Sumber: Oibileke *et al.*, (2021)

Dalam proses asidogenesis, asam asetat dianggap sebagai asam organik utama karena penggunaannya sebagai bahan untuk membentuk organisme metana. Mempertimbangkan perilaku pH terhadap proses asidogenesis, pH yang lebih besar dari 5 meningkatkan produksi asam lemak volatil (VFA), sedangkan pH rendah (<5) menghasilkan lebih banyak etanol. Pada pH yang lebih rendah yaitu kurang dari 4, reaksi dapat berhenti menurut penelitian Chasnyk *et al.*, (2015) dan Batstone *et al.*, (2002). Persamaan (2) hingga (4) merupakan contoh reaksi asidogenesis yang terjadi.

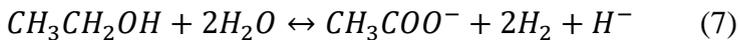


### Asetogenesis (*Acetogenesis*)

Selama tahap asetogenesis, alkohol (etanol), VFA dengan lebih dari dua atom karbon, diubah oleh bakteri pembentuk asetat menjadi asetat, dengan hidrogen dan karbondioksida

sebagai produk utama nya. Konversi ini merupakan proses yang vital karena hidrogen dan karbon dioksida secara konstan direduksi menjadi asetat oleh mikroorganisme homoasetogenik (Chandra *et al.*, 2012), sehingga mengurangi akumulasi hidrogen yang dapat memengaruhi fungsi bakteri asetogenik (Weiland, 2010). Tekanan parsial hidrogen yang rendah (10,4 dan 10,6 atm) diperlukan agar reaksi asetogenik dapat berlangsung (McCarty & Smith, 1986). Hal ini karena bakteri asetogenik dapat bertahan hidup di lingkungan dengan konsentrasi hidrogen yang sangat rendah.

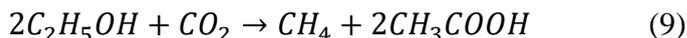
Namun, peningkatan lebih lanjut pada konsentrasi tekanan parsial hidrogen dapat menyebabkan asetogen kehilangan kemampuannya untuk menghasilkan asetat. Untuk memastikan bahwa tekanan rendah dipertahankan selama tahap asetogenesis dari proses AD, hubungan simbiosis mutualisme antara asetogen dan metanogen hidrogenotrofik harus terjadi, sehingga asetogen menghasilkan asetat yang dapat digunakan sebagai substrat oleh metanogen. Langkah ini merupakan tahap akhir dari fermentasi sebelum metanogenesis. Beberapa contoh reaksi asetogenesis ditunjukkan pada persamaan (5) hingga (7).



### **Metanogenesis (*Methanogenesis*)**

Metanogenesis dikenal sebagai proses akhir dan tahap penting dari proses penguraian secara anaerobik. Tahap ini memiliki dampak yang besar pada proses AD karena sekitar 70% metana yang digunakan dalam AD dihasilkan dari tahap ini (De Vrieze *et al.*, 2012). Selama tahap ini berlangsung, metanogen pereduksi karbon dioksida dan pengoksidasi hidrogen mengkonversi hidrogen dan karbon dioksida untuk mendapatkan metana, sedangkan metanogen asetoklastik

memanfaatkan asetat untuk menghasilkan metana (Obileke *et al.*, 2021). Serangkaian reaksi kimia pada tahap metanogenesis disajikan dalam persamaan (8) hingga (10).



Metanogen (Archaea) memanfaatkan asetat, hidrogen dan CO<sub>2</sub>, dan pada tingkat yang lebih rendah metanol, metilamina dan format, untuk membentuk metana dan CO<sub>2</sub>. Produk akhir ini adalah substrat utama bagi bakteri metanogenik untuk menghasilkan biogas, yang umumnya terdiri dari 50-75% metana (CH<sub>4</sub>), 50-25% CO<sub>2</sub>, dan sejumlah kecil nitrogen, hidrogen, dan hidrogen sulfida seperti yang tersaji dalam Tabel 2.2. Metanogenesis menunjukkan tingkat aktivitas biologis dalam sistem anaerobik dan kondisi penguraian. Semakin banyak metana yang dihasilkan, maka sistem tersebut akan bekerja semakin baik dan stabil.

Tabel 2.2. Komposisi biogas

<b>Komponen</b>	<b>Konsentrasi (%)</b>
Metana ( <i>CH</i> <sub>4</sub> )	55-60
Karbon dioksida ( <i>CO</i> <sub>2</sub> )	35-40
Hidrogen ( <i>H</i> <sub>2</sub> )	2-7
Hidrogen sulfida ( <i>H</i> <sub>2</sub> <i>S</i> )	2
Amonia ( <i>NH</i> <sub>3</sub> )	0-0,05
Nitrogen ( <i>N</i> )	0-2

Sumber: Schnurer & Jarvis, (2010)

### **Keuntungan dan Kerugian *Anaerobic Digestion* (AD)**

*Anaerobic Digestion* (AD) merupakan suatu proses degradasi mikroba dari limbah organik tanpa adanya oksigen.

Konversi bahan organik menjadi gas  $CO_2$  dan  $CH_4$  terjadi di samping serangkaian reaksi biokimia selama proses anaerobik. Keuntungan dan kerugian dari proses AD dengan mempertimbangkan biaya, waktu *start-up*, pembentukan lumpur, dan kapasitas penyangga disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Keuntungan dan kerugian *Anaerobic Digestion* (AD)

<b>Keuntungan</b>	<b>Kerugian</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biaya operasional untuk instalasi pengolahan anaerobik relatif sangat rendah dibandingkan dengan instalasi pengolahan aerobik</li> <li>• Konsumsi energi yang rendah dan produksi biogas untuk aplikasi lebih lanjut seperti produksi listrik; juga sistem ini tidak memerlukan energi eksternal untuk pengoperasiannya</li> <li>• Fleksibilitas sistem anaerobik memungkinkan teknologi ini untuk diterapkan dalam skala kecil atau besar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Start-up</i> yang lama: tingkat pertumbuhan yang lambat menyebabkan periode <i>start-up</i> yang lebih lama dibandingkan dengan sistem aerobik</li> <li>• Persyaratan buffer yang tinggi untuk kontrol pH: pH yang diperlukan untuk AD harus berkisar antara 6,5-8. Selain itu, penambahan bahan kimia, sebagian besar dalam air limbah industri, mungkin sangat diperlukan untuk mengontrol pH dengan kapasitas penyangga yang tidak memadai</li> <li>• Sensitivitas mikroorganisme yang tinggi: Metanogen sensitif terhadap pH dan suhu, diasumsikan bahwa mereka memiliki ketahanan yang lebih rendah terhadap senyawa beracun</li> </ul>

- Produksi lumpur yang rendah dibandingkan dengan sistem aerobik karena koefisien hasil yang lebih rendah
- Kelebihan lumpur dapat distabilkan dengan baik sehingga menghasilkan dampak lingkungan yang terbatas
- Kebutuhan nutrisi dan bahan kimia yang rendah: Hal ini disebabkan oleh produksi biomassa yang kecil selama proses anaerobik; akibatnya, kebutuhan nutrisi secara proporsional lebih sedikit
- Memungkinkan pemulihan sumber daya yang efisien, dan konservasi sumber energi tak terbarukan
- Penghilangan patogen dan nutrisi yang rendah: Limbah yang dihasilkan dari AD ditandai dengan rendahnya penghilangan patogen dan nutrisi
- Proses pasca perawatan seperti filtrasi membran diperlukan untuk memenuhi pedoman pembuangan yang bertujuan untuk melindungi lingkungan
- Proses AD lebih sensitif terhadap keberadaan senyawa beracun dan perubahan suhu daripada sistem aerobik

---

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

## **KESIMPULAN**

Salah satu aspek penting dalam mempromosikan praktik pengelolaan sampah yang berkelanjutan adalah pemanfaatan teknologi biogas. Dengan mengubah sampah organik menjadi biogas melalui penguraian secara anaerobik (*aerobic digestion*), kita tidak hanya dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, tetapi juga dapat menghasilkan energi terbarukan dalam prosesnya. Seiring dengan kemajuan teknologi biogas yang terus

berkembang, ada peluang yang semakin besar bagi masyarakat untuk memanfaatkan sumber energi yang berkelanjutan ini. Dengan investasi dan dukungan yang tepat, teknologi biogas memiliki potensi untuk memainkan peran penting dalam transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain itu, pengembangan infrastruktur biogas juga dapat menciptakan lapangan kerja baru dan merangsang pertumbuhan ekonomi di daerah pedesaan. Secara keseluruhan, prospek masa depan untuk teknologi biogas cukup menjanjikan, menawarkan solusi yang layak untuk tantangan lingkungan dan ekonomi.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934.
- Atelge, M. R., Krisa, D., Kumar, G., Eskicioglu, C., Nguyen, D. D., Chang, S. W., Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., & Unalan, S. (2020). Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 1019–1040.
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H. A., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65–73.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

- 16(3), 1462–1476.
- Chasnyk, O., Sołowski, G., & Shkarupa, O. (2015). Historical, technical and economic aspects of biogas development: Case of Poland and Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 227–239.
- Christy, P. M., Gopinath, L. R., & Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 167–173.
- De Vrieze, J., Hennebel, T., Boon, N., & Verstraete, W. (2012). Methanosarcina: the rediscovered methanogen for heavy duty biomethanation. *Bioresource Technology*, 112, 1–9.
- Eastman, J. A., & Ferguson, J. F. (1981). Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 352–366.
- Faaij, A. (2006). Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 343–375.
- Fang, C., Angelidaki, I., & Boe, K. (2010). Biogas production from food-processing industrial wastes by anaerobic digestion. *Water Research*, 19, 1083–1088.
- Kalyuzhnyi, S., Veeken, A., & Hamelers, B. (2000). Two-particle model of anaerobic solid state fermentation. *Water Science and Technology*, 41(3), 43–50.
- McCarty, P. L., & Smith, D. P. (1986). Anaerobic wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, 20(12), 1200–1206.
- Naycharan, M. (2015). The production of biofuels biogas. *Promot. Renew. New Energies*, 2, 40.
- Nzila, A. (2017). Mini review: Update on bioaugmentation in anaerobic processes for biogas production. *Anaerobe*, 46, 3–12.

- Obileke, K. C., Nwokolo, N., Makaka, G., Mukumba, P., & Onyeaka, H. (2021). Anaerobic digestion: Technology for biogas production as a source of renewable energy—A review. *Energy & Environment*, *32*(2), 191–225.
- Ostrem, K., & Themelis, N. J. (2004). Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. *Earth Engineering Center Columbia University*, 200.
- Rittmann, B. E. (2008). Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering*, *100*(2), 203–212.
- Sawyerr, N., Trois, C., Workneh, T., & Okudoh, V. (2019). An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(2), 105–116.
- Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *61*(2), 262–280.
- Schnurer, A., & Jarvis, A. (2010). Microbiological handbook for biogas plants. *Swedish Waste Management U*, 2009, 1–74.
- Sekiguchi, Y., Kamagata, Y., & Harada, H. (2001). Recent advances in methane fermentation technology. *Current Opinion in Biotechnology*, *12*(3), 277–282.
- Soccol, C. R., Faraco, V., Karp, S. G., Vandenberghe, L. P., Thomaz-Soccol, V., Woiciechowski, A. L., & Pandey, A. (2019). Lignocellulosic bioethanol: current status and future perspectives. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, 331–354.
- Uddin, M. N., Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Djavanroodi, F., Hazrat, M. A., Show, P. L., Ahmed, S. F., & Chu, Y. M. (2021). Prospects of Bioenergy Production From Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini

- Review. *Frontiers in Energy Research*, 9(February).
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849–860.
- Zupančič, G. D., & Grilc, V. (2012). Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste. *Management of Organic Waste*, 2.

## PROFIL PENULIS



### **Hamzah Fansuri**

Hamzah Fansuri adalah seorang dosen di prodi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura. Hamzah memiliki *background* pendidikan di bidang Teknik Kimia dan Teknologi Kimia Nuklir. Saat ini, penelitian yang Hamzah lakukan berfokus pada bidang bioenergi (*bioethanol*) yang berasal dari limbah pertanian (*agriculture waste*). Selain itu, Hamzah memiliki pengalaman bekerja sebagai *Fuel Controller* di TOTAL E&P Indonesié, *Process Engineer* di PT. Synergy Engineering, dan *Quality Engineer* di PT. Dirgantara Indonesia (Persero) sejak 2014 hingga awal 2021. Hamzah memiliki beberapa sertifikasi dan kompetensi, seperti Petugas Proteksi Radiasi (*Radiation Protection Officer*), *Lead Auditor ISO 9001 (Quality Management System)*, dan *Certified International Operation Management Professional (CIOMP)*.



## **BAB 3**

# **APLIKASI FITOREMEDIASI DALAM PENGENDALIAN POLUSI TANAH DAN AIR**

Said Ali Akbar

Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Kelautan dan Perikanan,  
Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Aceh  
E-mail: saidaliakbar@usk.ac.id

### **PENDAHULUAN**

Salah satu tantangan saat ini akibat populasi global adalah menyediakan air bersih untuk seluruh dunia. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) (Kinuthia *et al.*, 2020), sekitar 2,2 miliar orang menggunakan layanan air yang tidak layak minum dan tidak diolah dari sumber air yang sangat tidak aman. Beberapa contoh studi tentang pencemaran air (Singh *et al.*, 2021) telah mencatat dampak potensial dari kontaminasi air oleh logam berat (HMs), yang menunjukkan risiko tinggi terhadap masalah kesehatan, seperti karsinogenisitas dan penyakit lainnya, yang terkait dengan badan air yang tercemar. Untuk terus menyediakan air bersih dan aman bagi setiap orang di seluruh dunia, pemeliharaan dan infrastruktur perlu dijamin. Namun, negara-negara berkembang seringkali tidak memiliki akses ke layanan yang menjamin kualitas air untuk distribusi dan konsumsi manusia (Ganiyu *et al.*, 2020). Indeks Kualitas Air dan indeks lainnya membantu memahami faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kualitas air dan membuat keputusan tentang kualitas air minum berdasarkan kriteria, seperti pH, mikroorganisme dalam air, persistensi organoklorida, dan logam berat (HMs), antara lain (Rusănescu *et al.*, 2022), tetapi tidak setiap negara memiliki akses ke air yang memenuhi kriteria yang diusulkan (Seyoum *et al.*, 2022).

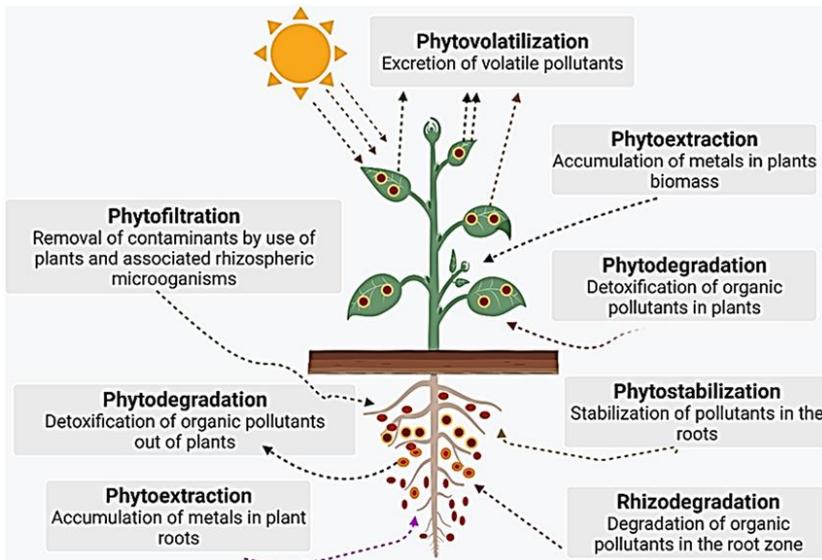
Sumber-sumber kontaminasi air bisa beragam. Namun, mereka dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori besar: patogen, senyawa anorganik, bahan organik, dan polutan makroskopik. Kontaminan anorganik dan organik adalah yang paling umum, bahkan dalam air yang sudah diolah (Seyoum *et al.*, 2020). Selain itu, polutan anorganik lebih persisten baik dalam limbah maupun air yang diolah (Seyoum *et al.*, 2021). Menurut WHO (Ofori *et al.*, 2021), logam berat mencemari air, dengan merkuri (Hg), kadmium (Cd), arsenik (As), kromium (Cr), dan timbal (Pb), di antara logam berat lainnya, memiliki persistensi yang panjang di lingkungan. Kontaminasi logam berat merugikan kesehatan setelah konsumsi yang berkepanjangan, yang terkait dengan kondisi seperti gangguan perilaku, masalah pernapasan (Kinuthia *et al.*, 2020), stres oksidatif yang disebabkan oleh spesies oksigen reaktif (ROS) (Barakat *et al.*, 2020), dan penyakit imun, kulit, pernapasan, dan endokrin (Agoro *et al.*, 2020), antara lain. Dengan mengakui statistik ini, kita dapat mengenali air yang terkontaminasi sebagai masalah global yang perlu ditangani.

Namun, variasi efek yang dapat ditimbulkan oleh polutan tergantung pada sifat kontaminan tersebut. HMs mewakili beberapa polutan yang paling umum dan berbahaya, tersebar luas di tanah dan air. Beberapa di antaranya (seperti Cu, Ni, Mn, Zn, dan Co) memainkan peran penting dalam metabolisme tumbuhan (Seyoum *et al.*, 2021). Banyak lainnya adalah elemen berbahaya bagi tumbuhan dan hewan, menurut data yang disajikan oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (Ganiyu *et al.*, 2020). HMs seperti As, Hg, Cr, Cd, dan Pb dapat menyebabkan efek berbahaya pada sistem kardiovaskular, dermal, pernapasan, dan pencernaan, serta banyak polutan lainnya menyebabkan berbagai efek kesehatan, termasuk asma, diabetes, kanker, dan penyakit Parkinson (Agoro *et al.*, 2020).

Teknik elektrokimia, kimia, dan fisik digunakan untuk mengolah beberapa kontaminan, tetapi mungkin tidak mengurangi jumlahnya. Pelindian tanah, adsorpsi, dan nano-sorben adalah beberapa strategi yang menghilangkan logam dari tanah (Agoro *et al.*, 2020). Inilah mengapa teknologi yang sedang berkembang, seperti bioremediasi, dapat diterapkan untuk meningkatkan sistem remediasi—misalnya, penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan beberapa polutan paling umum dalam air. Dalam tinjauan ini, kami membahas pentingnya teknik fitoremediasi air untuk polutan logam berat (HM), menganalisis studi sebelumnya, spesies tumbuhan spesifik, proses biologis, teknologi yang dikembangkan berdasarkan paten, serta kebutuhan dan kesenjangan penelitian saat ini.

## **PENGHILANGAN POLUTAN DARI AIR LIMBAH OLEH SPESIES TANAMAN**

Teknologi fitoremediasi adalah pendekatan hijau yang sedang berkembang untuk mendeteksi, menguraikan, dan menghilangkan berbagai jenis polutan dari lingkungan. Berbagai jenis kontaminan yang menyebabkan efek berbahaya pada kesehatan manusia dan sistem biologis lainnya dihilangkan menggunakan spesies tanaman. Spesies tanaman ini menyerap polutan dari lingkungan dan mendetoksifikasi efek toksiknya. Karena sifatnya yang ramah lingkungan, pendekatan ini memiliki keunggulan dibandingkan teknik tradisional, yang menyebabkan efek berbahaya pada sistem biologis dan lingkungan (Seyoum *et al.*, 2021). Beberapa mekanisme terlibat dalam remediasi polutan dari air, terutama kontaminan logam, untuk mengubahnya menjadi senyawa tidak beracun, yang mengarah pada penghilangan limbah dari air. Mekanisme ini meliputi fitostabilisasi, rizodegradasi, fitofiltrasi (juga disebut rizofiltrasi), fitoekstraksi, fotodegradasi, fitovolatilisasi, dan fitoakumulasi, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.1.



Gambar 3.1. Diagram umum proses fitoremediasi dalam air (Basit *et al.*, 2021, Copyright gambar oleh Springer Link)

Pada fitostabilisasi, mekanisme akumulasi atau adsorpsi digunakan. Dalam pendekatan ini, kontaminan dalam air tanah atau tanah diadsorpsi pada akar atau terakumulasi di rizosfer untuk mencegah pergerakan polutan dari satu tempat ke tempat lain di lingkungan. Sedangkan pada kasus rizodegradasi, polutan, terutama logam berat dan limbah organik, diuraikan dan dipecah di rizosfer dan diubah menjadi senyawa yang tidak beracun atau kurang beracun. Proses ini juga ditingkatkan dengan menggunakan berbagai jenis mikroorganisme (Ganiyu *et al.*, 2020). Pendekatan rizofiltrasi juga menggunakan mekanisme yang sama dengan fitoremediasi. Namun, dalam hal ini, polutan diserap oleh akar tanaman. Fitodegradasi mengarah pada penguraian limbah atau polutan melalui cara metabolik. Dalam proses ini, tanaman menyerap logam atau limbah dari lingkungan atau air limbah dan menguraikannya menjadi

senyawa tidak beracun dengan bantuan berbagai enzim. Proses ini juga dikenal sebagai fitotransformasi. Dalam pendekatan fitovolatilisasi, tanaman menyerap berbagai jenis air limbah dan mengubahnya menjadi senyawa tidak beracun. Kemudian, senyawa tidak beracun ini dilepaskan ke atmosfer melalui daun melalui proses transpirasi. Demikian pula, ketika limbah disimpan di berbagai bagian tanaman, seperti akar, batang, dan daun, proses ini disebut fitoakumulasi. Berbagai jenis spesies tanaman telah digunakan untuk menghilangkan berbagai jenis logam berat, limbah organik, dan jenis kontaminan lainnya.

Tabel 3.1. Macam-macam teknik fitoremediasi

<b>Teknik</b>	<b>Aplikasi</b>	<b>Kontaminasi</b>	<b>Mekanisme</b>	<b>Deskripsi</b>	<b>Bagian Akumulasi</b>	<b>Ref</b>
Fitodesalinasi	Tanah	Organik, garam	Pengurangan garam melalui konversi	Penghilangan garam dari tanah oleh tanaman halofit	Dalam jaringan tanaman	Miranda <i>et al.</i> , 2021
Rizodegradasi	Tanah	Anorganik, organik	Akumulasi di rizosfer	Degradasi organik melalui mikroorganisme rizosfer	Rizosfer	Li <i>et al.</i> , 2020
Fitofiltrasi rizofiltrasi	Air	Organik, anorganik, logam berat	Adsorpsi, absorpsi	Pengambilan polutan dari air yang terkontaminasi oleh tanaman air	Bagian udara atau akar	Pang <i>et al.</i> , 2023
Fitodegradasi fitotransformasi	Tanah dan air	Organik	Degradasi di rizosfer tanaman	Degradasi organik oleh enzim tanaman	Dalam jaringan tanaman	Kaur <i>et al.</i> , 20
Fitoekstraksi fitoakumulasi	Tanah dan air	Logam berat dan anorganik	Hiperakumulasi	Akumulasi polutan oleh akar dan memindahkannya ke bagian atas tanaman	Tunas	Kanwar <i>et al.</i> , 2020
Fitostabilisasi	Air dan tanah	Logam berat dan anorganik	Presipitasi, sorpsi, kompleksasi	Pembatasan mobilitas dan aksesibilitas polutan di tanah oleh akar tanaman	Pengurangan di rizosfer	Zine <i>et al.</i> , 2020
Fitovolatilisasi	Air dan tanah	Berbagai logam berat dan organik	Volatilisasi oleh daun	Konversi polutan menjadi bentuk yang mudah menguap	Pelepasan ke atmosfer	Zayed <i>et al.</i> , 2020

## **APLIKASI FITOREMEDIASI DALAM PENGENDALIAN POLUSI TANAH**

Fitoremediasi adalah metode penggunaan tanaman hijau untuk menghilangkan, mengekstraksi, mengurangi, atau mendetoksifikasi polutan dari tanah dan air. Metode ini telah mendapatkan perhatian luas sebagai alternatif yang efektif dan ramah lingkungan dibandingkan dengan teknik-teknik konvensional dalam pengelolaan polusi tanah (Li *et al.*, 2020). Fitoremediasi menawarkan berbagai keuntungan seperti biaya yang relatif rendah, minimnya gangguan terhadap lingkungan, dan potensi untuk diterapkan dalam skala besar. Artikel ini akan membahas berbagai aplikasi fitoremediasi dalam pengendalian polusi tanah, dengan fokus pada mekanisme, jenis tanaman yang digunakan, serta tantangan dan prospek masa depannya.

### **Mekanisme Fitoremediasi**

Fitoremediasi mencakup beberapa mekanisme berbeda yang digunakan tanaman untuk mengatasi polusi tanah. Mekanisme ini meliputi fitodegradasi, fitostabilisasi, fitoekstraksi, dan rizofiltrasi.

- 1) Fitodegradasi: Tanaman memetabolisme polutan organik menjadi senyawa yang kurang berbahaya melalui aktivitas enzimatik. Enzim yang dihasilkan oleh akar tanaman membantu dalam proses degradasi polutan.
- 2) Fitostabilisasi: Tanaman mengurangi mobilitas polutan dalam tanah melalui penyerapan dan pengikatan pada akar, yang mencegah polutan bergerak ke lapisan tanah yang lebih dalam atau menyebar melalui aliran air.
- 3) Fitoekstraksi: Tanaman menyerap polutan logam berat dari tanah dan menumpuknya di bagian-bagian tanaman seperti daun dan batang. Tanaman hiperakumulator digunakan secara khusus untuk tujuan ini karena kemampuan mereka untuk menyerap logam dalam jumlah besar.

- 4) Rizofiltrasi: Akar tanaman digunakan untuk menyaring polutan dari air yang mengalir melalui sistem akar, sangat berguna untuk air limbah atau air yang terkontaminasi.

### **Jenis Tanaman yang Digunakan**

Pemilihan tanaman yang tepat sangat penting dalam aplikasi fitoremediasi. Tanaman yang digunakan harus memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap kondisi tanah yang terkontaminasi dan kemampuan untuk tumbuh dengan cepat. Beberapa tanaman yang sering digunakan dalam fitoremediasi meliputi:

- 1) Poplar dan Willow: Kedua jenis pohon ini terkenal karena kemampuan mereka untuk mengekstraksi logam berat dan menguraikan polutan organik. Akar mereka yang dalam dan cepat tumbuh membuatnya sangat efektif dalam fitoremediasi.
- 2) Tanaman Hiperakumulator: Tanaman seperti *Thlaspi caerulescens* (pennycress) dan *Pteris vittata* (paku-pakuan) mampu menyerap logam berat dalam jumlah besar dari tanah. Mereka digunakan secara khusus untuk fitoekstraksi.
- 3) Rumput Vetiver: Rumput ini memiliki sistem akar yang sangat kuat dan mampu menstabilkan tanah, membuatnya ideal untuk fitostabilisasi.
- 4) Tanaman Leguminosa: Tanaman seperti alfalfa dan clover tidak hanya membantu dalam fitoremediasi melalui fitoekstraksi dan fitostabilisasi, tetapi juga memperkaya tanah dengan nitrogen, meningkatkan kesehatan tanah secara keseluruhan.

### **Aplikasi dalam Pengendalian Polusi Tanah**

Fitoremediasi telah diterapkan dalam berbagai situasi untuk mengendalikan polusi tanah. Beberapa aplikasi utama meliputi:

- 1) Pengelolaan Lahan Terkontaminasi Industri: Tanah yang terkontaminasi oleh aktivitas industri seperti pabrik kimia, penambangan, dan peleburan logam berat sering kali memiliki tingkat polusi yang tinggi. Fitoremediasi menawarkan solusi yang efektif untuk mengurangi konsentrasi polutan di tanah tersebut.
- 2) Pemulihan Lahan Pertanian: Penggunaan pestisida dan pupuk berlebihan dapat menyebabkan akumulasi bahan kimia berbahaya di tanah pertanian. Fitoremediasi dapat membantu dalam mengurangi tingkat polusi ini, memungkinkan lahan pertanian untuk digunakan kembali dengan aman.
- 3) Pengendalian TPA (Tempat Pembuangan Akhir): TPA sering kali menjadi sumber polusi tanah karena limbah beracun yang meresap ke dalam tanah. Tanaman yang digunakan dalam fitoremediasi dapat membantu dalam mengurangi konsentrasi polutan di sekitar area TPA.
- 4) Pemulihan Daerah Terkena Tumpahan Minyak: Tanah yang terkontaminasi oleh tumpahan minyak bisa sangat beracun dan sulit untuk dipulihkan. Tanaman yang digunakan dalam fitodegradasi dapat membantu menguraikan senyawa minyak menjadi produk yang kurang berbahaya.

### **Tantangan dalam Fitoremediasi**

Meskipun fitoremediasi memiliki banyak keuntungan, terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi untuk meningkatkan efektivitasnya:

- 1) Waktu yang Diperlukan: Proses fitoremediasi bisa memakan waktu yang cukup lama dibandingkan dengan teknik-teknik konvensional. Dalam beberapa kasus, dibutuhkan beberapa tahun untuk melihat hasil yang signifikan.

- 2) Penanganan Biomassa yang Terkontaminasi: Tanaman yang telah menyerap polutan perlu ditangani dengan hati-hati untuk mencegah penyebaran kembali polutan. Ini termasuk proses panen, pengolahan, dan pembuangan biomassa tanaman.
- 3) Variabilitas Efektivitas: Tidak semua jenis polutan dapat diatasi dengan fitoremediasi. Efektivitas metode ini sangat tergantung pada jenis polutan, konsentrasi, dan kondisi tanah.
- 4) Keterbatasan Pengetahuan: Masih banyak yang perlu dipelajari tentang interaksi antara tanaman, tanah, dan polutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan teknik fitoremediasi dan mengeksplorasi potensi tanaman baru.

### **Prospek Masa Depan**

Masa depan fitoremediasi tampak menjanjikan dengan banyaknya penelitian yang sedang dilakukan untuk mengatasi tantangan yang ada. Beberapa bidang yang menjanjikan untuk penelitian lebih lanjut meliputi:

- 1) Pengembangan Tanaman Rekayasa Genetika: Dengan memodifikasi gen tanaman, kemampuan mereka dalam menyerap dan menguraikan polutan dapat ditingkatkan. Ini bisa membuka peluang baru dalam fitoremediasi.
- 2) Integrasi dengan Mikroorganisme: Menggabungkan tanaman dengan mikroorganisme yang efektif dalam biodegradasi dapat meningkatkan hasil fitoremediasi. Mikroorganisme dapat membantu dalam memecah polutan menjadi bentuk yang lebih mudah diserap oleh tanaman.
- 3) Pemantauan dan Pemodelan: Penggunaan teknologi canggih seperti sensor dan pemodelan komputer dapat membantu dalam memantau efektivitas fitoremediasi dan mengoptimalkan kondisi untuk hasil yang lebih baik.

- 4) Penerapan pada Polusi Radioaktif: Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi penggunaan fitoremediasi dalam menangani polusi radioaktif, yang hingga kini masih merupakan area yang belum banyak dijelajahi.

## **KESIMPULAN**

Tumbuhan telah menunjukkan efektivitasnya dalam remediasi polutan di air limbah, yang menyoroti potensi peran penting mereka dalam pengelolaan lingkungan di masa depan. Ilmuwan dapat mengevaluasi kontribusi spesifik tumbuhan dalam menghilangkan kontaminan dari air limbah, yang seringkali berada di luar kemampuan organisme kecil dan mikroorganisme. Tinjauan ini telah mengeksplorasi jalur baru fitoremediasi, dengan menangani berbagai jenis kontaminan yang ada dalam jumlah signifikan di air limbah yang berdampak merugikan pada lingkungan dan kesehatan manusia. Untuk lebih meningkatkan efisiensi fitoremediasi, ilmuwan harus mempertimbangkan untuk mengintegrasikan mikroorganisme dengan tumbuhan. Mikroorganisme memiliki sejarah panjang dalam biodegradasi dan remediasi polutan, dan penggunaan sinergis mereka dengan tumbuhan dapat menghasilkan hasil yang lebih baik. Saat ini, terdapat kesenjangan dalam penerapan tumbuhan untuk menghilangkan unsur radioaktif; ini mewakili area yang menjanjikan untuk penelitian di masa depan. Fitoremediasi menonjol karena efektivitas biayanya, ramah lingkungan, dan potensinya untuk aplikasi skala besar. Ini menawarkan pendekatan berkelanjutan untuk mengelola kontaminan air limbah, sehingga melindungi ekosistem dan kesehatan manusia. Penelitian di masa depan harus fokus pada pengoptimalan teknik fitoremediasi, mengeksplorasi potensi berbagai spesies tumbuhan, dan mengintegrasikan sistem biologis untuk menangani berbagai jenis polutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agoro, M. A., Adeniji, A. O., Adefisoye, M. A., & Okoh, O. O. (2020). Heavy metals in wastewater and sewage sludge from selected municipal treatment plants in Eastern Cape Province, South Africa. *Water*, *12*(10), 2746.
- Barakat, A., Ennaji, W., Krimissa, S., & Bouzaid, M. (2020). Heavy metal contamination and ecological-health risk evaluation in peri-urban wastewater-irrigated soils of Beni-Mellal city (Morocco). *International journal of environmental health research*, *30*(4), 372-387.
- Basit, A., Shah, S. T., Ullah, I., Muntha, S. T., & Mohamed, H. I. (2021). Microbe-assisted phytoremediation of environmental pollutants and energy recycling in sustainable agriculture. *Archives of Microbiology*, *203*(10), 5859-5885.
- Kanwar, V. S., Sharma, A., Srivastav, A. L., & Rani, L. (2020). Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 44835-44860.
- Kaur, R., Singh, D., Kumari, A., Sharma, G., Rajput, S., Arora, S., & Kaur, R. (2021). Pesticide residues degradation strategies in soil and water: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-24.
- Kinuthia, G. K., Ngure, V., Beti, D., Lugalia, R., Wangila, A., & Kamau, L. (2020). Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: community health implication. *Scientific reports*, *10*(1), 8434.
- Li, X., Song, Y., Bian, Y., Gu, C., Yang, X., Wang, F., & Jiang, X. (2020). Insights into the mechanisms underlying efficient Rhizodegradation of PAHs in biochar-amended soil: From microbial communities to soil metabolomics. *Environment International*, *144*, 105995.

- Miranda, M. F. A., Freire, M. B. G. D. S., Almeida, B. G. D., Freire, F. J., Pessoa, L. G. M., & Freire, A. G. (2021). Phytodesalination and chemical and organic conditioners to recover the chemical properties of saline-sodic soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85(1), 132-145.
- Pang, Y. L., Quek, Y. Y., Lim, S., & Shuit, S. H. (2023). Review on phytoremediation potential of floating aquatic plants for heavy metals: a promising approach. *Sustainability*, 15(2), 1290.
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of The Total Environment*, 760, 144026.
- Seyoum, M. M., Lichtenberg, R., Orlofsky, E., Bernstein, N., & Gillor, O. (2022). Antibiotic resistance in soil and tomato crop irrigated with freshwater and two types of treated wastewater. *Environmental Research*, 211, 113021.
- Seyoum, M. M., Obayomi, O., Bernstein, N., Williams, C. F., & Gillor, O. (2021). Occurrence and distribution of antibiotics and corresponding antibiotic resistance genes in different soil types irrigated with treated wastewater. *Science of the Total Environment*, 782, 146835.
- Zayed, A., Pilon-Smits, E., deSouza, M., Lin, Z. Q., & Terry, N. (2020). Remediation of selenium-polluted soils and waters by phytovolatilization. In *Phytoremediation of contaminated soil and water* (pp. 61-83). CRC press.
- Zine, H., Midhat, L., Hakkou, R., El Adnani, M., & Ouhammou, A. (2020). Guidelines for a phytomanagement plan by the phytostabilization of mining wastes. *Scientific African*, 10, e00654.

## PROFIL PENULIS



### **Said Ali Akbar, S.Pd., M.Si**

Penulis lahir di Banda Aceh, 28 Februari 1991. Menempuh pendidikan S1 jurusan pendidikan kimia di FKIP Universitas Syiah Kuala (2008), S2 program studi Kimia di FMIPA Institut Teknologi Bandung (2013). Aktif mengajar olimpiade kimia (2011 sampai sekarang) pada beberapa sekolah favorit di Aceh seperti SMAN Modal Bangsa, SMAN 10 Fajar Farapan, MAN 1

Banda Aceh, Teuku Nyak Arif Fatih Bilingual School, dan lainnya. Pernah menjadi guru di MAN 1 Banda Aceh (2020-2021). Pernah menjadi dosen tetap non PNS pada program studi pendidikan kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Serambi Mekkah (2016-2021). Kemudian sejak tahun 2022 sampai sekarang menjadi dosen PNS pada program studi Budidaya Perairan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Syiah Kuala. Selain itu, juga aktif dalam berbagai penelitian dan pengabdian masyarakat yang diselenggarakan oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemdikbudristek) maupun LPPM Universitas Syiah Kuala.

## **BAB 4**

# **BIOTEKNOLOGI TANAH DAN REKLAMASI LAHAN TERDEGRADASI**

Hasrianti  
Universitas Terbuka, Tangerang Selatan  
E-mail: hasrianti@ecampus.ut.ac.id

### **PENDAHULUAN**

Perkembangan bioteknologi semakin pesat dan berperan penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan. Bioteknologi merupakan cabang ilmu yang membahas tentang pemanfaatan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, virus ataupun produk dari mikroorganisme tersebut seperti alkohol dan enzim yang digunakan dalam proses produksi untuk menghasilkan barang dan jasa yang diinginkan. Bioteknologi memberikan manfaat besar bagi kehidupan manusia, yaitu berperan dalam peningkatan kesejahteraan, peningkatan produk pangan, peningkatan produk kesehatan, penciptaan individu baru melalui teknik rekayasa genetika dan pengelolaan lingkungan (Ningsih dkk, 2021).

Salah satu bentuk penerapan bioteknologi dalam pengelolaan lingkungan adalah bioteknologi tanah. Dalam penerapannya, bioteknologi tanah memanfaatkan organisme tanah untuk memperbaiki sifat tanah, meningkatkan unsur hara tanah, mempercepat proses penguraian bahan organik dalam tanah, serta mendegradasi dan membersihkan bahan pencemar dalam tanah. Jenis-jenis organisme yang digunakan dalam bioteknologi tanah yaitu bakteri dan jamur. Beberapa genus bakteri tanah yang berperan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah seperti *Pseudomonas* dan *Rhizobium*. Jenis

jamur yang digunakan dalam bioteknologi tanah yaitu Mikoriza dan Trichoderma.

Tanah merupakan komponen penting ekosistem namun seringkali kualitasnya dirusak oleh aktivitas manusia mengakibatkan kualitas tanah menjadi terdegradasi. Kualitas dan produktivitas tanah menentukan kehidupan tumbuhan dan hewan yang ada dalam suatu ekosistem (Asril dkk, 2022). Tanah atau lahan sebagai sumber daya alam memegang peran ekologis, sosial dan ekonomi untuk kelangsungan hidup dan kesejahteraan manusia dan untuk pemeliharaan seluruh komponen ekosistem darat. Degradasi lahan di Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya. Hal tersebut berdampak terhadap kondisi lapisan permukaan tanah, pertumbuhan vegetasi, penurunan produksi pangan, mata pencaharian dan produksi serta penyediaan barang dan jasa ekosistem lainnya. Selain itu, degradasi lahan juga memberikan dampak buruk terhadap kesehatan masyarakat seperti peningkatan ancaman malnutrisi, krisis air dan makanan, sanitasi yang buruk, dan timbulnya berbagai penyakit menular (WHO, 2020). Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi tingkat degradasi lahan adalah reklamasi lahan.

Reklamasi lahan terdiri dari serangkaian prosedur yang dilakukan untuk pemulihan ekosistem, pengembangan ekonomi, pelestarian sumberdaya alam, manfaat sosial dan pengendalian pencemaran lingkungan. Secara umum, reklamasi lahan dibagi dalam beberapa kelompok yaitu :

1. Reklamasi lahan secara fisik

Reklamasi lahan secara fisik dilakukan dengan metode *infilling*, pengerukan tanah, pengurasan dan irigasi pada lahan kering.

2. Reklamasi lahan secara kimia

Reklamasi lahan secara kimia dilakukan dengan penambahan bahan kimia untuk mengikat bahan pencemar

melalui proses koagulasi dan flukolasi. Metode ini lebih tepat digunakan untuk reklamasi air limbah sebelum air limbah dibuang ke lingkungan dan mencemari tanah.

3. Reklamasi lahan secara biologi

Reklamasi lahan secara biologi dilakukan dengan menggunakan organisme baik organisme mikro (bakteri dan jamur) maupun organisme makro (tanaman) untuk memperbaiki lahan yang terdegradasi.

## **BIOTEKNOLOGI TANAH**

Tanah tersusun dari mineral dan bahan organik yang menentukan kesuburan tanah. Selain mineral, kesuburan tanah juga ditentukan oleh sifat fisika, sifat kimia dan sifat biologi tanah. Sifat fisika tanah meliputi tekstur, bahan induk, kepadatan, porositas, temperatur, warna dan konsistensi tanah. Sifat kimia tanah meliputi derajat keasaman (pH), fosfor (P), kalium (K), nitrogen (N), C-Organik serta reaksi dan proses yang terjadi dalam tanah (Donald, 2019). Sifat biologi tanah seperti makhluk hidup seperti hewan, tumbuhan, manusia, dan mikroorganisme. secara biologi tanah berperan dalam proses dekomposisi bahan organik, mineralisasi, immobilisasi, siklus hara dan berbagai proses lainnya dalam tanah.

Bioteknologi tanah merupakan teknologi pemanfaatan organisme baik makro maupun mikroorganisme tanah untuk memperbaiki sifat dan kualitas tanah. Oleh karena itu, bioteknologi tanah disebut sebagai salah satu teknologi ramah lingkungan dalam mengatasi penurunan kualitas (degradasi) tanah (Endang dkk, 2024). Adapun jenis-jenis organisme yang digunakan dalam bioteknologi tanah antara lain:

1. Bakteri

Mikroorganisme seperti bakteri dalam tanah mampu menguraikan bahan organik dan memecah senyawa-senyawa kompleks. Beberapa genus bakteri tanah yang

berperan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah sebagai berikut:

a. *Pseudomonas*

*Pseudomonas* merupakan bakteri gram negatif bersifat aerob namun sebagian juga bersifat anaerob yang mampu mendegradasi berbagai jenis hidrokarbon. *Pseudomonas* termasuk bakteri kuat yang dapat berkembang pada berbagai kondisi lingkungan. Salah satu jenis bakteri dari genus *Pseudomonas* yang digunakan dalam bioteknologi tanah khususnya di bidang pertanian adalah *Pseudomonas fluorescens*. Beberapa hasil penelitian mengenai penggunaan *P. fluorescens* telah dilakukan antara lain Ichwan dkk (2021) menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi *P. fluorescens*, *Trichoderma* sp, *Aspergillus niger*, *Azobacter* sp, dan *Rhizobium* sp pada Rizobakteri pemicu pertumbuhan tanaman (PGPR) mampu memberikan pengaruh terbaik terhadap pertumbuhan tanaman dan meningkatkan kesuburan tanah. *P. fluorescens* dalam tanah mampu mensintesis senyawa siderofor pengikat mineral besi yang dibutuhkan oleh tanaman dan menghambat pertumbuhan patogen (Advinda *et al*, 2022; Sarkar *et al*, 2022).

b. *Rhizobium*

Genus *Rhizobium* merupakan mikroba tanah termasuk bakteri gram negatif berbentuk basil yang hidup bersimbiosis dengan tanaman kacang-kacangan. Tanaman kacang-kacangan berperan sebagai penyedia nutrisi dan tempat tumbuh bagi *Rhizobium* membentuk bintil akar. *Rhizobium* dalam bintil akar akan menyerap nitrogen bebas dari lingkungan dan mengubah menjadi molekul yang dibutuhkan oleh tanaman. Oleh karena itu, beberapa spesies *rhizobium* banyak digunakan

sebagai pupuk hayati. Beberapa spesies tersebut yaitu *Rhizobium tropici*, *Rhizobium etli* dan *Rhizobium giardinii*. Diantara spesies tersebut telah digunakan sebagai pupuk hayati untuk tanaman kedelai (Purwani & Didik, 2020; Wicaksono & Fitra, 2020).

## 2. Jamur (Fungi)

Sama halnya dengan bakteri, jamur berperan penting dalam pelapukan bahan organik dalam tanah yang tidak mudah diurai oleh bakteri. Jenis jamur yang digunakan dalam bioteknologi tanah sebagai berikut:

### a. Mikoriza

Mikoriza merupakan simbiosis antara jamur dan tanaman. Mikoriza secara umum terdiri dari 3 jenis yakni ektomikoriza, endomikoriza dan ektendomikoriza. Jenis mikoriza yang banyak dimanfaatkan adalah golongan endomikoriza yaitu Vesikular Arbuskular Mikoriza (VAM) yang berasosiasi dengan tanaman kelapa sawit, gandum, cabe, tomat dan melon (Eliyani dkk, 2022; Hazra dkk, 2023). Mikoriza berperan penting dalam pertumbuhan tanaman dengan meningkatkan serapan unsur hara baik unsur hara makro maupun mikro sehingga penggunaan pupuk menjadi efisien, berperan dalam siklus mineral tanah seperti siklus nitrogen, karbon fosfor dan belerang, membantu melindungi tanaman dari kekeringan, membantu produksi hormon pertumbuhan, zat pengatur tumbuh, melindungi tanaman dari unsur toksin dan patogen akar.

### b. Trichoderma

Trichoderma merupakan jamur yang mudah dijumpai pada berbagai macam tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi, permukaan akar tumbuhan

dan pada kayu lapuk atau dedaunan kering. Memiliki ciri morfologi koloni berwarna hijau muda hingga hijau tua, hidup saprofit ataupun parasite pada jamur lain, tumbuh baik pada lingkungan yang menguntungkan. Pada kondisi tertentu yang merugikan, jamur ini dapat membentuk struktur pertahanan berupa klamidospora. Trichoderma dikenal sebagai pupuk biologis tanah (biofungisida) yang efektif mencegah pembusukan pangkal batang tanaman, mencegah penyakit akibat infeksi jamur pada tanaman serta simulator pertumbuhan tanaman seperti tanaman kedelai (Rizal & Titik, 2018; Wisdawati dkk, 2022).

## **DEGRADASI LAHAN**

Hingga saat ini kegiatan eksploitasi lahan semakin marak dilakukan hingga berakibat pada terjadinya degradasi lahan. Degradasi lahan adalah berkurangnya atau hilangnya produktivitas dan kompleksitas biologis atau ekonomi dari suatu lahan. Berbagai faktor penyebab terjadinya degradasi lahan antara lain kondisi cuaca ekstrim, kekeringan, pencemaran tanah akibat aktivitas manusia, deforestasi, erosi, penggunaan pestisida secara berlebihan, berkurangnya unsur hara tanah, pembakaran sisa panen, pencemaran industri, pola tanam monokultur, penggundulan hutan, usaha pertambangan, dan pembangunan tidak ramah lingkungan (Olsson *et al*, 2019). Degradasi lahan dapat didefinisikan berdasarkan beberapa bidang yang berkaitan dengan penggunaan lahan sebagai berikut:

### **1. Bidang pertanian**

Degradasi lahan adalah penurunan produktivitas lahan pertanian akibat buruknya kondisi permukaan tanah (*top soil*). Degradasi lahan pertanian yang terjadi akan menimbulkan semakin meluasnya lahan kritis. Faktor

penyebab degradasi lahan pertanian salah satunya adalah alih fungsi lahan yang disebabkan oleh peningkatan jumlah penduduk, berkembangnya industri, peningkatan pertumbuhan ekonomi, kebutuhan lahan untuk fasilitas umum, kebutuhan lahan perumahan, dan masuknya investor asing khususnya dibidang pembangunan mengakibatkan ketersediaan lahan pertanian semakin menurun.

## 2. Bidang kehutanan

Degradasi lahan adalah penurunan fungsi lahan hutan akibat penggunaan lahan yang melebihi batas kemampuan dari lahan hutan tersebut. Degradasi lahan hutan juga dikenal dengan istilah deforestasi. Deforestasi merupakan kegiatan pembukaan lahan hutan dengan tujuan untuk mengubah fungsi hutan menjadi lahan pertanian, peternakan, pertambangan dan pembangunan lainnya. Angka deforestasi netto kawasan hutan Indonesia tahun 2020 - 2021 mencapai 83.399,3 ha/tahun (BPS, 2023). Dari angka tersebut Indonesia berhasil menurunkan laju deforestasi dari tahun 2020 - 2021 namun pada tahun 2022-2023 laju deforestasi kembali meningkat berdasarkan data dari *Global Forest Watch* yang disajikan pada Gambar berikut:



Sumber: Global Forest Watch, 2024

Gambar 4.1. Laju Deforestasi di Indonesia Tahun 2021 - 2023

### 3. Bidang lingkungan hidup dan pertambangan

Degradasi lahan adalah hilangnya satu atau lebih fungsi lahan yang mengakibatkan menurunnya daya dukung lahan dan berkurangnya kemampuan lahan sebagai penyedia jasa lingkungan. Kondisi tersebut disebabkan oleh aktivitas alami dan aktivitas manusia. Aktivitas alami seperti gempa bumi, erosi, gunung meletus dan lainnya. Aktivitas manusia seperti pertambangan, limbah industri, limbah rumah tangga dan lainnya. Pada aktivitas pertambangan, degradasi lahan terjadi akibat dari penambangan dan pembuangan limbah, reklamasi dan rehabilitasi pasca tambang yang tidak sesuai dengan aturan yang berlaku.

Semakin meluasnya degradasi lahan baik pada kawasan hutan, lahan tidur, lahan kering dan lahan lainnya akan meningkatkan terjadinya kerusakan lingkungan, bencana alam dan perubahan iklim. Melihat penyebab dan dampak degradasi lahan yang sangat kompleks, untuk itu perlu menggunakan teknologi rehabilitasi dan reklamasi lahan yang tepat sesuai dengan mempertimbangkan kondisi lahan baik secara fisik, sosial, maupun kebutuhan ekonomi (Dewi *et al*, 2018). Identifikasi dan inventarisasi lahan terdegradasi berdasarkan tingkat degradasi penting untuk dilakukan, ketersediaan data dan informasi terkait pola sebaran dan karakteristik lahan diperlukan guna mendukung upaya perlindungan masyarakat yang bermukim dan memanfaatkan lahan, mencegah kerusakan lahan dan lingkungan semakin parah serta penyusunan rencana rehabilitasi dan reklamasi lahan lebih terarah dan tepat sasaran.

### **REKLAMASI LAHAN TERDEGRADASI**

Menurut Eghonghon *et al* 2022; Kolesnichenko *et al*, 2023, Reklamasi lahan dilakukan dengan beberapa tahap sebagai berikut:

1. Perencanaan dan desain lahan (*Planning and design*)

Pada tahap perencanaan dan desain, para ahli dan seluruh *stake holders* bekerja sama menyusun dan mengembangkan rencana reklamasi yang akan dilakukan secara komprehensif. Langkah-langkah tahap perencanaan dan desain lahan terdiri dari:

- a. Identifikasi tujuan yaitu dengan menentukan tujuan utama kegiatan reklamasi yang ingin dicapai seperti pemulihan ekosistem, pengembangan ekonomi, pelestarian sumberdaya alam, manfaat sosial atau pengendalian pencemaran lingkungan.
- b. Evaluasi awal yaitu dengan mengevaluasi kondisi lahan yang akan direklamasi mencakup analisis tingkat kerusakan dan kesalahan yang terjadi.
- c. Perencanaan teknis yaitu dengan menyusun rencana teknis untuk mencapai tujuan reklamasi seperti pemulihan tanah, pengembalian bentuk topografi, revegetasi, pembuatan terasering, pemberian tanah pucuk dan lainnya.
- d. Pemilihan metode yaitu dengan memilih metode dan teknologi yang sesuai guna mencapai tujuan reklamasi, menentukan kebutuhan anggaran serta keperluan sumberdaya.

2. Pemulihan lahan (*Land preparation*)

Tahap pemulihan lahan meliputi berbagai tindakan fisik yang dilakukan untuk mengembalikan kondisi lahan menjadi lebih baik. Langkah-langkah yang dilakukan untuk pemulihan lahan antara lain: pembersihan lahan dari limbah, sampah ataupun material lainnya; pengembalian topografi lahan pada kondisi semula; pemulihan tanah dengan memperbaiki struktur tanah, menghilangkan bahan pencemar, ataupun menambahkan nutrisi yang diperlukan oleh lahan; penanaman vegetasi dengan menanam jenis

tanaman yang sesuai dengan kondisi lahan guna memulihkan fungsi ekosistem.

3. Pelaksanaan reklamasi (*Reclamation implementation*)

Tahap pelaksanaan reklamasi mencakup berbagai aktivitas yang telah direncanakan dan akan dilakukan antara lain: konstruksi infrastruktur seperti pembangunan struktur jalan, saluran air serta infrastruktur pendukung lainnya; penanaman vegetasi sesuai yang telah direncanakan; dan pemantauan dampak lingkungan selama kegiatan reklamasi guna memastikan kepatuhan terhadap peraturan dan standar lingkungan yang berlaku.

4. Pemantauan dan evaluasi (*Monitoring and evaluation*)

Tahap pemantauan dan evaluasi dilakukan untuk memastikan keberhasilan dan keberlanjutan reklamasi. Berbagai tindakan yang dilakukan pada tahap pemantauan dan evaluasi antara lain: pemantauan kondisi lingkungan secara berkala seperti kualitas air, biodiversitas dan kondisi tanah; mengevaluasi tujuan reklamasi yang telah tercapai dan belum tercapai; melakukan koreksi dan perbaikan jika ditemukan masalah atau ketidaksesuaian dengan tujuan reklamasi.

5. Pemeliharaan jangka panjang (*Long-Term maintenance*)

Tahap pemeliharaan jangka panjang meliputi perawatan dan pemeliharaan lahan serta vegetasi yang telah direklamasi guna memastikan keberlanjutan serta kesesuaian fungsi dan tujuan reklamasi dalam jangka waktu yang lama. Untuk itu, perlu kerjasama dan pelibatan seluruh *stake holders*, peraturan yang ketat dan cermat dalam memantau proses reklamasi.

# PEMANFAATAN BIOTEKNOLOGI DALAM REKLAMASI LAHAN

## Bioremediasi

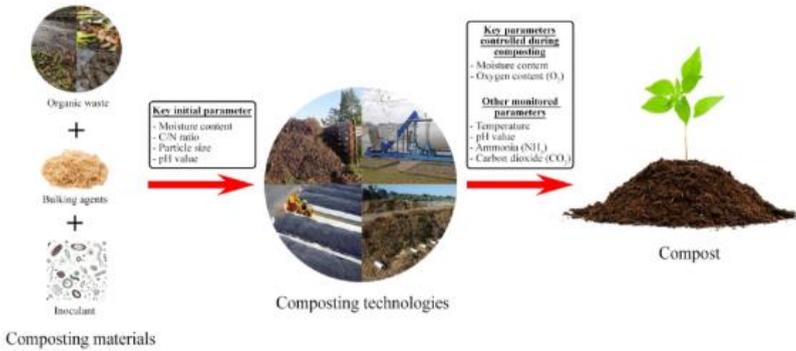
Metode bioremediasi dianggap sebagai salah satu solusi terbaik yang dibutuhkan untuk mengatasi masalah lingkungan. Pemanfaatan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur dalam bioremediasi untuk mengurai bahan pencemar baik senyawa organik maupun senyawa anorganik merupakan metode ramah lingkungan dan mudah diterima oleh masyarakat karena prosesnya yang alami, murah dan tidak menimbulkan efek samping negatif bagi lingkungan (Basuki dkk, 2024; Evitasari dkk, 2020). Metode bioremediasi dapat diaplikasikan pada lingkungan tercemar melalui beberapa pendekatan sesuai dengan kondisi lingkungan (Rachman dkk, 2019). Beberapa pendekatan/teknik bioremediasi yang dapat digunakan untuk reklamasi lahan antara lain:

### 1. *Solid Phase Treatment*

*Solid Phase Treatment* adalah teknik yang paling umum digunakan dalam pengendalian pencemaran tanah yang terkontaminasi minyak bumi. Teknik ini membutuhkan ruang yang lebih luas dan waktu yang lebih lama. Prosesnya dilakukan dengan menambahkan air, nutrisi dan oksigen tertentu pada tanah tercemar. Penambahan inokulum bakteri indigenus dapat dilakukan jika populasi bakteri asli dianggap tidak mampu untuk menghilangkan polutan (Sharma, 2021).

### 2. Pengomposan

Teknik pengomposan dilakukan dengan penambahan bahan organik dalam jumlah besar kemudian diinkubasi selama beberapa minggu secara aerob. Bahan pencemar organik akan terdegradasi selama proses pengomposan berlangsung (Suryo & Gusvia, 2023).

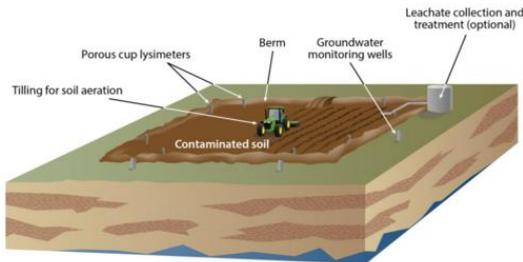


Sumber: Chitsan *et al*, 2022

Gambar 4.2. Proses Pengomposan

### 3. *Landfarming*

Teknik *landfarming* telah banyak digunakan untuk pengolahan tanah atau sedimen yang terkontaminasi bahan kimia atau minyak bumi. Proses *landfarming* dilakukan pada lokasi yang cukup tersedia air namun harus jauh dari aliran air tanah agar tidak terjadi kontaminasi ke air tanah serta dibutuhkan penambahan pupuk nitrogen atau fosfor pada beberapa jenis kontaminasi (Sharma, 2021).



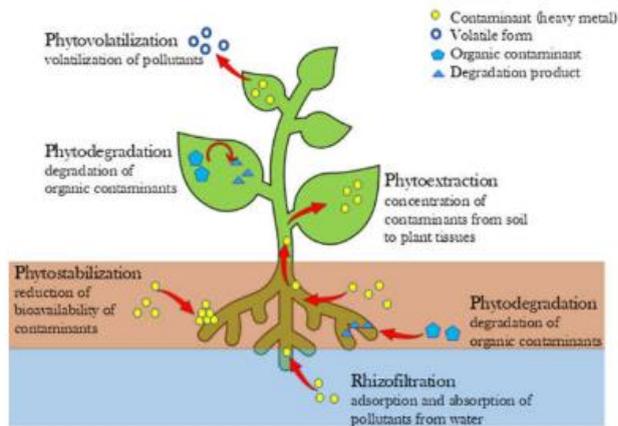
Sumber: USEPA, 1994

Gambar 4.3. Teknik *Landfarming*

## Fitoremediasi

Metode fitoremediasi bertujuan untuk menghilangkan bahan pencemar di dalam tanah dengan menggunakan tanaman.

Metode ini sangat sesuai untuk diaplikasikan pada lahan tanah dengan kelembapan rendah. Beberapa mekanisme fitoremediasi yaitu ekstraksi, degradasi, filtrasi, akumulasi, stabilisasi dan volatilisasi (Sharma, 2021). Bahan pencemar seperti logam berat dapat dihilangkan dengan proses ekstraksi sedangkan bahan pencemar hidrokarbon dapat dihilangkan dengan proses degradasi. Proses fitoremediasi pada setiap bagian tanaman dapat dilihat pada Gambar 4.4 sebagai berikut:



Sumber: Monica *et al*, 2020

Gambar 4.4. Fitoremediasi pada Setiap Bagian Tanaman

Reklamasi lahan dengan metode fitoremediasi telah banyak dilakukan oleh perusahaan di Indonesia. Salah satunya yakni perusahaan tambang nikel PT Inco di Soroako, Sulawesi Tengah yang telah mengembangkan pohon unggulan seperti cempaka dan mahoni. Hasil penelitian Kurniawan dkk, (2019) mengemukakan bahwa tanaman mahoni mampu beradaptasi pada lahan tambang yang terkontaminasi merkuri. Jenis tanaman lain juga digunakan dalam fitoremediasi yaitu tumbuhan mangrove untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di wilayah pesisir (Dinha & Harmin, 2020).

## **KESIMPULAN**

Boteknologi tanah sebagai salah satu teknologi ramah lingkungan dalam mengatasi penurunan kualitas (degradasi) tanah/lahan dengan menggunakan pemanfaatan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur. Bakteri dalam tanah mampu menguraikan bahan organik, dan memecah senyawa-senyawa kompleks. Sama halnya dengan bakteri, jamur berperan penting dalam pelapukan bahan organik dalam tanah yang tidak mudah diurai oleh bakteri. Degradasi lahan adalah berkurangnya atau hilangnya produktivitas dan kompleksitas biologis atau ekonomi dari suatu lahan. Berbagai faktor penyebab terjadinya degradasi lahan antara lain kondisi cuaca ekstrim, kekeringan, pencemaran tanah akibat aktivitas manusia, deforestasi, erosi, penggunaan pestisida secara berlebihan, berkurangnya unsur hara tanah, pembakaran sisa panen, pencemaran industri, pola tanam monokultur, penggundulan hutan, usaha pertambangan, dan pembangunan tidak ramah lingkungan.

Melihat penyebab dan dampak degradasi lahan yang sangat kompleks, untuk itu perlu menggunakan teknologi rehabilitasi dan reklamasi lahan yang tepat dengan mempertimbangkan kondisi lahan baik secara fisik, sosial, maupun kebutuhan ekonomi. Reklamasi lahan dilakukan untuk pemulihan ekosistem, pengembangan ekonomi, pelestarian sumberdaya alam, manfaat sosial dan pengendalian pencemaran lingkungan. Pemanfaatan bioteknologi dalam reklamasi lahan yang paling sering digunakan adalah metode bioremediasi dan fitoremediasi. Bioremediasi dan fitoremediasi dianggap sebagai solusi teknologi yang aman dan ramah lingkungan dalam proses reklamasi lahan terdegradasi. Hal tersebut disebabkan karena dalam metode bioremediasi menggunakan mikroorganisme pengurai sedangkan metode fitoremediasi menggunakan tanaman untuk menghilangkan bahan pencemar dalam tanah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Advinda, L., Putri, D. H., Anhar, A., & Irdawati. (2022). Identification and Characterization of Fluorescent Pseudomonas Producing Active Compounds Controlling Plant Pathogens. *Journal of Agricultural Sciences*, 32(4), 795-804. doi: 10.29133/y.yutbd.1144323.
- Asril, M., Yogi, N., Tioner, P., La Mpia., Hanif, F. R., Adriani, S. A. S., Efbertias, S., Junairiah., Tatuk, T. S., Triastuti., Nurtania, S., Mahyati., & Mazlina. (2022). Ilmu Tanah. Jakarta: Yayasan Kita Menulis.
- Badan Pusat Statistik Republik Indonesia. (2023). Statistik Lingkungan Hidup Indonesia.
- Basuki., Rina., Tioner, P., Rival, R., Nurdin., Maria, P., Andri, P., Benang, P., Ismail, M., & Muhammad, A. A. (2024). Reklamasi dan Bioremediasi Tanah. Jakarta: Yayasan Kita Menulis.
- Chitsan, L., Nicholas, K. C., Xuan, T. B., & Huu, H. N. (2022). Composting and Its Application in Bioremediation of Organic Contaminants. *Bioengineered*, 13(1), 1073-1089. doi: 10.1080/21655979.2021.2017624.
- Dewi, I. L., Widiyanto., Christanti, A., Sudarto., & Syahrul. K. (2018). Relation Between Land Degradation, Biophysical and Social Factors in Lekso Watershed, East Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 5(3), 1283-1291. doi: 10.15243/jdmlm.2018.053.1283.
- Dinha, A. A & Harmin, S. T. (2020). Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di Wilayah Pesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat. *Jurnal Teknik*, Volume 9, Nomor 2, 111-116.

- Donald, L. S. (2019). *Fundamentals of Soil Chemistry*. Wiley Online Library. doi.10.1002/9781119300763.wsts0025.
- Eghonghon, K. U., Uyiosa, O. A., Robert, B. O., Juliana, N. N., Otolorin, A. O., Josep, O. E., Vincent, A. B., Heri, S. K., & Handoko, D. (2022). An Overview of the Emergence and Challenges of Land Reclamation: Issues and Prospect. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022, 1-14. doi: 10.1155/5889823
- Eliyani., Ellok, D. S., & Shindi, A. (2022). Uji Efektivitas Pupuk Hayati Mikoriza terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Tomat (*Lycopersicum esculentum* Mill). *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, Volume 5, Nomor 1, Agustus 2022, hlm. 56-64.
- Endang, S., Dewi, F., Santa, M.L., Wika, A.D., Lily, I., Muhammad, S., Whin, T.M.S., Morgan, O., Siti, L.W., Yusuf, S., & Ranno, M.R. (2024). *Bioteknologi Tanah Jawa Tengah: Eureka Media Aksara*.
- Evitasari., Geo, A. B. S., Farhan, R. H., & Dodi, S. (2020). Karakter Organisme Biologis dalam Bioremediasi-Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan*, Volume 2, Nomor 2, September 2020, hlm. 33-39.
- Global Forest Watch. (2024). *World Resources Institute.degradation: Author*
- Hazra, F., Fatimah, N. I., & Rafid, N. S. (2023). Aplikasi Pupuk Hayati Mikoriza dalam Meningkatkan Fase Pertumbuhan Vegetatif dan Generatif Kacang Tanah (*Arachis hypogea* L.). *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, Volume 10, Nomor 2, hlm. 265-271.
- Ichwan, B., Novita, T., Eliyanti, E., & Masita, E. (2021). Aplikasi Berbagai Jenis Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Cabai Merah. *Jurnal Media Pertanian*, Volume 6, Nomor 1, hlm 1-7.

- Kolesnichenko, E., Melentiev, A., Chursin, A., & Nartova, E. (2023). Land Reclamation Project. E3S Web of Conferences 463, 02033. doi:10.1051/e3sconf/20234630233
- Kurniawan, B., Duryat., Melya, R., dan Slamet, B. Y. (2019). Kemampuan Adaptasi Tanaman Mahoni (*Swietenia macrophylla*) terhadap Cemaran Merkuri pada *Tailing* Penambangan Emas Skala Kecil. *Jurnal Sylva Lestari*, Volume 7, Nomor 3, September 2019, hlm. 359-369.
- Monica, R., Paola, C., Elisa, G., Mery, M., & Debora, F. (2020). Bioremediation Methods for the Recovery of Lead-Contaminated Soils: A Review. *Applied Science*, 10. doi:10.3390/app10103528.
- Ningsih, H., Evan, P. R., Dwiwiyati, N. S., Miranda, F. S., Resti, F., Widya, L., Abdus, S. J., Ria, P., & Erika, J. (2021). Pengantar Bioteknologi. Jakarta: Yayasan Kita Menulis.
- Olsson, L., H. Barbosa, S. Bhadwal, A. Cowie, K. Delusca, D. Flores-Renteria, K. Hermans, E. Jobbagy, W. Kurz, D. Li, D.J. Sonwa, L. Stringer, 2019: Land Degradation. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.006>
- Purwani, J., & Didik, S. (2020). Viabilitas Rhizobium dalam Formula Bahan Pembawa dan Cara Inokulasi dalam Teknik Produksi Pupuk Hayati. *Jurnal Agrosains dan Teknologi*, Volume 5, Nomor 2, Desember 2020, hlm. 99-108.
- Rachman, H. F., Chandra, A. P., Anis, S. L., Mohammad, A., & Yudhi, U. (2019). Bioremediasi Limbah Industri: Pemanfaatan mikroba dalam pengelolaan limbah industri. Malang: Forind.

- Rizal, S., & Titik, D. S. (2018). Peranan Jamur *Trichoderma* sp yang Diberikan terhadap Pertumbuhan Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.). *Jurnal Ilmiah Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, Volume 15, Nomor 1, Juni 2018, hlm. 23-29.
- Sarkar, B., Kumar, C., Pasari, S., & Goswami, B. (2022). Review On *Pseudomonas fluorescens*: A Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Journal of Positive School Psychology*, 6(6), 2701-2709.
- Sharma, I. (2021). Bioremediation Techniques for Polluted Environment: Concept, Advantages, Limitations, and Prospects. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.90453
- Suryo, Y. P & Gusvia, K. D. (2023). Bioremediasi Lahan Tercemar Pestisida dengan Cara Pengomposan di Perkebunan Apel Batu. *Jurnal Sains dan Teknologi*, Volume 2, Nomor 3, Juni 2023, hlm. 419-429.
- United States Environmental Protection Agency. (1994). How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter V Landfarming. EPA 510-B-17-003 October 2017. www. Epa.gov/ust
- Wicaksono, M., & Fitra, S. H. (2020). Pengaruh Interaksi Perlakuan *Rhizobium* dan Pemupukan Nitrogen Terhadap Indeks Panen Terhadap Tiga Varietas Kedelai. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, Volume 7, Nomor 1, hlm. 39-44.
- Wisdawati, E., Kafrawi., Sarmila., & Muh. Raihan. (2022). Pemanfaatan Agens Hayati (*Trichoderma asperellum*) sebagai Biopestisida pada Kelompok Tani Pita Aksi di Desa Pitusunggu, Kabupaten Pangkep. *Jurnal Aplikasi Teknologi Rekayasa dan Inovasi*, Volume 1, Nomor 1, April 2022, hlm. 10-19.

World Health Organization. (2020). *Climate change: land degradation and desertification*. Climate Change and Health (CCH): Author.

## PROFIL PENULIS



### **Dr. Hasrianti, S.Si., M.Si**

Penulis lahir di Gowa, 03 Desember 1987. Lulus S1 di Jurusan Biologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar tahun 2009. Lulus S2 di Program Studi Pengelolaan Lingkungan Hidup Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2012. Sejak S2, penulis mengabdikan diri sebagai dosen mata kuliah Analisis Mengenai Dampak Lingkungan dan Biologi Konservasi di Program Studi Biologi Fakultas Sains Universitas Cokroaminoto Palopo. Pada tahun 2016 memperoleh kesempatan melanjutkan studi S3 di Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang dengan Beasiswa Dosen Unggulan Indonesia (BUDI-DN) dan lulus pada tahun 2021. Pada tahun 2023 lulus sebagai dosen Pegawai Pemerintah dengan Perjanjian Kerja (PPPK) dan saat ini bertugas sebagai dosen tetap Program Studi Magister Studi Lingkungan Sekolah Pascasarjana Universitas Terbuka mengampu mata kuliah Ekologi. Aktif menjadi tutor online mata kuliah Pengelolaan Sumber Daya Air dan Analisis Sumber Daya Alam di Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka. Selain mengajar, penulis juga aktif melaksanakan kegiatan penelitian, pengabdian dan publikasi terkait bidang ilmu lingkungan.



## **BAB 5**

# **BIOTEKNOLOGI DALAM MANAJEMEN SAMPAH**

Aris Sunandar  
Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung  
E-mail: arissunandar@upi.edu

### **PENDAHULUAN**

Tantangan pengelolaan sampah semakin meningkat seiring dengan laju pertumbuhan populasi dan tingkat urbanisasi yang pesat di seluruh dunia. Data terbaru menunjukkan bahwa produksi sampah global diperkirakan akan meningkat dari 2,01 miliar ton per tahun pada tahun 2016 menjadi 3,40 miliar ton per tahun pada tahun 2050 (K. Kawai & Tasaki, 2016; Kaza et al., 2018). Tren urbanisasi yang semakin tinggi, terutama di negara-negara berkembang, berkontribusi signifikan terhadap lonjakan volume sampah yang dihasilkan (Ferronato & Torretta, 2019). Metode pengelolaan sampah konvensional, seperti pembuangan di *landfill* dan pembakaran, telah terbukti menimbulkan berbagai masalah lingkungan dan kesehatan yang serius. Pembuangan sampah di *landfill* dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca, kontaminasi air tanah, dan pencemaran tanah, serta menjadi sumber berbagai penyakit menular (Guerrero et al., 2013; Mmereki et al., 2016). Pembakaran sampah secara terbuka atau di fasilitas yang tidak memadai dapat menghasilkan partikulat, logam berat, dan senyawa organik berbahaya yang mencemari udara dan menimbulkan masalah kesehatan pernapasan (Ferronato & Torretta, 2019; Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

Bioteknologi telah muncul sebagai pendekatan yang sangat menjanjikan untuk mencari solusi yang lebih berkelanjutan dalam mengatasi permasalahan pengelolaan sampah. Berbagai

aplikasi bioteknologi, seperti bioremediasi, biodegradasi, biokonversi, dan bioremining, memiliki potensi untuk menangani berbagai jenis sampah secara lebih efektif dan ramah lingkungan (Castro et al., 2021; El-Sherif et al., 2022; Kuppusamy et al., 2017). Mikroorganisme dapat dimanfaatkan untuk mendegradasi komponen berbahaya, mengkonversi limbah menjadi produk bernilai, serta mengekstraksi logam berharga dari sampah elektronik (Danso et al., 2019; El-Sherif et al., 2022). Integrasi proses bioteknologi dengan teknologi lain, seperti adsorpsi, filtrasi, dan elektrodposisi, juga dapat meningkatkan efisiensi dan membuka peluang untuk pemanfaatan sumber daya yang terkandung dalam sampah secara optimal. Potensi bioteknologi dalam manajemen sampah yang berkelanjutan terus dieksplorasi secara intensif.

Tinjauan ini bertujuan untuk menyediakan gambaran komprehensif tentang pemanfaatan bioteknologi dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Pembahasan akan mencakup berbagai aplikasi bioteknologi yang dapat diterapkan, seperti bioremediasi, biodegradasi, biokonversi, dan bioremining, serta mengidentifikasi aspek-aspek kunci yang perlu dipertimbangkan, seperti efisiensi proses, keekonomian, dan tantangan teknis. Selain itu, prospek masa depan pemanfaatan bioteknologi dalam manajemen sampah akan diuraikan, termasuk potensi integrasi dengan teknologi lain untuk menciptakan sistem yang lebih komprehensif dan inovatif (Farid et al., 2023).

Meskipun bioteknologi menawarkan potensi dalam manajemen sampah yang efektif dan ramah lingkungan, terdapat tantangan yang harus diatasi untuk mengoptimalkan pemanfaatannya. Secara teknis, diperlukan peningkatan efisiensi proses, penyempurnaan teknologi, dan penyesuaian kondisi operasional dengan karakteristik sampah local. Secara ekonomi, biaya awal investasi dan operasional yang tinggi menjadi

kendala, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan keekonomian melalui teknologi yang lebih murah dan pemanfaatan produk sampingan bernilai (Danso et al., 2019) Selain itu, tantangan sosial seperti penerimaan masyarakat, infrastruktur yang memadai, dan kebijakan yang mendukung juga perlu dipertimbangkan agar implementasi bioteknologi dalam pengelolaan sampah dapat berjalan efektif dan berkelanjutan (Ferronato & Torretta, 2019; Mmereki et al., 2016).

## **APLIKASI BIOTEKNOLOGI DALAM MANAJEMEN SAMPAH BIOREMEDIASI DAN BIODEGRADASI POLUTAN SINTETIS**

Mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, telah terbukti memiliki kemampuan untuk mendegradasi berbagai jenis plastik melalui berbagai mekanisme enzimatik yang kompleks (Danso et al., 2019; Skariyachan et al., 2017). Beberapa spesies mikroba dapat menghasilkan enzim ekstraseluler yang mampu memecah struktur polimer plastik, seperti poliuretanase, lipase, dan esterase, sehingga dapat mengkonversi plastik menjadi senyawa yang lebih sederhana (Ali et al., 2021; Wierckx et al., 2019). Selain itu, mikroorganisme juga dapat memanfaatkan plastik sebagai sumber karbon dan energi untuk pertumbuhannya, melalui proses biodegradasi dan biokonversi (Paço et al., 2017) Potensi biodegradasinya ini telah menjadikan mikroorganisme sebagai kandidat yang menjanjikan untuk menangani isu pencemaran plastik secara efektif dan ramah lingkungan.

Upaya untuk meningkatkan efisiensi biodegradasi plastik telah dilakukan melalui isolasi dan rekayasa genetik mikroorganisme pengurai plastik. Berbagai studi telah menunjukkan bahwa isolasi mikroba yang memiliki kemampuan degradasi plastik yang baik, seperti bakteri dari genus

*Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Ideonella*, dapat menjadi dasar untuk meningkatkan kinerja proses biodegradasi. Selanjutnya, teknik rekayasa genetik memungkinkan perbaikan dan peningkatan ekspresi gen pengkode enzim-enzim kunci dalam metabolisme plastik, seperti oksidoreduktase, hidrolase, dan depolimerasi (F. Kawai et al., 2020; Tanasupawat et al., 2016). Melalui pendekatan ini, karakteristik mikroba pengurai plastik, seperti laju degradasi, spektrum substrat, dan stabilitas enzim, dapat dioptimalkan untuk mencapai efisiensi biodegradasi yang lebih tinggi. Integrasi isolasi dan rekayasa genetik mikroba akan semakin penting dalam upaya mengembangkan teknologi bioremediasi plastik yang lebih efektif di masa depan.

Mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, tidak hanya memiliki kemampuan untuk mendegradasi berbagai jenis plastik melalui mekanisme enzimatik yang kompleks (Danso et al., 2019; Skariyachan et al., 2017; Wierckx et al., 2019), tetapi juga telah terbukti mampu mendegradasi dan menghilangkan berbagai jenis senyawa kimia beracun lainnya, seperti pestisida, pewarna, dan pelarut organik. Melalui proses bioremediasi, mikroba dapat menggunakan senyawa-senyawa tersebut sebagai sumber nutrisi dan energi, sehingga dapat mereduksi atau bahkan mendestruksi polutan yang berbahaya. Kemampuan ini dapat ditingkatkan lebih lanjut melalui rekayasa genetik, dan aplikasi bioremediasi dapat diterapkan baik secara *in situ* maupun *ex situ*, tergantung pada karakteristik kontaminan dan kondisi lingkungan (Bose et al., 2021; Huang et al., 2021; Kumari et al., 2022). Pemanfaatan mikroorganisme dalam proses bioremediasi memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan dapat diintegrasikan dengan pengelolaan sampah untuk mencapai solusi yang komprehensif dalam menghadapi pencemaran lingkungan.

Selain kemampuannya dalam mendegradasi polutan, mikroorganisme juga dapat dimanfaatkan untuk mengkonversi

komponen beracun dalam limbah sintetis menjadi produk yang kurang berbahaya atau bahkan berguna (Megharaj et al., 2011). Proses biokonversi ini melibatkan metabolisme mikroba yang dapat mengubah senyawa-senyawa toksik menjadi senyawa yang lebih stabil atau produk yang dapat dimanfaatkan, seperti biogas, biomassa, atau senyawa intermediet. Sebagai contoh, bakteri dapat mengkonversi pestisida atau pewarna sintetis menjadi CO<sub>2</sub> dan air, atau bahkan menghasilkan produk bernilai tambah seperti bioplastik. Upaya ini tidak hanya mengurangi risiko pencemaran, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan limbah secara lebih efisien dan berkelanjutan. Berbagai jenis mikroba, seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Rhodococcus*, telah terbukti memiliki kemampuan biokonversi yang menjanjikan. Optimalisasi kondisi operasional dan rekayasa genetik dapat meningkatkan efektivitas proses ini. Pemanfaatan biokonversi mikrobiologis dapat menjadi solusi yang komprehensif dalam mengelola limbah sintetis yang mengandung senyawa beracun.

Selain kemampuannya dalam mendegradasi komponen beracun, proses biokonversi mikrobiologis juga dapat dimanfaatkan untuk memulihkan sumber daya berharga, seperti bahan kimia, energi, atau material, dari limbah sintetis (Bose et al., 2021). Melalui metabolisme mikroba, senyawa-senyawa kompleks dalam limbah dapat diubah menjadi produk yang memiliki nilai tambah, seperti biofuel, biogas, atau senyawa kimia industri. Misalnya, bakteri dapat mengkonversi gula dalam limbah menjadi bioetanol sebagai bahan bakar terbarukan, atau menghasilkan polimer mikroba yang dapat dimanfaatkan sebagai bioplastik. Proses ini tidak hanya dapat mengurangi dampak pencemaran, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan limbah secara produktif dan berkelanjutan. Berbagai jenis mikrob, termasuk kelompok bakteri, jamur, dan mikroalga, telah terbukti mampu melakukan biokonversi yang

efektif. Optimalisasi parameter operasional, peningkatan efisiensi enzim, serta rekayasa genetik dapat diterapkan untuk meningkatkan produktivitas dan spektrum sumber daya yang dapat dipulihkan. Implementasi biokonversi yang terintegrasi dalam pengelolaan limbah dapat membuka peluang baru dalam mengembangkan ekonomi sirkular yang lebih ramah lingkungan.

## **PEMANFAATAN BIOMASSA MIKROBA**

Mikroorganisme tidak hanya memiliki kemampuan dalam proses biokonversi dan bioremediasi, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk memproduksi berbagai produk berharga, seperti bioetanol, biobutanol, asam lemak, dan bioplastik, dari biomassa sel mikroba yang dihasilkan (Haider et al., 2019). Melalui proses fermentasi dan ekstraksi, komponen-komponen dalam biomassa mikrob dapat dikonversi menjadi bahan bakar terbarukan, bahan kimia industri, atau polimer biodegradabel. Sebagai contoh, bakteri dan ragi dapat mengkonversi gula menjadi bioetanol, sementara mikroalga dapat dimanfaatkan untuk produksi asam lemak sebagai bahan baku bioplastik. Rekayasa genetik pada mikrob juga dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi konversi substrat menjadi produk yang diinginkan. Teknologi ini tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan bahan kimia sintetis, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi dari biomassa mikroba yang sebelumnya dianggap sebagai limbah. Integrasi produksi biobahan dengan proses bioremediasi dan biokonversi menjadi semakin penting dalam upaya mencapai pengelolaan limbah yang komprehensif dan berkelanjutan.

Biomassa mikroba yang dihasilkan dari proses fermentasi dan konversi katalitik tidak hanya dapat menjadi sumber bahan bakar dan bahan kimia, tetapi juga dapat menjadi sumber berharga berbagai senyawa bernilai tambah, seperti enzim,

pigmen, dan metabolit sekunder (Ashokkumar et al., 2024; Leyva Ramos et al., 2002). Melalui teknik ekstraksi dan pemurnian yang sesuai, komponen-komponen aktif dari sel mikroba dapat dipisahkan dan dimurnikan untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri dan farmasi. Sebagai contoh, enzim mikroba dapat digunakan sebagai katalisator dalam proses bioteknologi, sementara pigmen alami dari mikroalga dapat digunakan sebagai pewarna makanan atau kosmetik. Selain itu, metabolit sekunder mikroba, seperti antibiotik atau antikanker, juga dapat diekstraksi dan dikembangkan sebagai senyawa obat. Pemanfaatan biomassa mikroba secara komprehensif, mulai dari produksi bahan bakar dan bahan kimia hingga ekstraksi senyawa bernilai tambah, dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan menciptakan nilai ekonomi yang lebih tinggi. Integrasi teknologi ini dalam sistem pengelolaan limbah berbasis bioteknologi dapat berkontribusi pada pengembangan ekonomi sirkular yang lebih berkelanjutan.

Pemanfaatan limbah sebagai substrat untuk pertumbuhan mikroba dapat menjadi strategi yang menguntungkan, baik dari segi produksi biomassa berguna maupun pengurangan beban limbah (Chavan et al., 2022; Giroto et al., 2015). Berbagai jenis limbah, seperti limbah pertanian, industri, atau domestik, dapat digunakan sebagai sumber karbon, nitrogen, dan nutrisi lain yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk tumbuh dan berkembang. Melalui proses fermentasi atau kultivasi, biomassa mikroba yang kaya akan protein, lipid, atau karbohidrat dapat dihasilkan. Biomassa ini kemudian dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk menghasilkan produk bernilai tambah, seperti pakan ternak, biofuel, atau senyawa kimia. Pada saat yang sama, pemanfaatan limbah sebagai substrat mikroba juga dapat mengurangi beban pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh akumulasi limbah. Integrasi teknologi ini dalam konsep ekonomi sirkular memungkinkan daur ulang limbah menjadi

sumber daya yang berguna, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Pendekatan berbasis mikroba ini menawarkan solusi yang komprehensif dalam mengelola limbah secara efisien dan berkelanjutan.

### ***BIOREMINING DAN BIOLEACHING***

Sampah elektronik dan limbah padat lainnya mengandung logam-logam berharga, seperti emas, perak, dan palladium, yang dapat diekstraksi melalui proses bioremining menggunakan mikroorganisme (Adetunji et al., 2023; Arshadi & Yaghmaei, 2020; Valix, 2017). Komposisi limbah elektronik yang kaya akan komponen logam mulia menjadikannya sumber daya yang potensial untuk dimanfaatkan. Melalui aktivitas mikroba, logam-logam ini dapat dipisahkan dan dipulihkan dari matriks limbah secara selektif dan efisien. Berbagai jenis mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, dan mikroalga, telah terbukti mampu mengoksidasi, melarutkan, atau mengakumulasi logam berharga melalui mekanisme biosorpsi, bioakumulasi, atau biosintesis. Optimalisasi parameter operasional, serta rekayasa genetik pada mikrob, dapat meningkatkan efektivitas dan produktivitas proses bioremining. Teknologi ini tidak hanya dapat mengurangi dampak lingkungan akibat pembuangan limbah elektronik, tetapi juga memungkinkan perolehan kembali logam-logam yang berharga untuk dimanfaatkan dalam industri. Penerapan bioremining sebagai bagian dari sistem pengelolaan limbah yang terintegrasi dapat mendukung konsep ekonomi sirkular yang berkelanjutan.

Berbagai jenis mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, dapat dimanfaatkan dalam proses bioremining dan bioleaching untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi logam dari berbagai jenis limbah (Anjum et al., 2019; Yang et al., 2014). Mikroorganisme ini memiliki kemampuan alami untuk mengoksidasi, melarutkan, dan mengakumulasi logam-logam berharga melalui

mekanisme biosorpsi, bioakumulasi, atau biosintesis. Sebagai contoh, bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* dapat mengoksidasi sulfida logam untuk melarutkan dan memisahkan logam, sementara jamur *Aspergillus niger* dapat menghasilkan asam organik yang membantu meningkatkan kelarutan logam. Optimalisasi kondisi pertumbuhan mikrob, penggunaan konsorsium mikrob, serta rekayasa genetik dapat meningkatkan efektivitas dan produktivitas proses bioremining. Dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme, teknik bioremining dapat menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan metode ekstraksi kimia tradisional, dengan risiko pencemaran yang lebih rendah. Integrasi proses bioremining ke dalam sistem pengelolaan limbah yang komprehensif dapat menciptakan siklus pemanfaatan logam yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Proses biologi untuk mengekstrak logam berharga dari berbagai jenis limbah dan sumber daya sekunder, seperti debu, terak, dan lumpur dari industri metalurgi dan manufaktur, *sludge* dari industri pelapisan dan penyamakan, katalis bekas pakai, baterai bekas, limbah elektronik, lumpur kota, dan abu terbang dari insinerator. Beberapa bakteri dan jamur telah digunakan untuk proses bioleaching, seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, dan *Penicillium simplicissimum*, yang dapat melarutkan logam melalui mekanisme pengasaman, oksidasi-reduksi, dan pengkkelatan. Proses biohydrometalurgi ini memiliki potensi untuk daur ulang logam dari limbah dan sumber daya sekunder dengan biaya yang lebih rendah dan dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan proses konvensional (Lee & Pandey, 2011)

## **TANTANGAN DAN PROSPEK MASA DEPAN**

Potensi dan tantangan dalam mencapai skala yang lebih besar untuk teknologi elektrokimia mikroba (MET). MET memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk menghasilkan listrik, mendegradasi polutan, atau memproduksi bahan kimia dan bahan bakar. Meskipun MET telah terbukti efektif pada skala laboratorium, terdapat berbagai hambatan teknis, ekonomi, dan operasional untuk mencapai aplikasi pada skala yang lebih luas. Potensi MET, seperti pengolahan air limbah, bioremediasi, dan produksi bioenergi, serta mengidentifikasi tantangan utama dalam memperluas skala MET, termasuk perancangan reaktor, isu-isu teknis, dan kebutuhan investasi modal (Jadhav et al., 2022)

Selain itu, dengan menganalisis studi kasus dan tren penelitian terkini, wawasan tentang strategi yang dapat membantu mempercepat adopsi teknologi MET pada skala yang lebih besar dan mewujudkan potensi penuh dari pendekatan ini. Tantangan dan peluang serupa juga dihadapi dalam upaya meningkatkan skala teknologi sel bahan bakar mikroba (MFC) yang memanfaatkan aktivitas metabolisme mikroorganisme untuk secara langsung menghasilkan listrik. Meskipun MFC telah menunjukkan potensi yang menjanjikan di level laboratorium, terdapat beberapa hambatan teknis, operasional, dan ekonomi yang harus ditangani untuk dapat diterapkan pada skala yang lebih besar. (Senthilkumar et al., 2022)

Meskipun proses bioteknologi, seperti bioremining dan bioleaching, telah menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam skala laboratorium, terdapat beberapa tantangan utama dalam menyesuaikan dan menyalakan proses tersebut ke lingkungan industri atau komersial yang lebih besar. Salah satu tantangan utama adalah mempertahankan efisiensi dan konsistensi proses saat diperbesar skala operasinya. Faktor-faktor seperti homogenitas medium, transfer massa dan panas,

serta kontrol kondisi lingkungan menjadi semakin rumit pada skala yang lebih besar. Selain itu, biaya modal dan operasional yang dibutuhkan untuk infrastruktur dan peralatan industri juga menjadi pertimbangan penting. Optimalisasi desain reaktor, otomasi proses, dan manajemen limbah keluaran harus diperhatikan secara seksama. Tantangan lain termasuk mendapatkan pasokan dan karakteristik bahan baku yang konsisten, serta mengatasi fluktuasi komposisi dan sifat limbah.

Selain itu, integrasi proses bioremining dengan teknologi lain, seperti pemisahan dan pemurnian, juga memerlukan koordinasi yang baik. Menghadapi tantangan-tantangan ini membutuhkan pendekatan holistik dan kolaborasi multidisiplin agar proses bioteknologi dapat diadaptasi dengan sukses dari skala laboratorium ke lingkungan industri yang lebih kompleks. Perbaikan infrastruktur dan integrasi dengan teknologi lain untuk sistem pengolahan sampah terpadu juga menjadi penting, terutama di negara-negara berkembang yang masih menghadapi kekurangan fasilitas pengolahan sampah yang memadai. Kekurangan alokasi anggaran, keterbatasan sumber daya manusia, serta kurangnya kesadaran dan partisipasi masyarakat menjadi faktor-faktor yang menghambat pembangunan infrastruktur pengolahan sampah di negara-negara ini. Investasi yang signifikan diperlukan untuk membangun fasilitas pemrosesan sampah yang modern, efisien, dan terintegrasi, termasuk teknologi seperti bioremining, bioleaching, dan sistem pengolahan limbah yang komprehensif. (Guerrero et al., 2013; Kaza et al., 2018)

## **KESIMPULAN**

Bioteknologi menawarkan solusi yang sangat menjanjikan untuk mengatasi tantangan pengelolaan sampah yang semakin meningkat, khususnya dalam pemulihan logam-logam berharga dari berbagai jenis limbah. Proses bioremining dan bioleaching

yang memanfaatkan kemampuan mikroba dapat secara efektif melarutkan dan memobilisasi logam dari matriks padat. Optimalisasi parameter proses, seperti komposisi medium dan kondisi lingkungan, dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan. Integrasi bioteknologi dengan teknologi lain, seperti elektrodeposisi dan pengendapan kimia, menciptakan sistem yang lebih terintegrasi dan berkelanjutan. Namun, tantangan tetap ada dalam menyesuaikan proses bioteknologi dari skala laboratorium ke skala industri. Penelitian lanjutan diperlukan untuk meningkatkan produktivitas, ketahanan, dan skalabilitas proses. Pengembangan teknologi pemrosesan terpadu dapat mengakomodasi berbagai jenis sampah dan menghasilkan produk bernilai. Upaya peningkatan infrastruktur pengolahan sampah, khususnya di negara-negara berkembang, juga penting untuk mencapai manajemen sampah yang komprehensif dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adetunji, A. I., Oberholster, P. J., & Erasmus, M. (2023). Bioleaching of Metals from E-Waste Using Microorganisms: A Review. In *Minerals* (Vol. 13, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/min13060828>
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A.-G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M., & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *Science of The Total Environment*, 780, 146590. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>
- Anjum, M., Miandad, R., Waqas, M., Gehany, F., & Barakat, M. A. (2019). Remediation of wastewater using various nano-materials. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 4897–4919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.10.004>

- Arshadi, M., & Yaghmaei, S. (2020). Advances in bioleaching of copper and nickel from electronic waste using *Acidithiobacillus ferrooxidans*: evaluating daily pH adjustment. *Chemical Papers*, 74(7), 2211–2227. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01055-y>
- Ashokkumar, V., Chandramughi, V. P., Kumar, G., Ngamcharussrivichai, C., Piechota, G., Igliński, B., Kothari, R., & Chen, W.-H. (2024). Advancements in lignocellulosic biomass: A critical appraisal of fourth-generation biofuels and value-added bioproduct. *Fuel*, 365, 130751. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130751>
- Bose, S., Kumar, P. S., & Vo, D.-V. N. (2021). A review on the microbial degradation of chlorpyrifos and its metabolite TCP. *Chemosphere*, 283, 131447. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131447>
- Castro, L., Blázquez, M. L., González, F., & Muñoz, J. Á. (2021). Biohydrometallurgy for Rare Earth Elements Recovery from Industrial Wastes. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(20). <https://doi.org/10.3390/molecules26206200>
- Chavan, S., Yadav, B., Atmakuri, A., Tyagi, R. D., Wong, J. W. C., & Drogui, P. (2022). Bioconversion of organic wastes into value-added products: A review. *Bioresource Technology*, 344, 126398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126398>
- Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(19). <https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>
- El-Sherif, D. M., Eloffy, M. G., Elmesery, A., Abouzid, M.,

- Gad, M., El-Seedi, H. R., Brinkmann, M., Wang, K., & Al Naggar, Y. (2022). Environmental risk, toxicity, and biodegradation of polyethylene: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81166–81182. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23382-1>
- Farid, M., Farid, S., Aslam, M. A., Azhar, K., Tariq, K., Ali, Z. A., Ijaz, Z., Sarfraz, Z., Khalid, M., & Ahmad, M. (2023). Biotechnological Techniques for Sustainable Waste Management. In M. Hasanuzzaman (Ed.), *Climate-Resilient Agriculture, Vol 2: Agro-Biotechnological Advancement for Crop Production* (pp. 689–712). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37428-9\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37428-9_30)
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Girotto, F., Alibardi, L., & Cossu, R. (2015). Food waste generation and industrial uses: A review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 45, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.008>
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Haider, T. P., Völker, C., Kramm, J., Landfester, K., & Wurm, F. R. (2019). Plastics of the Future? The Impact of Biodegradable Polymers on the Environment and on Society. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 58(1), 50–62. <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management. *Urban Dev Ser Knowl*

Pap, 15, 87–88.

- Huang, Y., Zhang, W., Pang, S., Chen, J., Bhatt, P., Mishra, S., & Chen, S. (2021). Insights into the microbial degradation and catalytic mechanisms of chlorpyrifos. *Environmental Research*, 194, 110660. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110660>
- Jadhav, D. A., Park, S.-G., Pandit, S., Yang, E., Ali Abdelkareem, M., Jang, J.-K., & Chae, K.-J. (2022). Scalability of microbial electrochemical technologies: Applications and challenges. *Bioresource Technology*, 345, 126498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126498>
- Kawai, F., Kawabata, T., & Oda, M. (2020). Current State and Perspectives Related to the Polyethylene Terephthalate Hydrolases Available for Biorecycling. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, 8894–8908. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219514251>
- Kawai, K., & Tasaki, T. (2016). Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18, 1–13. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108698011>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. Van. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:169100123>
- Kumari, S., Kumar, D., & Paul Khurana, S. M. (2022). *Chapter 3 - Microbial degradation of pesticides: microbial potential for degradation of pesticides* (M. P. Shah, S. Rodriguez-Couto, & R. T. B. T.-D. in W. T. R. and P. Kapoor (eds.); pp. 41–67). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85657->

7.00005-5

- Kuppusamy, S., Venkateswarlu, K., Megharaj, M., Mayilswami, S., & Lee, Y. B. (2017). Risk-based remediation of polluted sites: A critical perspective. *Chemosphere*, 186, 607–615. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1456466>
- Lee, J., & Pandey, B. (2011). Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction - A review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 32, 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.010>
- Leyva Ramos, R., Bernal Jacome, L. A., Mendoza Barron, J., Fuentes Rubio, L., & Guerrero Coronado, R. M. (2002). Adsorption of zinc(II) from an aqueous solution onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 90(1), 27–38. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(01\)00333-8](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(01)00333-8)
- Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., & Naidu, R. (2011). Bioremediation approaches for organic pollutants: a critical perspective. *Environment International*, 37(8), 1362–1375. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.003>
- Mmerekhi, D., Baldwin, A. N., & Li, B. (2016). A comparative analysis of solid waste management in developed, developing and lesser developed countries. *Environmental Technology Reviews*, 5, 120–141. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114226048>
- Paço, A., Duarte, K., da Costa, J. P., Santos, P. S. M., Pereira, R., Pereira, M. E., Freitas, A. C., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. A. P. (2017). Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *Science of The Total Environment*, 586, 10–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.017>
- Senthilkumar, K., Naveenkumar, M., Ratnam, M. V., & Samraj, S. (2022). Chapter 2 - A review on scaling-up of microbial

- fuel cell: Challenges and opportunities. In D. A. Jadhav, S. Pandit, S. Gajalakshmi, & M. P. B. T.-S. U. of M. E. S. Shah (Eds.), *Advances in Green and Sustainable Chemistry* (pp. 13–28). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90765-1.00002-2>
- Skariyachan, S., Setlur, A. S., Naik, S. Y., Naik, A., Usharani, M., & Vasist, K. S. (2017). Enhanced biodegradation of low and high-density polyethylene by novel bacterial consortia formulated from plastic-contaminated cow dung under thermophilic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 8443–8457. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:9776975>
- Tanasupawat, S., Takehana, T., Yoshida, S., Hiraga, K., & Oda, K. (2016). *Ideonella sakaiensis* sp. nov., isolated from a microbial consortium that degrades poly(ethylene terephthalate). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66(8), 2813–2818. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001058>
- Valix, M. (2017). 18 - *Bioleaching of Electronic Waste: Milestones and Challenges* (J. W.-C. Wong, R. D. Tyagi, & A. B. T.-C. D. in B. and B. Pandey (eds.); pp. 407–442). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63664-5.00018-6>
- Wierckx, N., Narancic, T., Eberlein, C., Wei, R., Drzyzga, O., Magnin, A., Ballerstedt, H., Kenny, S. T., Pollet, E., Avérous, L., O'Connor, K. E., Zimmermann, W., Heipieper, H. J., Prieto, A., Jiménez, J., & Blank, L. M. (2019). Plastic Biodegradation: Challenges and Opportunities. *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Biodegradation and Bioremediation*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:181345304>

Yang, Y., Chen, S., Li, S., Chen, M., Chen, H., & Liu, B. (2014). Bioleaching waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its kinetics aspect. *Journal of Biotechnology*, 173, 24–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.01.008>

## PROFIL PENULIS



### **Aris Sunandar**

Penulis lahir di kota Indramayu pada tanggal 31 Maret 1989. Penulis menyelesaikan Studi S1 pada tahun 2013 di program studi sarjana Biologi Sains Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati Bandung. Dan saat ini penulis merupakan Tenaga Pendidik dan Kependidikan di salah satu sekolah swasta kabupaten Indramayu sebagai guru dan diberi tugas tambahan sebagai kepala sekolah. Saat ini juga penulis merupakan mahasiswa aktif pascasarjana Program Studi Pendidikan Biologi di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Bandung.

## **BAB 6**

# **BIOPLASTIK DAN ALTERNATIF RAMAH LINGKUNGAN UNTUK PLASTIK KONVENSIONAL**

Rina Ningtyas  
Politeknik Negeri Jakarta  
E-mail: rina.ningtyas@grafika.pnj.ac.id

### **PENDAHULUAN**

Plastik konvensional, juga dikenal sebagai plastik berbasis petro atau berbasis fosil, adalah plastik sintetis yang umumnya berasal dari sumber daya yang tidak dapat diperbaharui. Plastik adalah material yang memiliki peran penting dalam kehidupan manusia karena sifatnya yang serbaguna seperti ringan, tahan lama, fleksibel, dan biaya produksi rendah. Meskipun memiliki banyak manfaat, plastik menyebabkan masalah lingkungan dan kesehatan masyarakat yang serius (Nayanathara Thathsarani Pilapitiya & Ratnayake, 2024). Dimana setiap tahun, sekitar 7.8–8.2 juta ton plastik yang tidak terkelola dengan baik masuk ke lautan. Plastik yang tidak dapat terurai di tempat pembuangan sampah menimbulkan ketidakpastian, yang menghambat produksi sumber daya lahan (Thakur et al., 2018)

Berbagai masalah akibat limbah plastik telah banyak dipublikasinya diantaranya menyebabkan emisi gas rumah kaca, ketahanan dalam lingkungan laut dan daratan, dan polusi (Atiweh et al., 2021). Limbah plastik juga merupakan sumber mikroplastik yang menimbulkan masalah serius bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Mikroplastik yang merupakan bagian plastik yang terfragmentasi sebagai kontaminan potensial di laut dan darat. Limbah mikroplastik di lingkungan laut dan tanah menyebabkan masalah serius bagi sistem kehidupan. Limbah mikroplastik telah dikaitkan dengan berbagai masalah

kesehatan, termasuk gangguan reproduksi, obesitas, masalah organ, dan keterlambatan perkembangan pada anak-anak (Bhatt et al., 2021).

Saat ini, konsumsi plastik terus mengalami peningkatan yang disebabkan pertumbuhan populasi dunia. Hal ini menyebabkan peningkatan jumlah limbah plastik dan tantangan dalam pengelolaannya. Berbagai teknologi pengolahan telah terus dilakukan untuk mengelola limbah plastik, diantaranya tempat pembuangan akhir, daur ulang, pirolisis, pencairan, konstruksi jalan serta produksi beton (Huang et al., 2022). Namun, tetap saja limbah plastik terus bertambah jumlahnya sehingga menimbulkan berbagai permasalahan, terutama terhadap lingkungan.

Salah satu peranan bioteknologi dalam mengurangi limbah plastik adalah pengembangan bioplastik. Bioplastik merupakan kelas bahan polimer yang berkembang pesat dan umumnya dianggap sebagai alternatif terhadap plastik konvensional berbasis petroleum (Atiweh et al., 2021). Penggunaan bioplastik akan membantu dalam keberlanjutan dan pembangunan nasional sehingga membuat lingkungan menjadi lebih sedikit dipenuhi dengan gas rumah kaca dan mengurangi limbah biomassa (Muhammad Shamsuddin, 2017)

Penggunaan bioplastik memiliki pengaruh lingkungan yang beragam. Meskipun bioplastik memiliki potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan penggunaan energi, penggunaan tanah yang signifikan untuk produksi bioplastik dapat menyebabkan kenaikan harga pangan dan dampak negatif terhadap ekosistem bumi. Selain itu, beberapa jenis bioplastik juga dapat menyebabkan polusi dan perubahan drastis dalam penggunaan lahan. Meskipun demikian, studi menunjukkan bahwa bioplastik masih memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan plastik konvensional (Atiweh et al., 2021).

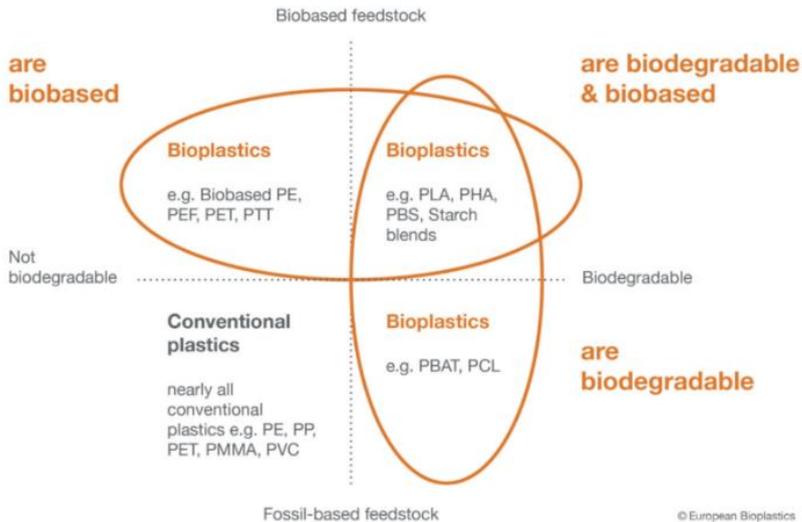
Berdasarkan hal tersebut, pentingnya dalam mengembangkan dan menggunakan bioplastik untuk mengurangi penggunaan plastik sintetis yang tidak dapat didaur ulang, dengan tujuan utama melindungi lingkungan dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya yang tidak dapat diperbarui (SN & G, 2016). Tulisan ini menjabarkan secara detail terkait bioplastik. Penjabaran dilakukan mengenai jenis dan kelebihan dari bioplastik, serta tantangan dan hambatan penggunaan bioplastik dalam aplikasinya sebagai alternatif kemasan dalam aplikasinya untuk mengurangi sampah plastik.

## **BIOPLASTIK DAN JENISNYA**

Bioplastik sebagai komponen kunci dari inovasi yang diperlukan di dunia modern untuk mengurangi polusi yang disebabkan oleh limbah plastik (Chauhan et al., 2024b). Bioplastik memiliki potensi besar dalam sistem pengemasan makanan dan polimer ini dapat membantu mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh plastik sekali pakai (Caleb & Belay, 2023). Kelebihan bioplastik adalah berasal dari biomassa yang dapat diperbarui dan berkelanjutan, memiliki jejak karbon yang lebih rendah, dan mengeluarkan lebih sedikit gas rumah kaca dibandingkan plastik berbasis minyak bumi. Penggunaan bioplastik yang bersumber dari biomassa terbarukan juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang ketersediaannya terbatas. Selain itu, bioplastik ini menunjukkan potensi besar sebagai pengganti plastik konvensional karena sifatnya yang dapat terurai dan beragam (Pooja et al., 2023).

Bioplastik, yang merupakan plastik yang dibuat sebagian atau seluruhnya dari polimer yang berasal dari sumber-sumber biologis/ alam (*biobased*) seperti tebu, pati kentang, atau selulosa dari pohon, jerami, dan kapas (Muhammad Shamsuddin, 2017). Menurut (European Bioplastics, 2022), sebuah material plastik disebut bioplastik jika *biobased*

(berbasis Bio), *biodegradable* (dapat terbiodegradasi), atau memiliki kedua sifat tersebut (*biobased* dan *biodegradable*) (Gambar 6.1).



Sumber: <http://www.european-bioplastiks.org/>

Gambar 6.1. Klasifikasi Bioplastik

Dalam Gambar 6.1 terdapat 2 (dua) istilah terkait bioplastik, yaitu *biobased* (berbasis bio) dan *biodegradable* (dapat terbiodegradasi). *Biobased* (berbasis bio) artinya material atau produk tersebut sebagian berasal dari biomassa (tanaman). Biomassa yang digunakan untuk bioplastik berasal dari, misalnya, jagung, tebu, atau selulosa. Sedangkan *biodegradable* (dapat terbiodegradasi) artinya proses kimia dimana mikroorganisme yang ada di lingkungan mengubah material menjadi zat-zat alami seperti air, karbon dioksida, dan kompos tanpa memerlukan aditif buatan. Proses biodegradasi tergantung pada kondisi lingkungan sekitar (misalnya lokasi atau suhu), material, dan aplikasinya (European Bioplastics, 2022).

*Biobased* tidak sama dengan *biodegradable*. Sifat biodegradasi tidak tergantung pada sumber bahan material, tetapi lebih pada struktur kimianya. Artinya, plastik yang 100 persen berbasis bio bisa jadi tidak dapat terbiodegradasi, dan plastik yang 100 persen berbasis fosil bisa terbiodegradasi (European Bioplastics, 2022).

Berdasarkan Gambar 6.1 diketahui bahwa bioplastik diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelompok yaitu 1) Bioplastik yang berasal dari fosil, tetapi bersifat *biodegradable*; 2) Bioplastik berasal dari bahan alami atau bio (*biobased*) tetapi bersifat *nonbiodegradable*; dan 3) Bioplastik berasal dari bahan alami atau bio (*biobased*) dan bersifat *biodegradable*. Dalam (Chauhan et al., 2024b), menjelaskan klasifikasi ini membantu dalam memahami berbagai jenis bioplastik berdasarkan asal dan karakteristik lingkungan mereka, yang penting untuk menentukan aplikasi dan pengelolaan akhir produk yang sesuai.

### **Bioplastik yang berasal dari fosil, tetapi bersifat *biodegradable***

Bioplastik yang berasal dari fosil tetapi bersifat *biodegradable* adalah jenis plastik yang dibuat dari sumber daya fosil namun memiliki kemampuan untuk terdegradasi secara alami ketika terpapar faktor-faktor lingkungan seperti tanah, sinar matahari, dan mikroorganisme. Dua contoh terkenal dari jenis bioplastik ini adalah polybutylene adipate terephthalate (PBAT) dan polycaprolactone (PCL). Meskipun berasal dari sumber fosil, plastik-polimer ini dapat terurai menjadi monomer yang lebih sederhana, menunjukkan karakteristik biodegradabilitas (Chauhan et al., 2024a).

PBAT dan polycaprolactone termasuk dalam kelompok yang relatif kecil dari plastik *biodegradable*. Plastik-plastik ini biasanya digunakan bersama dengan polylactic acid (PLA) atau plastik *biodegradable* lainnya. Penggunaan bersama ini

bertujuan untuk meningkatkan kinerja yang sesuai dengan aplikasi tertentu melalui peningkatan sifat mekaniknya (European Bioplastics, 2022)

**Bioplastik berasal dari bahan alami atau bio (*biobased*) tetapi bersifat non-biodegradable**

Bioplastik jenis ini adalah bioplastik yang berasal dari sumber terbarukan tetapi tidak terdegradasi secara biologis. Kategori ini mencakup bioplastik yang memiliki sifat fisik dan kimia mirip dengan plastik konvensional berbasis fosil tetapi dibuat dari sumber biomassa. Kelebihan dari bioplastik berbasis bio yang tidak biodegradable termasuk penggunaan sumber daya terbarukan untuk produksinya, yang lebih baik untuk lingkungan dibandingkan dengan plastik berbasis petrokimia yang mengotori dan melepaskan gas berbahaya selama pembakarannya. Meskipun bioplastik ini tidak terdegradasi secara biologis, mereka membantu mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan yang terkait dengan ekstraksi dan pengolahan bahan baku fosil (Chauhan et al., 2024b). Dalam (European Bioplastics, 2022), berbagai contoh dari bioplastik jenis ini:

- Bio-based PP: Dapat digunakan dalam aplikasi yang sama dengan versi konvensional (polipropilena (PP)), seperti wadah plastik dan barang teknis
- Bio-based PET: Digunakan untuk serat tekstil terbarukan, tetapi terutama ditemukan dalam kemasan makanan, seperti botol minuman. Saat ini, polietilen tereftalat (PET) berbasis bio di pasar sebagian besar berbasis bio, karena hanya blok bangunan MEG (monoetilena glikol) yang dibuat dari sumber daya terbarukan. Namun, PET berbasis bio 100%

dapat diproduksi dan mungkin akan tersedia di pasar di masa depan.

### **Bioplastik berasal dari bahan alami atau bio (*biobased*) dan bersifat biodegradable**

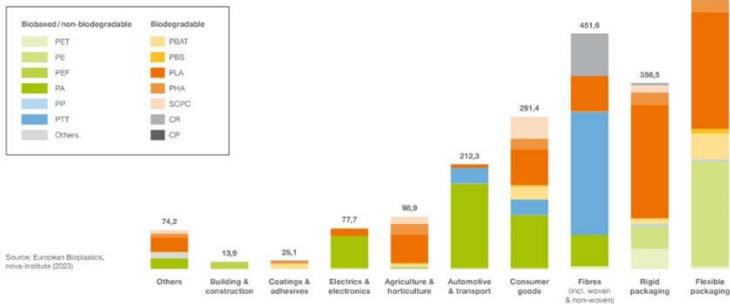
Bioplastik yang berasal dari bahan alami atau bio (*biobased*) dan bersifat biodegradable adalah jenis plastik yang dibuat dari sumber daya terbarukan seperti tanaman, pati, atau selulosa, dan memiliki kemampuan untuk terurai secara alami melalui aktivitas mikroba. Bioplastik ini dapat terdegradasi menjadi metana, air, dan karbon dioksida, serta partikel-partikel yang lebih kecil yang dapat diuraikan lebih lanjut oleh mikroorganisme. Contoh bahan baku alami yang digunakan untuk membuat bioplastik termasuk pati dari tanaman seperti jagung, kentang, dan gandum, serta selulosa dari kayu, jerami, dan kapas. Bioplastik ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil tetapi juga membantu mengurangi dampak lingkungan dari limbah plastik karena sifat biodegradabilitasnya. Secara umum, bioplastik yang *biobased* dan *biodegradable* menawarkan solusi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan plastik konvensional yang berbasis fosil dan tidak terurai (Chauhan et al., 2024b).

### **MANFAAT DAN APLIKASI BIOPLASTIK**

Bioplastik dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, dan produksi juga semakin terus meningkat. Aplikasi bioplastik terdiri dari bidang pengemasan, produk konsumen, elektronik, otomotif, tekstil dan lainnya. Industri pengemasan merupakan segmen pasar terbesar untuk bioplastik pada tahun 2023 (Gambar 6.2).

## Global production capacities of bioplastics 2023 (market segment by polymers)

in 1,000 tonnes



Sumber: <http://www.european-bioplastiks.org/>

Gambar 6.2. Beragam Aplikasi Bioplastik

Pengemasan merupakan segmen pasar terbesar untuk penjualan bioplastik (Gambar 6.2). Pada tahun 2023, segmen pengemasan menyumbang 43 persen dari total pasar bioplastik, yang setara dengan 934.000 ton (European Bioplastics, 2022). Penelitian bioplastik dalam aplikasi pengemasan juga saat ini banyak dan terus dilakukan. Hal ini dimungkinkan pengemasan merupakan jenis plastik yang paling banyak digunakan dan menyumbang paling tinggi sampah plastik, sehingga bioplastik menjadi alternatif dalam mengurangi penggunaan plastik.

Berbagai manfaat mengenai mengenai aplikasinya bioplastik dapat telah dipublikasi. Dalam (Walker & Rothman, 2020), produksi bioplastik seperti PLA dapat menghemat dua pertiga energi yang dibutuhkan untuk membuat plastik tradisional. Selain itu, bioplastik juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, misalnya PLA dapat mengurangi emisi karbon dioksida hingga 70% dibandingkan dengan plastik konvensional. Penggunaan bioplastik seperti bio-uretana dan PTT juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 36% dan

44% dibandingkan dengan plastik dari bahan bakar fosil. Dengan demikian, bioplastik memiliki potensi untuk mengurangi penggunaan energi, jejak karbon, dan emisi gas rumah kaca dalam siklus hidupnya. Dalam (Chauhan et al., 2024b), beberapa kelebihan bioplastik dibanding plastik konvensional yaitu

1. Penggunaan Sumber Daya Terbarukan: Bioplastik dibuat dari sumber daya terbarukan, seperti tanaman, yang membantu mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil yang terbatas dan berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca.
2. Potensi Karbon Rendah: Bioplastik memiliki potensi untuk menyimpan karbon yang diambil dari atmosfer oleh tanaman selama fotosintesis, yang dapat mengurangi jejak karbon secara keseluruhan.
3. Biodegradabilitas: Beberapa jenis bioplastik dapat terdegradasi lebih cepat dan lebih aman bagi lingkungan dibandingkan dengan plastik konvensional, yang membantu mengurangi masalah penumpukan sampah dan pencemaran lingkungan.
4. Keamanan dan Kesehatan: Bioplastik menawarkan keuntungan dalam hal keamanan dan kesehatan, seperti mengurangi risiko kontaminasi makanan dengan bahan kimia berbahaya yang mungkin dilepaskan oleh plastik konvensional.
5. Efisiensi Energi dalam Produksi: Produksi bioplastik seringkali membutuhkan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan produksi plastik konvensional, yang berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca.
6. Pengurangan Limbah: Bioplastik yang berasal dari sisa tanaman dapat membantu mengelola sisa pertanian dan mengurangi limbah.

Dengan kelebihan-kelebihan ini, bioplastik menawarkan alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dibandingkan dengan plastik konvensional yang berbasis fosil (Chauhan et al., 2024b). Bioplastik menawarkan alternatif yang layak yang sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular. Bioplastik dapat diurai secara biologis dan dapat digunakan kembali, membantu mengurangi penumpukan sampah plastik (Chandra, 2023).

## **HAMBATAN DAN TANTANGAN PENGGUNAAN BIOPLASTIK**

Bioteknologi industri memiliki peran kunci dalam revolusi bioplastik dengan mendorong inovasi dalam solusi kemasan yang berkelanjutan. Ini mencakup pengembangan bioplastik yang dapat mengurangi plastik konvensional, yang berkontribusi signifikan terhadap pencemaran lingkungan (Chandra, 2023). Namun dalam aplikasinya dalam mengurangi sampah plastik konvensional masih terdapat hambatan dan tantangan.

Berbagai hambatan penggunaan bioplastik adalah sifat mekanis bioplastik sering kali kurang dibandingkan dengan plastik konvensional. Bioplastik umumnya memiliki struktur yang lebih lembut dan taktil, yang bisa menjadi keuntungan dalam aplikasi tertentu seperti kemasan kosmetik. Namun, setiap jenis bioplastik memiliki struktur kimia yang unik, yang berarti setiap material akan memiliki serangkaian parameter yang berbeda, termasuk karakteristik mekanis seperti kekuatan tarik dan elastisitas. Bioplastik juga memerlukan penambahan bahan kimia seperti plasticizer untuk mencapai sifat yang diinginkan pada produk akhir. Ini menunjukkan bahwa meskipun bioplastik memiliki potensi besar, masih ada tantangan dalam mencapai kinerja mekanis yang setara dengan plastik berbasis fosil (Chauhan et al., 2024a).

Terdapat beberapa tantangan dalam penggunaan bioplastik yaitu kurangnya informasi dan pengetahuan tentang bioplastik, kurangnya kesadaran masyarakat, kurangnya support dari pemerintah, kurangnya support dari produsen dan industry, harga bioplastik yang tinggi dan lainnya (Filho et al., 2021). Dalam (Findrik & Meixner, 2023), hambatan dalam proses pembelian bioplastik yaitu kurangnya pengetahuan konsumen, ketidakpastian dalam mengenali bioplastik, dan perasaan ambivalen terhadap bioplastik.

Sosialisasi informasi dan pengetahuan terkait bioplastik kepada masyarakat harus dapat dilakukan, hal ini dikarenakan untuk menumbuhkan kesadaran masyarakat terkait berbagai cara dalam mengurangi sampah plastik dan dampaknya kepada lingkungan dan kesehatan masyarakat. Dalam (Filho et al., 2021), sebagian besar responden (93%) merasa bahwa informasi tentang bioplastik untuk konsumen masih kurang, terutama di Portugal, Spanyol, dan Inggris. Selain itu, 85% menyebutkan bahwa bioplastik tidak mudah tersedia di negara mereka. Pentingnya penerimaan konsumen terhadap bioplastik untuk mencapai kesuksesan di pasar, meskipun bioplastik telah mendapat perhatian yang meningkat di kalangan akademisi dan industry (Weinrich & Herbes, 2023).

Dalam penelitian (Findrik & Meixner, 2023), factor yang mendorong konsumen untuk membeli bioplastik, seperti karakteristik produk yang diinginkan, sikap positif terhadap lingkungan, nilai-nilai hijau yang tinggi, dan informasi produk yang tersedia. Studi juga menunjukkan bahwa meskipun bioplastik memiliki biaya produksi yang lebih tinggi dibandingkan plastik konvensional, sebagian besar konsumen bersedia membayar premi tertentu untuk kemasan bioplastik, peralatan hortikultura, dan barang konsumen lainnya (Findrik & Meixner, 2023). Selain itu, saat ini minat pada polimer yang diproduksi dari sumber energi terbarukan telah meningkat dalam

beberapa tahun terakhir, terutama karena kebutuhan untuk menciptakan ekonomi dunia yang berkelanjutan secara lingkungan (de Albuquerque et al., 2021).

Faktor hambatan lain adalah kurangnya dukungan pemerintah dan harga bioplastik yang lebih tinggi. Meskipun banyak pemasok siap memproduksi plastik berbasis bio atau biodegradable, produksinya tetap rendah karena biaya produksi plastik konvensional yang sangat rendah (Filho et al., 2021). Dukungan pemerintah terhadap bioplastik ini penting, terutama dalam membuat kebijakan-kebijakan untuk industri menggunakan bioplastik. Kebijakan seperti mengurangi pajak untuk Perusahaan yang menggunakan bioplastik dan memberikan subsidi penjualan bioplastik, dan lain sebagainya.

Kebijakan yang dapat dilakukan insentif regulasi yang akan datang, termasuk pajak material non-bio, akan lebih mendorong permintaan untuk bioplastik yang ada dan baru. Kebijakan yang berorientasi pada circularity akan mendorong perusahaan untuk mengevaluasi semua langkah sepanjang siklus hidup produk mereka dan membantu konsumen memilih plastik yang lebih berkelanjutan (Rosenboom et al., 2022). Selain itu, dalam (Chandra, 2023), penting bagi konsumen, bisnis, dan pembuat kebijakan bersama untuk merangkul revolusi bioplastik ini dan secara kolektif berkontribusi untuk dunia yang lebih berkelanjutan.

Saat ini, sebagian besar bahan baku untuk produksi bioplastik berasal dari tanaman pertanian. Hal ini secara tidak langsung dapat mengancam keamanan pangan karena mengurangi lahan yang digunakan untuk produksi makanan. Penggunaan limbah organik dari asal biologis tidak hanya akan membatasi ketergantungan pada tanaman pertanian, tetapi juga dapat membantu dalam pengelolaan limbah padat secara efektif. Industri, khususnya sektor pangan dan pertanian, menghasilkan jumlah limbah organik yang signifikan yang dapat dimanfaatkan

untuk tujuan ini. Memanfaatkan limbah organik untuk produksi bioplastik juga dapat mengurangi biaya produksi secara signifikan (George et al., 2021).

Pengolahan hasil sampah bioplastik juga harus diperhatikan agar bisa melindungi lingkungan secara optimal. Hal ini dikarenakan tidak semua jenis bioplastik dapat terdegradasi dengan mudah di lingkungan alami. Beberapa bioplastik yang biodegradable tetap membutuhkan kondisi khusus untuk terurai, dan jika tidak dikelola dengan benar, mereka dapat berakhir di tempat pembuangan sampah dan menghasilkan gas metana (Chauhan et al., 2024a). Dalam (Atiweh et al., 2021), beberapa plastik berbasis bio tidak dapat didaur ulang mirip dengan plastik berbasis petroleum. Akibatnya, banyak bioplastik yang dapat terdegradasi akhirnya berakhir di tempat pembuangan sampah, di mana mereka terurai secara perlahan dan menghasilkan gas metana.

## **KESIMPULAN**

Bioplastik adalah salah satu dari aplikasi dari bioteknologi dalam mengurangi sampah plastik. Bioplastik adalah plastik yang lebih ramah lingkungan karena berbahan dasar dari alam (biobased), dapat didegradasi (biodegradable), maupun memiliki sifat keduanya (biobased dan biodegradable). Banyak kelebihan penggunaan bioplastik terutama terkait masalah lingkungan dan Kesehatan. Namun, bioplastik menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan plastik konvensional, terdapat hambatan dan tantangan dalam pengaplikasiannya sebagai pengganti kemasan konvensional. Penelitian dan pengembangan lanjutan harus terus dilakukan untuk menghasilkan bioplastik sebagai pengganti plastik berbasis petrokimia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Atiwesh, G., Mikhael, A., Parrish, C. C., Banoub, J., & Le, T. A. T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*, 7(9).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>
- Bhatt, P., Pathak, V. M., Bagheri, A. R., & Bilal, M. (2021). Microplastic contaminants in the aqueous environment, fate, toxicity consequences, and remediation strategies. *Environmental Research*, 200.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111762>
- Caleb, O. J., & Belay, Z. A. (2023). Role of biotechnology in the advancement of biodegradable polymers and functionalized additives for food packaging systems. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 83). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102972>
- Chandra, N. (2023). Bioplastics revolution: How industrial biotechnology is shaping a greener future for packaging. *Short Communication*  
<https://www.alliedacademies.org/archives-of-industrial-biotechnology/> 1 Arch Ind Biot 2023 Volume 7 Issue 3 S.  
<https://doi.org/10.35841/aaaib-7.3.148>
- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024a). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. In *Polymer-Plastics Technology and Materials* (Vol. 63, Issue 8, pp. 913–938). Taylor and Francis Ltd.  
<https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2307369>
- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024b). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. In *Polymer-Plastics Technology and Materials* (Vol. 63, Issue 8, pp. 913–938). Taylor and Francis Ltd.  
<https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2307369>

- de Albuquerque, T. L., Marques Júnior, J. E., de Queiroz, L. P., Ricardo, A. D. S., & Rocha, M. V. P. (2021). Polylactic acid production from biotechnological routes: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 186, pp. 933–951). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.074>
- European Bioplastics. (2022). *What are bioplastics? Material types, terminology, and labels – an introduction*. <http://www.european-bioplastics.org/news/publications/>
- Filho, W. L., Salvia, A. L., Bonoli, A., Saari, U. A., Voronova, V., Klõga, M., Kumbhar, S. S., Olszewski, K., De Quevedo, D. M., & Barbir, J. (2021). An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe. *Science of the Total Environment*, 755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142732>
- Findrik, E., & Meixner, O. (2023). Drivers and barriers for consumers purchasing bioplastics – A systematic literature review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 410). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137311>
- George, N., Debroy, A., Bhat, S., Singh, S., & Bindal, S. (2021). Biowaste to bioplastics: An ecofriendly approach for a sustainable future. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 8(3), 221–233. <https://doi.org/10.30491/jabr.2021.259403.1318>
- Huang, S., Wang, H., Ahmad, W., Ahmad, A., Vatin, N. I., Mohamed, A. M., Deifalla, A. F., & Mehmood, I. (2022). Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- Muhammad Shamsuddin, I. (2017). Bioplastics as Better Alternative to Petroplastics and Their Role in National

- Sustainability: A Review. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 5(4), 63.  
<https://doi.org/10.11648/j.abb.20170504.13>
- Nayanathara Thathsarani Pilapitiya, P. G. C., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. In *Cleaner Materials* (Vol. 11). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Pooja, N., Chakraborty, I., Rahman, M. H., & Mazumder, N. (2023). An insight on sources and biodegradation of bioplastics: a review. In *3 Biotech* (Vol. 13, Issue 7). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.  
<https://doi.org/10.1007/s13205-023-03638-4>
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. In *Nature Reviews Materials* (Vol. 7, Issue 2, pp. 117–137). Nature Research.  
<https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- SN, B., & G, S. (2016). Need for Bioplastics and Role of Biopolymer PHB: A Short Review. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 07(02).  
<https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000272>
- Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., & Thakur, V. K. (2018). Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 13, pp. 68–75). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.013>
- Walker, S., & Rothman, R. (2020). Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 261). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>
- Weinrich, R., & Herbes, C. (2023). Consumer research on bioplastics: A systematic review. *Q Open*, 3(1).  
<https://doi.org/10.1093/qopen/qoad013>

## PROFIL PENULIS



### **Rina Ningtyas, M.Si**

Penulis adalah Dosen Program Studi Teknologi Industri Cetak Kemasan (TICK) Politeknik Negeri Jakarta. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Jakarta, dan melanjutkan Pendidikan Magister pada Program Studi Ilmu Pangan Institut Pertanian Bogor.

Penulis memiliki kepakaran di bidang material kemasan dan teknologi kemasan pangan. Salah satu topik penelitian dibidang material kemasan yang diteliti adalah bioplastik dari berbagai bahan baku. Berbagai jurnal dan prosiding telah dipublish tentang bioplastik baik Nasional dan Internasional pada bidang tersebut. Tiga buku ajar juga telah diterbitkan yaitu 1) Tren Teknologi Kemasan Pangan Tahun 2021 ISBN 978-623-7342-95-3 PNJ Press; 2) Sisi Terang Material Kemasan Gelas, Logam dan Kayu Tahun 2022 PNJ Press ISBN 978-623-5537-13-9; dan 3) Material dan teknologi kemasan plastic PNJ Press ISBN: 978-623-5537-53-5. Buku Chapter di tahun 2023 juga diterbitkan dengan judul 1) “Keselamatan dan Kesehatan Kerja, ISBN 978-623-09-3735-4 Penerbit Sada Kurnia Pustaka, 2) “Keamanan Pangan” ISBN 978-623-09-4376-8 Penerbit Sada Kurnia Pustaka, 3)“Air Bersih Gratis” ISBN 978-623-459-579-6 Penerbit Widina Media Utama, dan 4) “Pengantar Mikrobiologi” ISBN : 9786238385119 Penerbit Sada Kurnia Pustaka.



## **BAB 7**

# **APLIKASI BIOTEKNOLOGI DALAM KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM**

Nabila Swarna Puspa Hermana  
Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor  
E-mail: nabila.hermana@idu.ac.id

### **PENDAHULUAN**

Sumber daya alam adalah bahan dan zat yang terdapat di alam dan berharga bagi manusia untuk berbagai tujuan (Ali & Kamraju, 2023). Sumber daya alam suatu negara merupakan aset yang tidak dapat dilebih-lebihkan nilainya. Istilah “sumber daya alam” dapat merujuk pada berbagai hal di Indonesia, termasuk sumber daya hayati, mineral, hutan, dan energi. Indonesia memiliki cadangan mineral yang melimpah, meliputi timah, nikel, emas, batu bara, tembaga, dan bauksit. Negara ini merupakan salah satu produsen komoditas tertentu yang terkemuka di dunia. Selain itu, Indonesia memiliki cadangan energi yang besar, terutama batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Sektor energi mempunyai arti penting bagi perekonomian Indonesia karena merupakan produsen minyak dan gas utama di Asia Tenggara. Indonesia menghadapi tantangan dalam mengelola dan memanfaatkan sumber daya alamnya secara efektif. Agenda pembangunan berkelanjutan di Indonesia sangat menekankan upaya yang bertujuan menjaga keanekaragaman hayati, mitigasi degradasi lingkungan, dan meningkatkan nilai tambah dan alokasi manfaat yang adil dari sumber daya alam (Ausat et al., 2023).

Meningkatnya permintaan akan sumber daya alam dan material telah menyebabkan perkembangan teknologi yang sebagian mengatasi keterbatasan dan dengan demikian

meningkatkan pasokan sumber daya. Sebuah strategi dikembangkan untuk melihat pengelolaan sumber daya alam secara terkoordinasi dan menyelidiki serta pemanfaatannya direncanakan untuk kebutuhan jangka panjang. Sejauh mana sumber daya telah dipelajari dan kemungkinan-kemungkinan yang ditetapkan sebelum kebutuhan merupakan faktor penting yang menentukan tingkat pertumbuhan perekonomian. Bioteknologi dan rekayasa genetika adalah dua alat teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk pengelolaan sumber daya alam terbarukan seperti keanekaragaman tumbuhan dan hewan (Mondal, 2009).

Beberapa strategi konservasi telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir, terutama dalam metode kebijakan konservasi *in situ* dan *ex situ*. Konservasi *in situ* adalah konservasi sumber daya genetik di lokasi pada populasi alami spesies tumbuhan atau hewan seperti sumber daya genetik hutan, pada populasi alami spesies pohon dan hewan. Proses perlindungan suatu spesies tumbuhan atau hewan yang terancam punah di habitat aslinya biasa disebut dengan konservasi *in situ*. Konservasi *ex situ* adalah relokasi satwa langka atau terancam punah dari habitat aslinya ke kawasan lindung yang dilengkapi sarana perlindungan dan pelestariannya. Strategi ini merupakan alternatif yang penting ketika konservasi *in situ* tidak memadai (Ajayi, 2019).

Bioteknologi didefinisikan sebagai teknik apa pun yang menggunakan organisme hidup, atau zat untuk membuat atau memodifikasi suatu produk, untuk memperbaiki tanaman atau hewan, atau untuk mengembangkan mikroorganisme untuk penggunaan tertentu. Ini terdiri dari berbagai teknologi, mulai dari teknik bioteknologi tradisional yang telah lama ada dan digunakan secara luas hingga bioteknik baru dan canggih dalam metode kultur sel dan jaringan serta metodologi transgenik. Dampak menguntungkan dari bioteknologi tanaman terhadap

peningkatan dan produksi tanaman yang penting secara ekonomi sudah diketahui dengan baik, selain itu bioteknologi juga mempunyai dampak yang besar terhadap konservasi keanekaragaman hayati. Kemajuan dalam bioteknologi, khususnya kultur *in vitro* dan biologi molekuler khususnya teknologi transgenik mengarah pada produksi plasma nutfah kategori baru, garis sel dengan atribut khusus dan bahan transformasi genetik. Kultur *in vitro* dan pengumpulan plasma nutfah melalui proses perbanyakan pertumbuhan cepat, sedang dan lambat, penyimpanan pertumbuhan lambat, kriopreservasi mempunyai penerapan yang besar untuk mengurangi risiko hilangnya sumber daya genetik tanaman yang baik dalam kondisi pertumbuhan dan penyimpanan secara umum. Hilangnya dan degradasi sumber daya genetik tanaman dalam jumlah besar sebagian dinilai, dikonservasi dan dikelola dengan mengadopsi teknik *ex situ* dari metode bioteknologi canggih khususnya kultur *in vitro* dan beberapa teknik biologi molekuler untuk tujuan studi dan analisis keanekaragaman genetik (National Research Council (U.S.). Steering Committee on Global Challenges and Directions for Agricultural Biotechnology: Mapping the Course, n.d.; Pathak & Abido, 2014).

### **KONSERVASI *IN SITU***

Bentang alam dihancurkan oleh limbah industri; bioremediasi merupakan kontribusi bioteknologi yang tak terhindarkan untuk mewujudkan reklamasi lahan dengan bantuan mikroba. Bakteri metanotrofik adalah pengoksidasi metana dengan substrat karbon, yang dikenal dengan degradasi pelarut terklorinasi, dan mereduksi senyawa alifatik terhalogenasi seperti Trichloroethylene (TCE). Organisme ini dilaporkan diisolasi dari rawa gambut, air laut, rizosfer tumbuhan, dan reservoir garam. Konservasi *in situ* memberikan

stabilitas relatif terhadap keanekaragaman spesies dalam komunitas yang beradaptasi dan penting untuk pertanian subsisten. Metode budidaya *Landrace* diikuti secara tradisional untuk konservasi insitu. Ethiopia terkenal dengan keanekaragaman perkebunannya yang merupakan salah satu dari delapan pusat gen Vavilovian, terutama jelai (*Hordeum vulgare*) dan gandum (*Triticum* spp.) terkonsentrasi dan di mana beberapa tanaman penting termasuk sorgum (*Sorghum bicolor*), wijen (*Sesamum indicum*), kopi (*Coffea arabica*) dan millet kecil didomestikasi. Konservasi satwa liar di taman nasional dan cagar konservasi, suaka juga disebut sebagai konservasi in situ (Merlyn Keziah & Subathra Devi, 2017).

### **KONSERVASI EX SITU**

Konservasi plasma nutfah secara exsitu dilakukan melalui bank gen benih dan sering diperiksa viabilitasnya, koleksi tanaman hidup dan tanaman benih bandel dilestarikan dalam bank gen tanaman. Plasma nutfah yang diperbanyak secara aseptik dilestarikan dan diperbanyak melalui hortikultura dalam bentuk meristem. Pada tahun 1958 Maheswari dan Rangaswamy melaporkan regenerasi embrio *in vitro* dari inti sel. Embrio somatik telah diregenerasi dari inti yang dipotong dari ovarium yang gagal dan tidak dibuahi. *Satureja avromanica* adalah spesies tumbuhan herba baru dengan bunga ungu yang ditutupi oleh papila, kelenjar sessile kekuningan dan panjang, dengan distribusi geografis terbatas pada Pegunungan Kurdistan, Iran Barat. Penerapan bioteknologi di bidang pertanian memberikan efek sekunder dalam peningkatan konservasi sumber daya alam dan perlindungan terhadap lingkungan. Pengembangan tanaman (Merlyn Keziah & Subathra Devi, 2017)

## **KULTUR JARINGAN UNTUK KONSERVASI**

Teknik kultur jaringan tanaman melibatkan inisiasi kultur, pemeliharaan dan penggandaan kultur, serta penyimpanan. Strategi pertumbuhan lambat diterapkan. *Flask* berisi media nutrisi disterilkan dengan panas di bawah tekanan untuk menjaga media bebas dari kontaminasi bakteri dan jamur. Inokulasi eksplan harus dilakukan dalam laminar air flow hood. Media tersebut terdiri dari unsur hara seperti gula, garam anorganik, hormon tanaman dan zat pembentuk gel. Pengaturan tersebut kemudian ditempatkan di bawah lampu dalam kondisi terkendali dan dipantau kontaminasi. Setelah jangka waktu yang ditentukan eksplan menunjukkan tanda-tanda pertumbuhan kalus dan perkembangan akar, daun dan bagian tanaman lainnya (Joshi, 2017; Pathak & Abido, 2014).

Perbanyakan tanaman dilakukan dalam kondisi terkendali in vitro dalam *flask* berbentuk kerucut, toples, dan tabung reaksi. Tanaman ini akan menjadi salinan atau klon persis dari tanaman induknya. Klon diproduksi dalam jumlah kelipatan, ratusan dan ribuan. Ketika benih digunakan dalam kultur jaringan tanaman, setiap tanaman secara genetik berbeda dari tanaman induknya. Perbanyakan mikro adalah teknik khusus untuk melestarikan spesies tanaman. Ini melibatkan produksi tanaman menggunakan kultur ujung pucuk dan nodal, pucuk dan akar yang baru terbentuk berfungsi sebagai eksplan untuk perbanyakan tanaman secara berulang. Hal ini akan meningkatkan nilai farmakologi tanaman (Pathak & Abido, 2014).

## **KRIOPRESERVASI**

Benih yang bandel dikriopreservasi dalam nitrogen cair; beberapa spesies tumbuhan langka yang diketahui secara otentik berkhasiat obat dilestarikan. Proses regenerasi meningkat sebesar 20 % jika diikuti metode kriopreservasi jika

dibandingkan dengan metode konservasi lainnya. Kriopreservasi dilakukan dengan nitrogen cair dengan suhu  $-132^{\circ}\text{C}$ . Protoplas dan kalus juga dapat diawetkan dengan kriopreservasi. Kultur genetik embrio juga mengalami dehidrasi dan dikemas dengan polimer seperti polietilen glikol dan manik-manik natrium alginat. Mereka juga dapat divitrifikasi menggunakan larutan vitrifikasi (Mondal, 2009; Pathak & Abido, 2014).

## **MIKROPROPAGASI DAN KLONING**

Metode perbanyakan klonal *in vitro* umumnya dikenal sebagai mikropropagasi yang membantu menghasilkan produksi massal propagul tanaman dari bagian atau sel tanaman mana pun. Propagul mikropropagasi digunakan untuk meningkatkan dan memperbanyak stok bahan tanaman di lingkungan mikro. Mikropropagasi dan kloning jaringan tanaman berdasarkan eksplan yang berbeda biasanya digunakan untuk melestarikan berbagai tanaman yang terancam punah. Perbanyakan tanaman secara *in vitro* memiliki potensi besar dalam menghasilkan obat-obatan berkualitas tinggi sekaligus konservasi tanaman obat. Program regenerasi atau mikropropagasi tanaman secara *in vitro* meliputi beberapa tahapan yang dimulai dari perkembangan tunas awal baik langsung dari bagian nodal eksplan maupun melalui cara tidak langsung kalus yang dimediasi dediferensiasi awal tunas. Selanjutnya, inisial tunas menuju tahap pemanjangan dan perkembangan dimana planlet kecil dengan tunas dan sistem akar yang berkembang dengan baik akan dihasilkan untuk dipindahkan ke dalam tanah. Teknik mikropropagasi membantu perbanyakan, pemeliharaan dan penyimpanan tanaman langka dan terancam punah secara cepat, tidak tergantung musim, dan berkelanjutan dengan menggunakan bagian tanaman mana pun sebagai sumber eksplan (Pathak & Abido, 2014).

## **EMBRIOGENESIS SOMATIK DAN ORGANOGENESIS**

Perkembangan embrio somatik melalui diferensiasi sel atau jaringan somatik tunggal untuk meregenerasi sejumlah besar tanaman pada saat yang sama merupakan teknik embriogenesis somatik yang sangat umum digunakan dalam kultur jaringan tanaman. Embriogenesis somatik dan pengembangan organ melalui organogenesis dari berbagai kultur eksplan merupakan teknik yang paling umum digunakan untuk meregenerasi beberapa tanaman langka untuk tujuan konservasi. Kultur eksplan pada media kultur yang sesuai membantu regenerasi seluruh tanaman baik melalui jalur embriogenesis somatik langsung maupun tidak langsung. Tanaman langsung berkembang dari eksplan dalam kasus embriogenesis somatik cara langsung, tanpa adanya langkah intervensi induksi kalus (massa sel yang tidak terorganisir) dan dedifferensiasi kalus menuju pertumbuhan tanaman yang terorganisir seperti yang ditemukan pada cara tidak langsung embriogenesis somatik. Induksi embrio somatik dari eksplan eksplan yang dikultur dalam media kultur khusus dan perkecambahannya menjadi planlet utuh mengikuti beberapa langkah dimana zat pengatur tumbuh yang berbeda memainkan peran penting. Hal tersebut sangat menguntungkan dalam perbanyakan cepat tanaman obat penting yang dianggap terancam punah (Pathak & Abido, 2014). Secara umum, sel atau jaringan yang dikultur atau tunas yang diregenerasi dapat dipelihara melalui subkultur serial dengan interval 4-8 minggu untuk jangka waktu tidak terbatas dan tanaman dapat diregenerasi kapan saja untuk dipindahkan ke kondisi lapangan yang sesuai untuk melestarikan sumber daya genetik tanaman. Kultur plasma nutfah dengan kultur yang tidak terbatas memiliki beberapa kelemahan seperti risiko hilangnya materi secara tiba-tiba karena kesalahan manusia atau infeksi, atau ketidakstabilan genetik; masalah ini dapat diatasi dengan

membatasi laju pertumbuhan dalam kondisi budidaya (Pathak & Abido, 2014).

## **KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM MELALUI BIOTEKNOLOGI PERTANIAN**

Penerapan bioteknologi di bidang pertanian memberikan efek sekunder dalam peningkatan konservasi sumber daya alam dan perlindungan terhadap lingkungan. Pengembangan tanaman yang tahan terhadap kekeringan dapat membantu petani menghemat sumber daya air. Tanaman yang direkayasa secara genetik untuk menghasilkan racun Bt memerlukan lebih sedikit penyemprotan pestisida, dan pengurangan penyemprotan mengurangi potensi kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh pestisida. Pertanian menyumbang lebih dari 30 persen emisi gas rumah kaca global; namun, tanaman yang tahan herbisida mendukung praktik budidaya tanpa pengolahan tanah yang membantu mengurangi erosi tanah, emisi gas rumah kaca, dan hilangnya karbon (National Research Council (U.S.). Steering Committee on Global Challenges and Directions for Agricultural Biotechnology: Mapping the Course, n.d.).

Pohon-pohon yang direkayasa secara genetik agar tumbuh lebih cepat dapat membantu memenuhi permintaan dunia akan kayu industri dan berpotensi mengurangi kebutuhan untuk menebang pohon dari hutan alam. Plastik baru yang terbuat dari polimer tumbuhan yang dapat terbiodegradasi suatu hari nanti mungkin akan menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan plastik tradisional yang terbuat dari bahan bakar fosil. Permintaan energi global diperkirakan meningkat sebesar 40 % dalam 20 tahun ke depan. Jika kebutuhan energi dipenuhi oleh penggunaan bahan bakar fosil, maka akan lebih banyak karbon dioksida yang dihasilkan. Produk pertanian dapat direkayasa untuk menyediakan bahan bakar alternatif dalam bentuk biodiesel dan biofuel: merekayasa jerami padi, sebuah

kontaminan lingkungan utama di negara-negara berkembang, sehingga secara biologis dipecah menjadi bahan bakar berbasis alkohol yang berguna (National Research Council (U.S.). Steering Committee on Global Challenges and Directions for Agricultural Biotechnology: Mapping the Course, n.d.).

Banyak masyarakat yang sering terpapar zat beracun, seperti arsenik dan merkuri, sehingga hidup di lingkungan yang berbahaya bagi kesehatan mereka. Sekitar 57 juta orang di Bangladesh atau 44 % populasi beresiko terpapar arsenik dalam konsentrasi beracun dalam air minum. Sekitar 6 juta orang di Amazon berisiko keracunan metilmerkuri dari hampir 5.000 ton merkuri yang disimpan di anak-anak sungai akibat penambangan emas. Banyak sumber daya lahan dan air yang terkontaminasi dalam skala global dan tidak dapat diperbaiki dengan metode fisik, namun alternatif berbasis bioteknologi dapat memberikan solusi terhadap masalah pencemaran lingkungan (National Research Council (U.S.). Steering Committee on Global Challenges and Directions for Agricultural Biotechnology: Mapping the Course, n.d.).

Terdapat satu sistem pembersihan lingkungan yang menggunakan tanaman asli untuk mendegradasi polutan organik, seperti trikloretilen dan hidrokarbon aromatik polisiklik, dan mengolahnya menjadi molekul yang tidak terlalu berbahaya dalam bidang fitoremediasi. Unsur polutan seperti arsenik, merkuri, dan radionuklida, tidak dapat dengan mudah dimetabolisme atau dipecah; namun, tanaman dapat mengekstraksi, memusatkan, dan mengakumulasi polutan tersebut dari tanah untuk dipanen dan dibuang di atas permukaan tanah. Banyak penelitian dilakukan untuk menentukan tanaman mana yang akan dieksploitasi untuk tujuan tersebut dan menemukan lokasi pembuangan yang aman. Tanaman yang digunakan untuk mengakumulasi polutan idealnya adalah tanaman non-pangan untuk mencegah

keracunan yang tidak disengaja dan akan tumbuh di antara tanaman pangan produktif sehingga petani dapat mempertahankan produktivitas lahan (Joshi, 2017).

Fitoremediasi hasil rekayasa genetika telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam uji lapangan awal. Uji coba lapangan pertama terhadap akumulator nikel hibrida asli telah berhasil mengekstraksi nikel. Para peneliti juga berhasil menggunakan interferensi RNA untuk menghambat tanaman mengubah bentuk arsenat menjadi bentuk lain yang terkumpul di akar; penghambatan tersebut memungkinkan tanaman mengangkut arsenik ke pucuk dan daunnya, yang kemudian dapat dipanen. Pohon kapas adalah salah satu dari beberapa spesies yang telah direkayasa untuk tumbuh di tanah yang terkontaminasi merkuri dan menghilangkan konsentrasi merkuri yang tinggi (Joshi, 2017).

## **MARKER MOLEKULAR**

Evolusi bergantung pada kekuatan fisik dan biologis seperti migrasi, seleksi, penyimpangan genetik, dan hambatan geografis. Teknologi penanda molekuler yang menjelaskan struktur populasi dan pola distribusi gen dalam ekosistem memberikan informasi yang dapat digunakan untuk mendukung program konservasi in situ. Beberapa penanda molekuler yang digunakan. Teknologi penanda molekuler telah diterapkan untuk menghasilkan sidik jari DNA, menganalisis keragaman genetik, mengkaraktisasi plasma nutfah, membangun bank DNA menggunakan penanda *Randomly amplified polymorphic DNA* (RAPD) dan *simple sequence repeats* (SSR). Basis data genotipe dihubungkan dengan data lain, misalnya data fenotipik dan data penggunaan (Merlyn Keziah & Subathra Devi, 2017).

## GENOMIK KONSERVASI

Berbagai teknik *in vitro* dari bioteknologi telah diterapkan dalam biologi konservasi. ‘Genomik konservasi’, sebuah istilah yang diterapkan secara longgar pada aplikasi konservasi data yang berasal dari *next generation sequencing* (NGS). Meskipun biaya NGS terus berkurang (lima kali lipat dalam 10 tahun), penerapan rutin teknik genom dalam konservasi masih terlalu mahal, kecuali untuk spesies yang penting secara komersial, seperti salmon. Selain itu, kemampuan bioinformatika yang diperlukan untuk analisis data belum menjadi keahlian sebagian besar ahli biologi konservasi. Teknik NGS memiliki keunggulan dalam penerapannya yang luas, berbeda dengan penanda spesifik spesies atau klade yang digunakan sebelumnya dalam genetika konservasi; oleh karena itu, *outsourcing* merupakan hal yang umum dalam studi terkait konservasi dan dapat mencakup bantuan bioinformatik. Teknik genom telah digunakan oleh beberapa laboratorium non-akademik, termasuk organisasi pemerintah dan non-pemerintah, dan biayanya turun begitu cepat sehingga penggunaan rutin kemungkinan akan menyebar lebih luas dalam beberapa tahun ke depan. Sementara itu, arsip sekuens yang berkembang pesat memberikan sumber daya yang semakin berharga untuk masa depan (Corlett, 2017).

Sampai saat ini, penerapan alat bioteknologi modern dalam konservasi sebagian besar terbatas pada penggunaan data genom dari NGS untuk hal-hal yang sebelumnya dilakukan dengan sejumlah kecil penanda molekuler (yang dianggap netral) yang mengambil sampel genom jauh lebih sedikit (misalnya, alozim, RAPD, *Amplified Fragment Length Polymorphism* (AFLP), mikrosatelit, dll.). Contoh-contoh terbaru dari penelitian-penelitian tersebut termasuk mengidentifikasi garis-garis keturunan yang belum dikenal, samar secara morfologis, dan patut mendapat perhatian konservasi; forensik satwa liar; mendemonstrasikan unit konservasi; mengidentifikasi populasi

sumber untuk translokasi atau penyelamatan genetik; memperkirakan aliran gen; mendeteksi perkawinan sedarah pada populasi kecil; mengoptimalkan koleksi untuk konservasi *ex situ*; mengelola populasi penangkaran; memantau patogen di populasi liar dan penangkaran; dan mendeteksi hibridisasi dengan *invasive alien species* (Corlett, 2017).

Sejumlah besar penelitian dilakukan untuk mempelajari hewan liar. Tujuan utama mempelajari genomik pada hewan liar adalah menilai susunan dan keragaman genetik mereka, membandingkan parameter keragaman genetik antara populasi liar dan kelompok penangkaran, serta mengembangkan penanda molekuler sebagai parameter untuk mencegah keragaman genetik dan depresi perkawinan sedarah. Selain itu, penanda molekuler merupakan indikator adaptasi evolusioner mereka terhadap iklim yang keras (Singh et al., 2019).

Saat ini, data yang ada masih samar-samar bahwa domestikasi ternak merupakan proses ganda atau tunggal. Populasi hewan awal telah berkontribusi dalam cara yang berbeda terhadap pemeliharaan hewan modern serta nutrisi dan kesejahteraan manusia. Genomik satwa liar mencakup analisis materi genetik menggunakan alat analisis genom skala besar. Selain itu, alat “*omics*” telah memberikan banyak informasi berharga mengenai adaptasi fisiologis, sejarah populasi, aspek perilaku, kesehatan, dan dinamika satwa liar. Studi transkriptomik telah memberikan wawasan tentang mekanisme biologi molekuler dan biokimia yang mengatur hibernasi pada lemur kerdil (*Cheirogaleus crossleyi*) (Singh et al., 2019).

Genomik mempunyai peran penting dalam konservasi spesies yang terancam punah dan mempelajari populasi hewan yang terancam punah. Lebih khusus lagi, genetika konservasi telah memfasilitasi wawasan empiris mengenai dampak perkawinan sedarah dan peningkatan penyimpangan genetik yang menyebabkan minimalnya keragaman genetik pada

populasi hewan liar yang terisolasi. Informasi genetik yang diperoleh dari satwa liar sangat berharga bagi pengelola dan pelestari satwa liar, dalam menghitung tingkat panen, dan mengelola migrasi atau translokasi satwa liar (Singh et al., 2019).

Analisis metagenomik ekosistem usus panda raksasa pemakan bambu (*Ailuropoda melanoleuca*) dan panda merah (*Ailurus fulgens*) menunjukkan banyaknya bakteri pendegradasi sianida. Ekosistem usus herbivora lain yang beradaptasi dengan pola makan tidak konvensional dapat menghasilkan sumber daya mikroba yang berharga. Studi pengurutan transkriptome, proteomik, fenotipik, dan biokimia yang terintegrasi mengungkapkan adanya jamur yang sangat fibrolitik dari usus herbivora dan menemukan bahwa sintesis enzim dipicu sebagai respons terhadap substrat, yaitu lignoselulosa yang dicerna oleh inang (Singh et al., 2019).

Karakterisasi dan analisis transkrip yang dilestarikan dan diturunkan secara filogenetik yang terdapat di *Loxodonta Africana*, gajah Afrika, telah mengungkapkan evolusi dan variasi plasentasi eutherian yang menunjukkan bahwa beberapa kandidat gen mungkin penting untuk perkembangan normal dan fungsi plasenta manusia. Sebanyak 2963 gen ditemukan diekspresikan secara umum pada plasenta beberapa mamalia eutherian (tikus, sapi, dan manusia) yang diteliti. Lebih lanjut, disimpulkan bahwa disfungsi gen-gen ini dapat menyebabkan komplikasi pada perkembangan janin manusia (Singh et al., 2019)

### ***METABARCODING***

Kombinasi NGS dengan primer universal untuk wilayah barcode umum (*metabarcoding*) telah menunjukkan harapan besar untuk menilai keanekaragaman hayati dalam sampel taksa campuran dan massal yang sulit untuk dinilai dengan metode

tradisional, termasuk mikroba dan berbagai invertebrata. Jenis data ini diperlukan untuk penilaian konservasi, perencanaan penggunaan lahan, pemantauan dampak lingkungan, dan penilaian fungsi ekosistem yang dipulihkan. Beberapa masalah teknis masih perlu diselesaikan, termasuk bias amplifikasi PCR yang mempengaruhi deteksi spesies, sebelum *metabarcoding* menjadi alat penilaian dan pemantauan keanekaragaman hayati yang rutin. Selain itu, identifikasi tingkat spesies saat ini dibatasi oleh kurangnya database *barcode* yang komprehensif dan dapat diandalkan secara taksonomi untuk sebagian besar taksa tersebut. Teknik yang sama juga dapat digunakan pada isi usus untuk mengidentifikasi interaksi trofik dalam jaring makanan sebagai dasar pengelolaan konservasi yang efektif. Bias dalam amplifikasi PCR saat ini juga membatasi penggunaan metabarcoding untuk penilaian kelimpahan relatif suatu spesies, namun metode bebas PCR sedang dikembangkan (Corlett, 2017).

## **KESIMPULAN**

Beberapa kelemahan teknik bioteknologi adalah induksi polusi genetik, dan beberapa kontroversi etika telah muncul untuk tanaman transgenik dengan produksi stroberi tahan beku (*Fragaria ananassa*) dengan gen artic flounder (*Liopsetta glacialis*) dianggap bertentangan dengan alam dan tidak etis oleh banyak termasuk vegetarian. Namun kemajuan bioteknologi telah membawa kita pada pelestarian tali pusat manusia untuk kebutuhan masa depan jika terjadi penyakit trauma atau kelainan dalam menghasilkan suatu organ (organogenesis) atau bahkan klon utuh. Bioteknologi akan membawa revolusi dengan memunculkan tren baru dalam konservasi dibandingkan dengan tren tradisional. Sehingga berkontribusi terhadap peremajaan ekosistem yang menandatangani malapetaka.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ajayi, S. S. (2019). Principles for the management of protected areas. In *Wildlife Conservation in Africa* (pp. 85–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816962-9.00009-0>
- Ali, M. A., & Kamraju, M. (2023). What Are Natural Resources? In *Natural Resources and Society: Understanding the Complex Relationship Between Humans and the Environment* (pp. 1–8). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46720-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46720-2_1)
- Ausat, A. M. A., Velmurugan, R., Mazil, M. M., Mazher, M. A., & Okombo, M. O. (2023). Utilisation of Natural Resources as a Source of Inspiration and Innovation in SME Development. *Apollo: Journal of Tourism and Business*, 1(3), 122–132. <https://doi.org/10.58905/apollo.v1i3.103>
- Corlett, R. T. (2017). A Bigger Toolbox: Biotechnology in Biodiversity Conservation. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 35, Issue 1, pp. 55–65). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.06.009>
- Joshi, B. K. (2017). Biotechnology for Conservation and Utilization of Agricultural Plant Genetic Resources in Nepal. *Journal of Nepal Agricultural Research Council*, 3, 49–59. <https://doi.org/10.3126/jnarc.v3i1.17276>
- Merlyn Keziah, S., & Subathra Devi, C. (2017). Essentials of Conservation Biotechnology: A mini review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/2/022047>
- Mondal, B. (2009). Application of biotechnology in natural resource management. In *Journal of Crop and Weed* (Vol. 5, Issue 1). <http://www.nature.com/>
- National Research Council (U.S.). Steering Committee on Global Challenges and Directions for Agricultural Biotechnology: Mapping the Course. (n.d.). *Global*

*Challenges and Directions for Agricultural Biotechnology : workshop report.*

- Pathak, M. R., & Abido, M. S. (2014). THE ROLE OF BIOTECHNOLOGY IN THE CONSERVATION OF BIODIVERSITY. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2(4), 352–363.  
<http://www.jebas.org><http://www.jebas.org>
- Singh, B., Mal, G., Gautam, S. K., & Mukesh, M. (2019). Biotechnology for Wildlife. *Advances in Animal Biotechnology*, 6(May), 501–513.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-21309-1\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21309-1_46)

## PROFIL PENULIS



**Nabila Swarna Puspa Hermana, S.Si., M.Si.**

Menyelesaikan pendidikan tinggi; Pendidikan Sarjana (S-1) pada Program Studi Biologi di Universitas Diponegoro, Semarang (2015) dan Pendidikan Magister (S-2) pada Program Studi Mikrobiologi Medik di Institut Pertanian Bogor, Bogor (2020). Saat ini sedang tercatat sebagai Dosen Tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor. Penulis telah beberapa artikel, baik yang diterbitkan pada jurnal nasional, jurnal internasional, prosiding, maupun *book chapter*.

## **BAB 8**

### **BIOREMEDIASI AIR LIMBAH INDUSTRI: STUDI KASUS BERBAGAI MEKANISME BIOREMEDIASI**

Dyah Setyaningrum  
Prodi Kimia, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bojonegoro  
E-mail: dyahds@gmail.com

#### **PENDAHULUAN**

Revolusi industri menjadi salah satu jawaban untuk mencukupi tingginya kebutuhan manusia yang sejalan dengan pertumbuhan jumlah populasi bumi. Kontras dengan hal tersebut, bahwa revolusi industri juga membawa dampak baru yang dapat mencemari lingkungan dan mengakibatkan ketidakseimbangan ekosistem berupa limbah dalam jumlah cukup besar. Masalah utama yang muncul akibat kondisi ini adalah sulitnya limbah industri untuk didegradasi sehingga tertahan cukup lama di lingkungan.

Limbah industri baik yang bersifat anorganik maupun organik, secara alami dapat terdegradasi dengan bantuan metabolisme mikroba (atau sering disebut biodegradasi). Namun, sering kali yang terjadi adalah hasil akhir atau hasil samping dari proses ini justru membahayakan lingkungan. Sehingga perlu untuk dipelajari agar dapat dilakukan tindakan preventif dari proses ini. Para ahli dan peneliti terus berupaya untuk mendapatkan solusi terbaik untuk menyelesaikan permasalahan ini. Salah satunya adalah dengan pendekatan bioteknologi. Harapannya adalah untuk dapat memberikan sumbangan bagi perbaikan kualitas lingkungan. Beberapa ancaman dari limbah industri maupun antropogenik lainnya dapat dikurangi dengan memanfaatkan mikroba indigen. Proses

pengolahan limbah dan penurunan pencemaran bahan toksik menggunakan mikroba ini dikenal dengan istilah bioremediasi.

### **Urgensi yang Mendasari Pembahasan**

Pencemaran lingkungan di tanah menjadi ancaman serius untuk kesehatan manusia. Hal ini dipicu oleh cemaran tanah, yang dapat mencapai area air tanah dan masuk dalam siklus rantai makanan. Dimana air tanah merupakan penyedia sumber air bagi kebutuhan sehari-hari baik untuk domestik ataupun industri. Kondisi ini dapat mempengaruhi bau dan rasa air tanah meskipun hanya dengan konsentrasi yang rendah (Kapahi & Sachdeva, 2019). Selain itu, apabila keadaan ini terakumulasi dalam ekosistem air, maka juga dapat mempengaruhi siklus hidup organisme air (Briffa et al., 2020).

Pengelolaan lingkungan dititik beratkan pada permasalahan utama terkait perlindungan air tanah. Hal ini juga sejalan dengan perkembangan penelitian saat ini yang sedang dikembangkan, yaitu terkait kualitas air untuk indikator kesehatan manusia. Perlindungan akuifer dari pencemaran menjadi poin penting dalam upaya perancangan keberlanjutan sumber daya air, utamanya pada kualitas air tanah dengan metode yang tepat. Sumber pencemaran air tanah ini, umumnya diakibatkan oleh bahan kimia yang penggunaannya berlebih.

Secara alami, bahan kimia yang bersifat anorganik maupun organik, dapat terdegradasi dengan bantuan metabolisme mikroba yang dikenal dengan istilah biodegradasi. Namun, sering kali yang terjadi adalah hasil akhir atau hasil samping dari proses ini justru membahayakan lingkungan. Selain limbah industri, sumber pencemaran lingkungan lainnya adalah bencana alam, kecelakaan, ataupun kegiatan antropogenik lainnya yang diakibatkan oleh kelalaian manusia. Contoh yang pernah terjadi di Indonesia adalah adanya kebocoran pipa dari perusahaan Lapindo, Sidoarjo Jawa Timur. Tumpahan minyak yang dapat

merusak habitat laut, peristiwa karhutla, maupun aktivitas penambangan tradisional yang dilakukan di wilayah Wonocolo, Bojonegoro, Jawa Timur (Adzini et al., 2003; Bahtiar & Hidayat, 2019).

Berdasarkan permasalahan di atas, maka urgensi dari penulisan ini adalah perlunya pendekatan yang komprehensif dan sustain, harus dilakukan untuk mengatasi permasalahan kontaminan ini. Salah satu solusi yang dikembangkan oleh para ahli adalah teknik Bioremediasi, yaitu suatu teknik dengan memanfaatkan organisme hidup mikroba. Pemanfaatan mikroba untuk mencegah bioakumulasi hingga bioaugmentasi bisa dengan bakteri dan atau mikroorganisme lainnya (Kapahi & Sachdeva, 2019). Bioremediasi memberikan hasil positif untuk memperbaiki kualitas perairan yang terkontaminasi menjadi bahan yang kurang beracun. Meskipun demikian, implementasi teknik ini tidaklah mudah. Tantangan implementasinya meliputi pemilihan organisme yang tepat, mekanisme kerja yang sesuai, serta pemantauan proses remediasinya. Faktor luar lain yang berpengaruh pada proses ini juga perlu mendapat perhatian, seperti ketersediaan nutrient mikroba dan kondisi lingkungan pengembangan mikrojanya (Vareda et al., 2019).

### **Peran Berbagai Mikroba dalam Bioremediasi**

Mikroorganisme dapat mendetoksifikasi unsur beracun menjadi air, karbon dioksida, dan senyawa kurang beracun lainnya, yang selanjutnya didegradasi oleh mikroba lain melalui proses yang disebut mineralisasi (Kumar et al., 2022). Bioremediasi dapat dilakukan dengan menggunakan bakteri, jamur, alga, dll. (Tabel 8.1). Mikroba secara alami telah berada di alam, sehingga dijadikan sebagai sumber karbon untuk menyerap berbagai macam polutan (Kour et al., 2022). Juga, kemampuannya untuk bertahan hidup pada lingkungan tak biasa meningkatkan efisiensinya (Kour et al., 2022). Contohnya

golongan asidofil bertahan hidup di lingkungan asam, psikrofil berkembang biak di lingkungan iklim dingin, dan halofil bertahan hidup di wilayah salin (Perera & Hemamali, 2022).

Tabel 8.1. Berbagai Mikroba dalam Bioremediasi

Tipe Organisme	Spesies	Polutan yang didegradasi	Referensi
<b>Bakteri</b>			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		Minyak mentah	(Mukjang et al., 2022)
<i>Fusarium sp.</i> , <i>Corynebacterium propinquum</i> , <i>P. aeruginosa</i> dan <i>Alcaligenes odorans</i>		Minyak	(Pande et al., 2020)
<i>Pseudoalteromonas sp.</i> and <i>Agarivorans sp.</i>		Hidrokarbon	(Dell'Anno et al., 2021)
<b>Jamur</b>			
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>		N-heterociklik benzena, ethylbenzena, xylena, toluena and organoklorin	(R. K. Singh et al., 2020)
<i>Aspergillus sp.</i> and <i>Penicillium sp.</i>		Hidrokarbon alifatik, polisiklik aromatik dan klorofnol	(Kour et al., 2022)

---

**Alga**

---

*F. vesiculosus*

Krom, nikel, kadmium, (V.R. et al., 2019)  
dan timbal

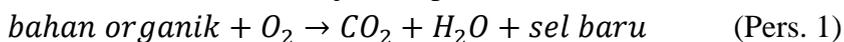
*Chlamydomonas reinhardtii*

Kromium dan kadmium (Nowicka et al.,  
2020)

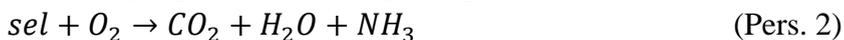
---

## Metabolisme Mikroba Perombak

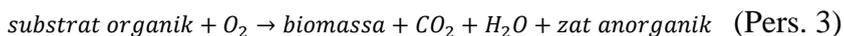
Metabolisme bakteri adalah proses perubahan secara kimiawi serta pembentukan energi untuk perkembangbiakan mikroba. Proses metabolisme dari bakteri bisa dalam bentuk aerob dan anaerob. Mikroba aerob dapat berkembangbiak apabila tersedia oksigen dan nutrient yang cukup. Sehingga mampu menghasilkan energi untuk menguraikan senyawa organik. Selanjutnya dengan bantuan enzim hidrolitik, bahan organik tersebut diubah menjadi senyawa sederhana. Reaksi metabolisme aerobik ditunjukkan pada Persamaan 1.



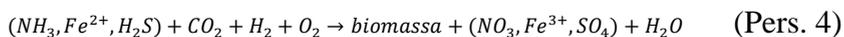
Di waktu yang sama, bakteri melakukan otoksidasi dari masa sel yang diurakan, mengikuti persamaan reaksi 2.



Metabolisme bakteri dijelaskan sebagai reaksi biodegradasi substrat organik menjadi biomassa dan zat anorganik. Reaksi aerobiknya ditunjukkan persamaan 3.



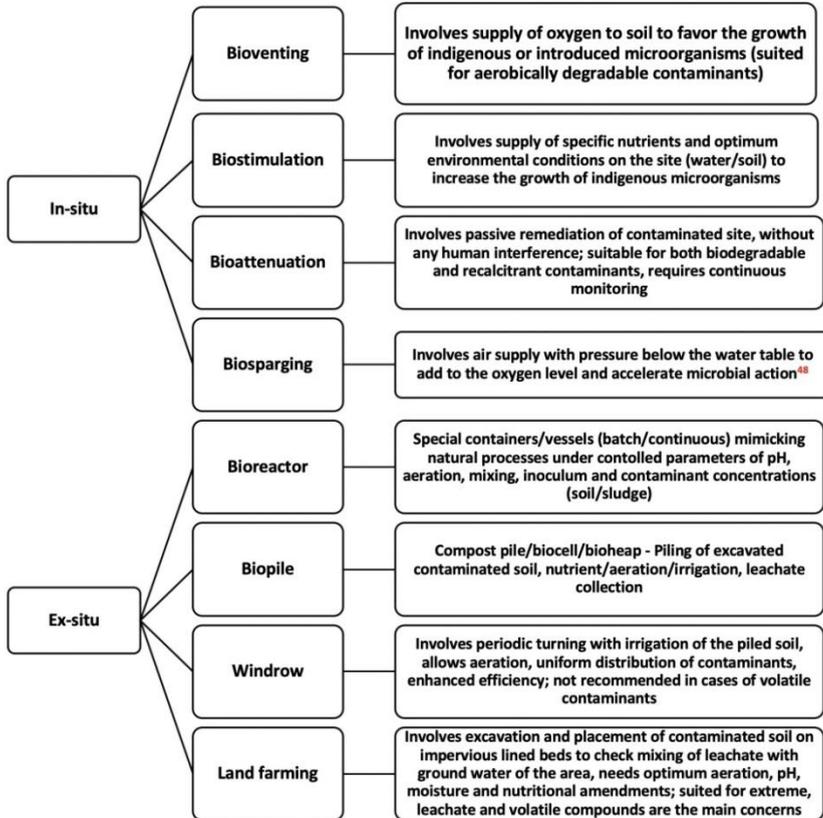
Selanjutnya, substrat organik dioksidasi dan oksigen direduksi menjadi air. Substrat organik dijadikan energi dan sumber karbon sel untuk menghasilkan biomassa. Senyawa anorganik ( $NH_3, Fe^{2+}, H_2S$ ) dijadikan energi dan fiksasi  $CO_2$  juga untuk membangun sel melalui reaksi redoks dibantu oleh mikroba kemoautotrof atau litotrof aerob. Adapun reaksinya disajikan pada Persamaan 4.



Adapun kinerja dari mikroba untuk pengolahan limbah, dipengaruhi oleh nilai pH limbah cair industri. Misalnya pada

nilai pH limbah cair yang bersifat asam (<4,0) maka akan bekerja bakteri-bakteri yang spesifik pada pH tersebut.

### Aplikasi Teknologi Bioremediasi



Sumber: (Kapahi & Sachdeva, 2019)

Gambar 8.1. Beberapa Teknik Bioremediasi

Tahap awal dalam aplikasi proses bioremediasi adalah pemilihan teknik bioremediasi yang tepat. Penentuan teknik yang tepat ini, melalui serangkaian analisis awal, meliputi karakterisasi limbah, pemilihan mikroorganisme yang sesuai,

dan pengumpulan informasi mengenai proses dan laju degradasi oleh mikroorganisme tersebut.

Teknik bioremediasi dapat dilakukan secara in-situ dan eks-situ (Gambar 8.1). Adapun beberapa teknik bioremediasi in-situ, antara lain bioventing, biostimulasi, bioattenuasi, bioaugmentasi, dan biosparging). Sedangkan teknik eks-situ, meliputi bioreaktor, biopil, vermicomposting, windrow dan landfarming. Menyoroti keuntungan dan keterbatasan, serta kemungkinan prospek riset yang bisa dilakukan dari teknik-teknik bioremediasi tersebut di atas, maka pada bab ini hanya akan fokus pada proses bioremediasi secara eks-situ. Kelebihan dari metode eks-situ adalah kondisi lingkungan awal lebih mudah untuk dikendalikan, misalnya melalui aerasi, penambahan nutrisi tanah dan atau teknik lainnya. Walaupun terdapat juga kelemahannya, yaitu adanya ongkos tambahan untuk pengerukan tanah dan biaya operasional reaktor yang cenderung mahal.

## **Studi Kasus Mekanisme Bioremediasi Limbah Cair Industri**

### **a. Industri Penyamakan Kulit di Malang**

Sebagian besar industri kulit merupakan kategori industri rumah tangga yang berkembang dan membentuk sentra. Proses pengerjaan mempergunakan air dalam jumlah yang cukup besar. Air berfungsi sebagai pelarut penggunaan bahan kimia dan juga sebagai pembersih. Kompleksnya bahan baik organik ataupun anorganik yang digunakan dalam proses ini, menjadikan limbah cairnya juga bersifat kompleks. Salah satu jenisnya adalah logam berat krom.

### **Bakteri Pendegradasi dalam Industri Penyamakan Kulit**

Mikroba memiliki kemampuan untuk mendekomposisi seluruh bahan sehingga bioremediasi dan biodegradasi dapat efisien. Dalam hal ini, lebih ditekankan pada

kompleksitas bahan organik. Dimana bahan organik ini akan dapat diuraikan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan dapat menjadi sumber nutrisi dari bakteri heterotrof. Sehingga proses nitrifikasi pada air limbah hasil industri, menjadi nutrisi bagi bakteri. Sehingga untuk proses dekomposisi amonia limbah, dapat berjalan optimal.

Bakteri lokal yang berpotensi untuk mendegradasi bahan organik, terutama kadar lemak pada limbah industri penyamakan kulit yang telah dilakukan, yaitu dengan menggunakan *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas pseudomallei*, dan *Actinobacillus sp* (Fidiastuti & Suarsini, 2017). Penelitian lain yang telah menggunakan metode bioremediasi untuk pengolahan limbah penyamakan kulit adalah Ashraf et al., (2018) dengan *Enterobacter sp. HU38*, *Microbacterium arborescens HU33*, dan *Pantoea stewartii ASI11*. Dimana ketiganya memberikan hasil yang efektif untuk mereduksi BOD, COD, TDS, TSS, dan Cr dengan data berurutan 70, 63, 57, 87, and 54% dengan masa inkubasi selama 9 hari. penelitian dari Pritha Pal et al., (2023) bahwa penggunaan metode bioremediasi memberikan keunggulan tidak adanya hasil samping terhadap lingkungan. Penelitiannya menggunakan mikroba *E.Coli* dengan mendegradasi limbah secara berurutan COD (90%), BOD (90%), dan Cr (63.8%).

Penurunan yang signifikan terhadap nilai COD dan BOD dikaitkan dengan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mengoksidasi bahan-bahan organik menjadi karbondioksida dan air. Selain itu juga untuk sumber nutrisi mikroorganisme.

#### **b. Industri Pengolahan Ikan di Tulungagung**

Penghasil limbah cair lainnya adalah industri pembekuan ikan. Konsumsi air terbesar adalah untuk proses pencucian

bahan baku, peralatan, pembekuan ikan kaca, dan pengasapan ikan. Limbah yang dihasilkan juga beragam, misalnya pencucian bagian dalam dan luar tubuh ikan menghasilkan ammonia yang tinggi. Salah satu solusi untuk pengelolaan limbahnya adalah dengan aktivitas mikroorganisme.

### **Bakteri Pendegradasi dalam Industri Pengolahan Ikan**

Efektivitas dan pengaruh dari mikroba dalam metode bioremediasi cukup tinggi dalam pengolahan air limbah. Aktivitas mikroba akan berpengaruh untuk mendegradasi substrat secara biologi. Beberapa penelitian yang telah dilakukan adalah dengan menggunakan kombinasi mikroorganisme dan tumbuhan air *Lemna minor* untuk mendegradasi limbah pencucian ikan. Mikroorganisme yang digunakan terdiri dari bakteri ragi (*Actinomyces sp.*) (*Sacharomyces sp.*), bakteri asam laktat (*Lactobacillus sp.*), fotosintetik (*Rhodospseudomonas sp.*), dan jamur fermentasi (*Aspergillus dan Penicillium*). Hasil penelitian menghasilkan metode yang efektif untuk mereduksi amoniak, nitrat, dan nitrit (Saputra et al., 2016).

Penelitian lain industri pengolahan ikan adalah pembekuan ikan kaca piring yang telah dilakukan oleh Banin et al., (2021) dengan memanfaatkan bakteri *Nitrococcus sp.*, *Pseudomonas putida sp.*, *Acinetobacter baumannii*, dan *Bacillus megaterium*. Hasil penelitian memberikan hasil nyata untuk semua parameter, yang terdiri dari pH, BOD, TSS, COD, ammonia, serta minyak dan lemak.

Aktivitas lain yang termasuk dalam industri pengolahan ikan adalah pengasapan ikan. Berdasarkan penelitian pendahuluan yang dilakukan Al-Irsyad et al., (2023), di Sentra Pengasapan Ikan X Kabupaten Tulungagung, industri pengasapan ikan menghasilkan limbah cair

ammonia yang melebihi baku mutu. Standar baku mutu yang digunakan adalah Permen LH RI Nomor 5 Tahun 2014. Dalam penelitian menggunakan metode bioremediasi yang memanfaatkan kombinasi *Effective Microorganism 4* (EM 4) dan *Pistia stratiotes* yang dilakukan dengan skala laboratorium. Analisis data pengujian dilakukan menggunakan uji *one-way ANOVA*. Efektivitas penurunan limbah ammonia adalah sebesar 93,56%.

### c. **Industri Obat Tradisional**

Industri obat tradisional merupakan salah satu industri penghasil limbah cair. Bakteri yang dikonsorsiumkan pada penelitian Yanti et al. (2023) meliputi spesies bakteri *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Klebsiella sp.* Dalam penelitian ini dilakukan konsorsium bakteri *Bacillus s.* & *Pseudomonas a.* (AB); *Bacillus s.* & *Klebsiella sp* (AC); (*Pseudomonas a.* & *Klebsiella sp.* (BC); dan *Bacillus s.*, *Pseudomonas a.*, & *Klebsiella sp.* (ABC). Hasil penelitian menunjukkan kadar pH, TSS, COD, BOD, Fenol sebesar 2; 60; 78; 36; 0,002 ppm.

## **KESIMPULAN DAN PERSPEKTIF KE DEPAN**

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk membuktikan bahwa penggunaan mikroba dengan metode bioremediasi dalam pengolahan limbah cair industri, telah memberikan hasil yang signifikan. Namun demikian, perlu adanya peningkatan proses teknik pelaksanaan untuk memastikan keamanan lingkungan yang berkelanjutan (*sustain*). Adanya konsorsium mikroba yang beragam, memberikan hasil yang lebih nyata dan menjadi pendekatan yang lebih untuk metode bioremediasi. Kombinasi ini juga bertujuan untuk meningkatkan laju biodegradasi. Peningkatan potensi konsorsium mikroba dengan nanopartikel

juga perlu untuk adanya pendalaman. Hal ini dikarenakan kombinasi keduanya dapat meningkatkan aktivitasnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adzini, I. N., Dermawan, D., & Apriani, M. (2003). Pengaruh Penambahan Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* pada Bioremediasi Total Petroleum Hydrocarbon Penambangan Minyak Bumi Tradisional di Jawa Timur. *National Conference Proceeding on Water Treatment Technology*, 2623, 1–6.
- Al-Irsyad, M., Ngaini, E. R., Kustono, D., & Hapsari, A. (2023). Efektivitas Kombinasi *Pistia Stratiotes* dan Effective Microorganism 4 (EM-4) sebagai Bioremediator dalam Menurunkan Kadar Amonia Limbah Cair Sentra Pengasapan Ikan. *Sport Science and Health*, 5(4), 464–474. <https://doi.org/10.17977/um062v5i42023p464-474>
- Ashraf, S., Naveed, M., Afzal, M., Ashraf, S., Rehman, K., Hussain, A., & Zahir, Z. A. (2018). Bioremediation of tannery effluent by Cr- and salt-tolerant bacterial strains. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(12), 716. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7098-0>
- Bahtiar, L. A., & Hidayat, J. W. (2019). Pengaruh Bioremediasi Tanaman Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) Terhadap Penurunan Amoniak, pH, Minyak dan Lemak pada Limbah Minyak Mentah Wonocolo Bojonegoro. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan, Dan Infrastruktur*, 2, 1–7.
- Banin, M. M., Yahya, Y., & Nursyam, H. (2021). Pengolahan limbah cair industri pembekuan ikan kaca piring (*Sillago sihama*) menggunakan kombinasi bakteri *Acinetobacter baumannii*, *Bacillus megaterium*, *Nitrococcus* sp. dan *Pseudomonas putida* secara aerob. *Journal of Tropical AgriFood*, 3(1), 49.

- <https://doi.org/10.35941/jtaf.3.1.2021.6119.49-62>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Dell'Anno, F., Rastelli, E., Tangherlini, M., Corinaldesi, C., Sansone, C., Brunet, C., Balzano, S., Ianora, A., Musco, L., Montereali, M. R., & Dell'Anno, A. (2021). Highly Contaminated Marine Sediments Can Host Rare Bacterial Taxa Potentially Useful for Bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, 12(March), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.584850>
- Fidiastuti, H. R., & Suarsini, E. (2017). Potensi Bakteri Indigen Dalam Mendegradasi Limbah Cair Pabrik Kulit Secara in Vitro. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.23917/bioeksperimen.v3i1.3665>
- Kapahi, M., & Sachdeva, S. (2019). *Bioremediation Options for Heavy Metal Pollution*. 9(24).
- Kour, D., Khan, S. S., Kour, H., Kaur, T., Devi, R., Rai, P. K., Judy, C., McQuestion, C., Bianchi, A., Spells, S., Mohan, R., Rai, A. K., & Yadav, A. N. (2022). Microbe-mediated bioremediation: Current research and future challenges. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 10(Suppl 2), 6–24. <https://doi.org/10.7324/JABB.2022.10s202>
- Kumar, G., Lal, S., Soni, S. K., Maurya, S. K., Shukla, P. K., Chaudhary, P., Bhattacharjee, A. K., & Garg, N. (2022). Mechanism and kinetics of chlorpyrifos co-metabolism by using environment restoring microbes isolated from rhizosphere of horticultural crops under subtropics. *Frontiers in Microbiology*, 13(July), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.891870>
- Mukjang, N., Chitov, T., Mhuantong, W., Champreda, V.,

- Pathom-aree, W., Sattayawat, P., & Bovonsombut, S. (2022). Bacterial Communities Associated with Crude Oil Bioremediation through Composting Approaches with Indigenous Bacterial Isolate. *Life*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/life12111712>
- Nowicka, B., Fesenko, T., Walczak, J., & Kruk, J. (2020). The inhibitor-evoked shortage of tocopherol and plastoquinol is compensated by other antioxidant mechanisms in *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to toxic concentrations of cadmium and chromium ions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110241>
- Pande, V., Pandey, S. C., Sati, D., Pande, V., & Samant, M. (2020). Bioremediation: an emerging effective approach towards environment restoration. *Environmental Sustainability*, 3(1), 91–103. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00099-w>
- Perera, I. C., & Hemamali, E. H. (2022). *Genetically Modified Organisms for Bioremediation: Current Research and Advancements BT - Bioremediation of Environmental Pollutants: Emerging Trends and Strategies* (D. C. Suyal & R. Soni (eds.); pp. 163–186). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8_7)
- Pritha Pal, Banik, R. D., & Sibashish Baksi. (2023). GREEN STRATEGY FOR RECLAIMING ECOSYSTEM: MICROBIAL REMEDIATION OF LEATHER INDUSTRY WASTES. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(1S), 6432–6441.
- Saputra, A. D., Haeruddin, H., & Widyorini, N. (2016). EFEKTIVITAS KOMBINASI MIKROORGANISME DAN TUMBUHAN AIR Lemna minor SEBAGAI BIOREMEDIATOR DALAM MEREDUKSI SENYAWA

- AMONIAK, NITRIT, DAN NITRAT PADA LIMBAH PENCUCIAN IKAN. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 5(3), 80–90. <https://doi.org/10.14710/marj.v5i3.14393>
- Singh, R. K., Tripathi, R., Ranjan, A., & Srivastava, A. K. (2020). Chapter 9 - Fungi as potential candidates for bioremediation (P. Singh, A. Kumar, & A. B. T.-A. of E. P. Borthakur (eds.); pp. 177–191). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00009-6>
- V.R., M., Y.A.R., L., Lange, L. C., & L.V.S., S. (2019). Simultaneous biosorption of Cd(II), Ni(II) and Pb(II) onto a brown macroalgae *Fucus vesiculosus*: Mono- and multi-component isotherms, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Management*, 251, 109587. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109587>
- Vareda, J. P., Valente, A. J. M., & Durães, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, 246, 101–118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.126>
- Yanti, W. N., Prasadi, O., & Pramita, A. (2023). Pengaruh Penambahan Konsorsium Bakteri Aerob Terhadap Kadar Pencemar Limbah Cair Industri Obat Tradisional. *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, 9(1), 91–102.

## PROFIL PENULIS



### **Dyah Setyaningrum, S.Si., M.Sc.**

Penulis adalah dosen tetap di Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bojonegoro. Menyelesaikan pendidikan S1 di Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan IPA, Universitas Negeri Semarang (FMIPA UNNES) tahun 2013. Kemudian melanjutkan pendidikan dan lulus S2 di Program Studi Magister Kimia, FMIPA UGM tahun 2016. Saat ini Mengampu mata kuliah Kimia Analisis Dasar, Pemisahan Analitik, Kimia Industri, dan Sampling dan Preparasi. Fokus penelitian yang dilakukan adalah Material Bionanokomposit, kualitas air, dan pemisahan logam. Saat ini penulis aktif menjadi Tim Pakar/ Tenaga Ahli Biogeofisik Kimia Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bojonegoro dalam penyusunan dokumen AMDAL.



## **BAB 9**

# **INOVASI GENETIK UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN LINGKUNGAN**

Suci Lestari  
Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Jakarta  
E-mail: suci.lestari@uhamka.ac.id

### **PENDAHULUAN**

Perkiraan populasi dunia akan mencapai 9,5 miliar pada tahun 2050, diperkirakan permintaan pangan juga akan meningkat hingga 70%. Kapasitas produksi pertanian memang meningkat selama dan setelah Revolusi Hijau, namun tingkat produksi saat ini sepertinya tidak akan mendukung perkiraan pertumbuhan penduduk. Produksi pangan saling terkait dengan perubahan lingkungan. Menurunnya keanekaragaman hayati, karena: penggundulan hutan, polusi dan tidak dilestarikannya spesies tanaman tradisional, mempunyai dampak negatif tidak hanya pada perubahan iklim namun juga pada kapasitas produksi pangan. Dampak utama dari perubahan iklim (yaitu kenaikan suhu dan tingkat CO<sub>2</sub>) membatasi pertumbuhan dan kapasitas produktif tanaman konvensional berdasarkan strategi pengelolaan saat ini dan, selain itu, memperburuk parahnya kendala lingkungan yang utama. Dampak-dampak yang akan terjadi meliputi perubahan musim tanam, yang mempengaruhi masa pemasakan tanaman; pola curah hujan yang tidak dapat diprediksi, sehingga membatasi ketersediaan air selama periode pertumbuhan kritis; kenaikan permukaan air laut, yang membanjiri atau membuat lahan pertanian dan air tanah di wilayah pesisir menjadi asin; dan meningkatnya frekuensi kejadian iklim ekstrem yang menyebabkan kerusakan tanaman yang parah yang berdampak negatif pada ketahanan pangan.

Ketahanan pangan merupakan isu global yang mencakup ketersediaan, akses, penggunaan, dan stabilitas pangan. Ketahanan lingkungan, di sisi lain, mengacu pada kemampuan sistem ekologis untuk bertahan dari tekanan lingkungan dan tetap produktif. Hubungan antara ketahanan lingkungan dan ketahanan pangan sangat erat, karena kondisi lingkungan yang baik mendukung produksi pangan yang stabil. Inovasi genetik merupakan salah satu alternatif yang dapat membantu meningkatkan ketahanan lingkungan tanaman, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan pangan.

## **INOVASI GENETIK UNTUK KETAHANAN LINGKUNGAN**

Inovasi genetik mencakup berbagai jenis, seperti rekayasa genetik tanaman dan hewan, serta bioteknologi modern yang memungkinkan pengembangan organisme yang tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Rekayasa genetik adalah proses memodifikasi materi genetik suatu organisme untuk mencapai sifat-sifat tertentu yang diinginkan.

Beberapa metode yang paling umum dalam rekayasa genetik adalah: **Rekombinasi Gen**: melibatkan penggabungan DNA dari dua sumber yang berbeda untuk menciptakan urutan genetik baru. Teknik ini sering digunakan untuk membuat organisme transgenik. Rekombinasi gen digunakan dalam pembuatan vaksin, produksi protein terapeutik, dan pengembangan tanaman dengan sifat unggul. **CRISPR-Cas9**: teknologi penyuntingan gen yang memungkinkan pemotongan DNA pada lokasi yang spesifik untuk kemudian dimodifikasi. Sistem ini menggunakan enzim Cas9 dan *guide* RNA (gRNA) untuk mengenali dan memotong urutan DNA yang ditargetkan. Digunakan dalam penelitian medis untuk mengobati penyakit genetik, dalam pertanian untuk menciptakan tanaman yang tahan hama, dan dalam bioteknologi untuk berbagai modifikasi

genetik. **TALENs** (*Transcription Activator-Like Effector Nucleases*): enzim yang dapat diprogram untuk memotong DNA pada lokasi tertentu. Mereka terdiri dari domain pengikat DNA yang dapat diubah untuk mengenali urutan spesifik dan domain nuklease yang memotong DNA. TALENs digunakan untuk penelitian genetik, pembuatan model hewan untuk penyakit manusia, dan pengembangan tanaman transgenik. **ZFN** (*Zinc Finger Nucleases*): enzim yang juga dapat memotong DNA pada lokasi yang spesifik. Mereka menggunakan domain "zinc finger" untuk mengenali dan mengikat urutan DNA tertentu dan domain nuklease untuk memotong DNA. ZFN telah digunakan dalam terapi gen, terutama untuk mengobati penyakit genetik seperti HIV.

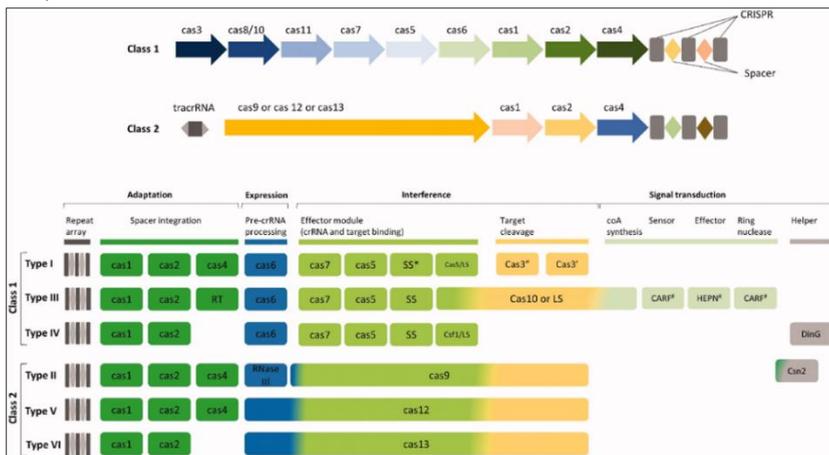
Berdasarkan teknik pengeditan gen di atas, sistem *CRISPR/Cas9* memiliki kesederhanaan *multiplexing* dibandingkan TALEN dan ZFN. Beberapa gen nonhomolog dapat ditargetkan secara bersamaan menggunakan beberapa gRNA yang digabungkan dengan satu *Cas9* (atau varian lainnya), sedangkan platform TALEN dan ZFN memerlukan konstruksi baru untuk setiap target nonhomolog. Sistem *CRISPR/Cas9* lebih mudah untuk direkayasa, dan memungkinkan penargetan DNA yang termetilasi (Tabel 9.1). Oleh karena itu, Sistem *CRISPR/Cas9* banyak digunakan untuk karakterisasi gen fungsional serta perbaikan tanaman.

Tabel 9.1. Tabel perbandingan teknik dalam pengeditan genom.

	<b><i>Zinc Finger Nucleases (ZFNs)</i></b>	<b><i>Transcription Activator-like Effector Nucleases (TALENs)</i></b>	<b><i>Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (CRISPR/Cas)</i></b>
<b>Asal</b>	<i>Zinc finger motifs</i>	<i>Xanthomonas campestris</i>	<i>Streptococcus pyogenes</i>
<b>Komponen</b>	ZFP-FokI	TALE-FokI	Cas9, sgRNA
<b>Pembelahan</b>	Untai tunggal	Untai tunggal	Untai ganda
<b>Mekanisme</b>	Interaksi DNA-protein	Interaksi DNA-protein	Interaksi RNA-DNA
<b>Situs sasaran</b>	Kaya Guanine	Tidak terbatas	PAM (NGG)
<b>Efisiensi</b>	Variabel	Sedang	Tinggi
<b>Biaya</b>	Tinggi	Sedang	Rendah
<b>Keuntungan</b>	Dapat menargetkan urutan apa pun	Dapat menargetkan urutan apa pun	Pengeditan genom multipleks
	Kekhususan sedang	Spesifisitas tinggi	Spesifisitas tinggi
	Ukuran protein kecil (<1 kb)	Mengurangi tidak tepat sasaran	Mudah direkayasa
<b>Kekhususan</b>	Tidak dapat dimultipleks	Tidak dapat dimultipleks	diperlukan urutan PAM
	Perakitan yang sulit	Sulit untuk teknik	Terbatas pada konten GC tinggi
	Jauh dari sasaran	Jauh dari sasaran	Sedang di luar target
	Afinitas dan spesifisitas rendah	Memakan waktu	Ukuran Cas9 besar (~4.2 kb)

## PERKEMBANGAN DAN POTENSI SISTEM *CRISPR/Cas* Hubungan Sistem Pengeditan Genom dan *CRISPR/Cas9*

Sistem *CRISPR/Cas9* didasarkan pada mekanisme imunitas adaptif yang ditemukan pada bakteri dan *Archaea*, yang rangkaian virusnya ditangkap dan digunakan untuk menargetkan *endonuklease* guna menghancurkan genom virus yang ditemukan untuk kedua atau selanjutnya. Sistem pengeditan genom kanonik terdiri dari rangkaian pendek sintetik *guide* RNA (gRNA) yang terdiri dari 20 nukleotida, yang membentuk kompleks dengan *nuklease Cas9* dan memandunya ke rangkaian DNA tertentu, menghasilkan *Double-Stranded Break* (DSB). Sistem *CRISPR/Cas* diklasifikasikan menjadi dua kelas dan enam kelompok. Sistem kelas 1 (tipe I, III, dan IV) mengandalkan kompleks protein multi-Cas untuk melakukan interferensi, sedangkan sistem kelas 2 (tipe II, V, dan VI) melakukan interferensi dengan protein efektor tunggal yang membentuk kompleks dengan *CRISPR RNA* (crRNA) (Gambar 9.1).

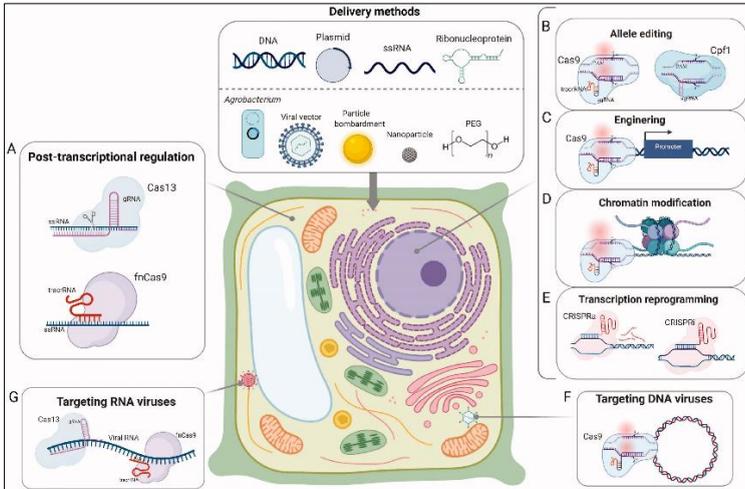


Sumber: Kouhen *et al.* (2023)

Gambar 9.1. Klasifikasi terbaru sistem *CRISPR-Cas*.

Secara umum, sistem *CRISPR-Cas* terdiri dari dua bagian: sekumpulan protein *Cas*, yang terlibat dalam imunitas, dan susunan *CRISPR*, yang terdiri dari pengulangan langsung dan pengatur jarak. Berdasarkan protein *Cas*, sistem *CRISPR Cas* dibagi menjadi dua kelas, yaitu kelas 1 dan kelas 2. Sistem *CRISPR-Cas* kelas 1 terdiri dari sekumpulan kompleks efektor, sedangkan sistem kelas 2 berisi protein efektor tunggal. Setiap kelas mencakup tiga subtype—tipe I, III, dan IV pada sistem kelas 1 dan tipe II, V, dan VI pada sistem kelas 2.

Reagen CRISPR dikirimkan sebagai DNA, plasmid, ssRNA, atau ribonukleoprotein. Metode penyampaiannya meliputi *Agrobacterium*, vektor virus, pemboman partikel, nanopartikel, atau transformasi yang dimediasi PEG. Di dalam sitosol, nuklease CRISPR dapat membelah dan mengedit molekul RNA melalui protein Cas yang menargetkan RNA, seperti Cas13 dan FnCas9 (A). Di dalam nukleus, teknologi CRISPR diterapkan untuk mencapai pengeditan alel melalui Cas9 dan Cpf1, dua gunting molekuler (B) yang paling umum digunakan. Rekayasa promotor yang dimediasi CRISPR menargetkan elemen pengatur cis yang mengubah ekspresi gen (C). Alat modifikasi kromatin dapat diterapkan untuk memfasilitasi modifikasi epigenetik dalam paket DNA *melalui* efektor yang mengubah tanda epigenetik, memungkinkan pemrograman ulang ekspresi gen target (D). Untuk mengatur ekspresi gen, sistem aktivator dan represi berbasis CRISPR (CRISPRa/i) dirancang untuk mengaktifkan/menonaktifkan gen target, dan alat CRISPR juga dapat digunakan untuk mematikan ekspresi gen target dan pemrograman ulang transkripsional (E). Varian Cas yang dikembangkan menargetkan virus RNA dan DNA (F – G).



Sumber: Kouhen *et al.* (2023)

Gambar 9.2. Penerapan teknologi CRISPR pada sel tumbuhan.

## MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS TANAMAN DENGAN *CRISPR/Cas9*

### Karakterisasi Fungsional Gen

Sistem *CRISPR/Cas9* dapat digunakan untuk pengeditan skala genom high-throughput untuk mengidentifikasi gen, termasuk *quantitative trait loci (QTL)*, yang terkait dengan hasil panen. Pendekatan yang sama kemudian dapat digunakan untuk menargetkan beberapa gen yang terkait dengan hasil panen sebagai langkah menuju menghasilkan tanaman dengan hasil tinggi. Misalnya, *CRISPR/Cas9* digunakan untuk menargetkan beberapa gen yang terkait dengan ukuran butir beras. *Knockout ORF3* dan *OsAAP3* meningkatkan ukuran butir beras, sehingga dapat meningkatkan hasil panen secara keseluruhan. *Knockout* dua isoform *miR396* padi (*MIR396e* dan *MIR396f*) meningkatkan percabangan malai dan ukuran butir, sehingga menghasilkan hasil yang lebih tinggi dalam kondisi kekurangan nitrogen. Dalam gandum, pencapaian homeolog secara

bersamaan: *TaGW2-A1*, *TaGW2-B1* dan *TaGW2-D1*, mengungkapkan perbedaan fungsional dan interaksi aditif dalam kontrol genetik biji-bijian dan kandungan protein. Mutasi hilangnya fungsi pada *Grain number 1a (Gn1a)* dan *Grain Size 3 (GS3)* menghasilkan padi hibrida dengan gabah yang lebih besar dan lebih berat, serta jumlah gabah yang lebih tinggi.

Modifikasi homeostasis sitokinin pada padi dengan menargetkan cytokinin-activation enzyme (*LOGL5*) memberikan hasil yang lebih baik dalam berbagai kondisi lingkungan. Protein transporter gula *OsSWEET11* dipelajari untuk transportasi gula *postphloem* selama pengembangan kariopsis awal, menghasilkan garis-garis dengan berat butir dan persentase pengaturan benih yang lebih rendah. Pada gandum, gen *GASR7* yang mengendalikan berat dan panjang biji dihilangkan dan menghasilkan tanaman dengan berat kernel lebih tinggi, dan mematikan gen *CKX* yang mengkode *sitokinin oksidase/dehidrogenase (CKX)* yang menyebabkan peningkatan hasil metabolisme sitokinin. Pada tomat, pengeditan gen *CLV* dan *ENO* mengontrol perkembangan meristem dapat menghasilkan tanaman dengan hasil lebih baik. Teknologi *CRISPR/Cas9* telah digunakan untuk mengisolasi dan mengkarakterisasi beberapa *QTL*. Sifat-sifat hasil yang kompleks pada padi diselidiki dengan mengurutkan 30 varietas, sehingga memungkinkan identifikasi 57 kandidat gen terkait hasil. *Knockout CRISPR/Cas9* menunjukkan bahwa beberapa gen ini berhubungan langsung dengan regulasi sifat yang dihasilkan. Pada umumnya, panjang daun padi *QTL (qLL9)* terbukti sealel terhadap *DEP1*, memberikan peluang pemanfaatan piramida gen yang menyerupai qLL9. Dalam studi lain, mengedit jumlah butir dan ukuran butir *QTL Gn1a* dan *GS3*, mengungkapkan efek spesifik variasi pada hasil bulir padi.

## **Piramida Gen**

Piramidasi adalah penumpukan beberapa transgen dalam tanaman, yang dapat dicapai dengan menyilangkan varietas transgenik, dengan mentransformasikan satu varietas transgenik dengan gen tambahan, atau dengan transformasi multigenik, yang menghasilkan ekspresi beberapa sifat secara simultan dalam satu varietas. *CRISPR/Cas9* dapat digunakan dengan cara serupa untuk menyusun beberapa mutasi *knockout*, seperti yang terlihat pada gen padi *GW2*, *GW5*, dan *TGW6*. Mutan ganda dan rangkap tiga membuat butir yang lebih besar selama tiga generasi. Hal ini menunjukkan bahwa mutasi piramida dengan *CRISPR/Cas9* dapat meningkatkan bobot butir beras secara signifikan.

## **Domestikasi *De novo***

Kebutuhan mendesak akan adaptasi kultivar untuk mengatasi perubahan iklim hanya dapat dipenuhi dengan metode baru yang jauh lebih cepat dibandingkan pemuliaan konvensional. Oleh karena itu, perangkat *CRISPR* telah dimanfaatkan untuk menjinakkan spesies liar atau semi-peliharaan, yang dicirikan oleh: adaptasi yang kuat terhadap iklim lokal, ketahanan terhadap stres, dan sifat nutrisi yang bermanfaat. Namun, percepatan domestikasi yang dimediasi oleh *CRISPR/Cas9* menghadapi beberapa hambatan. Karakterisasi spesies liar yang ekstensif diperlukan untuk menemukan kandidat gen domestikasi, dan banyak spesies liar yang resisten terhadap transfer gen dan regenerasi *in vitro*, sehingga diperlukan protokol transformasi yang disesuaikan dengan kebutuhan. Efisiensi multiplexing juga harus disesuaikan untuk memungkinkan pengeditan beberapa lokus domestikasi secara bersamaan

## MENGATASI TEKANAN ABIOTIK

### Kekeringan

Gen dan protein yang terlibat dalam toleransi terhadap cekaman kekeringan merupakan sumber daya yang berguna untuk pemuliaan tanaman, khususnya padi, yang merupakan tanaman pangan pokok bagi lebih dari separuh populasi dunia. CRISPR/Cas9 telah digunakan untuk mematikan *gen SAPK2* padi yang mengkode protein kinase SNF yang terlibat dalam sinyal stres osmotik, yang meningkatkan sensitivitas terhadap kondisi kekurangan air dan kerusakan yang disebabkan oleh akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS). *Knockout* (KO) ganda pada dua gen *semirolled leaf* (*SRL1* dan *SRL2*) meningkatkan toleransi terhadap cekaman kekeringan dan menghasilkan pengisian gabah yang lebih efisien dibandingkan dengan tanaman tipe liar, bersamaan dengan perubahan signifikan pada proteom. Analisis fungsional *ligase ubiquitin U-box E3* yang dikodekan oleh *OsPUB67* mengungkapkan bahwa ekspresi berlebih meningkatkan toleransi terhadap kekeringan, sedangkan KO yang dihasilkan menggunakan CRISPR/Cas9 tidak menghasilkan ekspresi berlebih. *Knockout OsABA8ox2* meningkatkan toleransi kekeringan pada bibit padi dengan meningkatkan akumulasi asam absisat (ABA). Berbagai faktor transkripsi juga telah terbukti mengatur toleransi stres pada padi. Pembungkaman gen *OsEBP89* (mengkodekan faktor responsif APETALA2/etilen yang dihambat oleh cekaman kekeringan) meningkatkan pertumbuhan tanaman mutan dalam kondisi kekeringan buatan yang disebabkan oleh paparan polietilen glikol (PEG). Hilangnya faktor transkripsi NAC yang dikodekan oleh *OsNAC006* membuat tanaman padi mutan lebih sensitif terhadap cekaman kekeringan.

Pada tomat, tanaman yang paling penting secara ekonomi keempat di dunia, tekanan kekeringan sangat mempengaruhi hasil dan kualitas buah. Mutan *knockout CRISPR/Cas9*

dari *SIMAPK3* kurang toleran terhadap kekeringan dibandingkan tanaman tipe liar dan menunjukkan gejala layu yang lebih parah, karena *MAPK3* adalah komponen utama jalur sinyal kekeringan dan mutan yang tidak meningkatkan biosintesis antioksidan sebagai respons terhadap kelangkaan air. *SINPR1* dihilangkan pada varietas tomat “*Ailsa Craig*”, mengurangi toleransi terhadap kekeringan, sebagian dengan mencegah penutupan stomata dan sebagian lagi dengan menghambat produksi enzim antioksidan. *Knockout* gen *SIWHY2* dibandingkan dengan tiga galur *RNAi SIWHY2* independen, mengungkapkan bahwa mutan tersebut lebih toleran terhadap kekeringan karena penekanan total aktivitas gen *WHY2*, menghasilkan produksi biomassa yang lebih tinggi, fotosintesis yang lebih efisien, dan penekanan akumulasi ROS.

### **Salinitas**

Tekanan salinitas merupakan ancaman yang semakin meningkat di wilayah pesisir akibat masuknya air asin, dan hal ini khususnya berdampak pada penanaman padi. Padi *bilateral blade senescence 1 (bbs1)* telah dinilai dalam kondisi salin menggunakan sistem *pYLCRISPR-Cas9P<sub>ubi</sub>-H* untuk pengeditan genom multiplex yang efisien. Tanaman mutan lebih sensitif terhadap cekaman garam dan ditandai dengan kandungan klorofil yang lebih rendah dan aktivitas antioksidan yang lebih rendah. Demikian pula, membungkam gen *OsHKT1;3* akan mengurangi toleransi terhadap salinitas dan mengubah profil distribusi  $\text{Na}^+$ , dimana tanaman tipe liar mengakumulasi lebih banyak  $\text{K}^+$  pada daun muda dan lebih banyak  $\text{Na}^+$  pada daun tua, namun mutan mengakumulasi  $\text{Na}^+$  pada jaringan termuda dari tanaman. Gen *OsC2DP* dihilangkan dan terkena salinitas sedang (100 mM NaCl), mengakibatkan akumulasi lebih banyak  $\text{Na}^+$  pada pucuk dibandingkan dengan tanaman liar sehingga lebih sensitif

terhadap garam. Mutan *knockout* CRISPR/Cas9 dari gen *OsMPT3;1* dan *OsMPT3;2* juga ditemukan lebih sensitif terhadap salinitas, mencerminkan modulasi beberapa gen yang terlibat dalam metabolisme sekunder (terutama pada mutan *OsMPT3;2*). Demikian pula, membungkam gen *FLN2* yang mengkode protein mirip *fruktokinase-2* pada tanaman padi japonica menyebabkan penurunan toleransi terhadap salinitas dibandingkan dengan tanaman tipe liar bersamaan dengan penurunan yang signifikan (sukrosa sintase, invertase asam, dan aktivitas invertase netral) pada akar tanaman padi japonica.

Pada jagung, pengaruh kadar asam giberelat (GA) terhadap toleransi salinitas diuji dengan menghasilkan dua jalur *knockout* (*zmcp5-1* dan *zmcp5-7*) dari *entcopalyl diphosphate synthase* (enzim yang terlibat dalam biosintesis GA). Kedua mutan tersebut menunjukkan toleransi terhadap salinitas yang lebih besar dibandingkan tanaman liar, hal ini mencerminkan aktivitas antioksidan dan akumulasi osmolitnya yang lebih tinggi. Baru-baru ini, faktor transkripsi NAC yang dikodekan oleh *SITAF1* dihilangkan pada tomat, mengurangi toleransi salinitas dengan memungkinkan akumulasi ion Na<sup>+</sup>.

## **Stres Panas**

Konsekuensi utama dari perubahan iklim adalah peningkatan suhu global, serta perubahan suhu regional yang mengancam tanaman yang beradaptasi dengan iklim lokal. Cekaman panas mempunyai pengaruh besar terhadap fotosintesis dengan cara menonaktifkan: fotosistem termolabil II (PSII), memecah klorofil, menonaktifkan enzim RuBisCO, dan menghambat sintesis protein. CRISPR/Cas9 telah digunakan untuk memahami jalur sinyal tekanan panas pada tanaman, sebelum mengembangkan varietas dengan toleransi panas yang lebih baik.

Gen *heat-sensitive albino 1 (HSA1)* yang sensitif terhadap panas yang mengkode regulator kloroplas HSA1 telah hilang dalam beras dan mutan menunjukkan sensitivitas panas yang lebih tinggi, serta fenotip penghijauan yang lebih cepat, menyiratkan peran HSA1 dalam melindungi kloroplas untuk mempertahankan pertumbuhan dan hasil padi di bawah tekanan panas. CRISPR/Cas9 juga digunakan untuk mengungkap peran faktor transkripsi *MADS box transcription factor AGAMOUS-LIKE 6 (SIAGL6)* pada tomat tanpa biji. Mutan *slagl6* menghasilkan buah lebih efisien di bawah tekanan panas dibandingkan tanaman tipe liar, menunjukkan bahwa gen tersebut merupakan kandidat yang cocok untuk pembiakan *parthenocarp* dan toleransi panas. Gen *SIMAPK3* yang mengkode protein kinase yang diaktivasi mitogen tomat dihilangkan untuk menentukan perannya dalam toleransi panas. Mutan *slmapk3* tidak hanya lebih toleran terhadap panas dibandingkan tanaman tipe liar, namun juga menunjukkan tingkat layu yang tidak terlalu parah akibat tekanan, mengumpulkan tingkat ROS yang lebih rendah, dan meningkatkan regulasi gen yang mengkode faktor transkripsi tekanan panas (HSFs) dan protein kejutan panas (HSPs), menunjukkan bahwa SIMAPK3 adalah pengontrol negatif termotoleransi.

## **Halofit**

Halofit secara alami merupakan tanaman toleran terhadap garam yang sering dieksploitasi untuk meningkatkan produktivitas pertanian di wilayah di mana tanaman lebih terkena dampak salinitas. Banyak halofit telah mengembangkan fitur anatomi spesifik yang dikenal sebagai kantung garam, di mana sel kandung kemih epidermis dapat menyerap ion  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , dan  $\text{K}^+$  hingga 1000 kali lipat lebih banyak dibandingkan sel epidermis normal, selain memainkan peran penting sebagai:

epidermis sekunder, mengurangi kehilangan air dan mencegah kerusakan akibat sinar UV. Halofit secara intrinsik tidak tahan terhadap garam. Mereka rentan terhadap kadar garam yang tinggi dengan cara yang sama seperti glikofit, namun mereka mempunyai kemampuan untuk menyita kelebihan  $\text{Na}^+$  dalam vakuolanya karena ekspresi konstitutif dari antiporter  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  yang terstimulasi oleh salinitas. Modulasi bukaan dan kepadatan stomata juga merupakan sifat utama yang berkontribusi terhadap kinerja halofit yang luar biasa. Sementara glikofit melakukan penurunan: konduktansi stomata, asimilasi  $\text{CO}_2$ , dan laju transpirasi yang lebih rendah ketika terkena garam, halofit seperti: *Chenopodium quinoa*, *Kochia prostrata*, dan *Atriplex halimus* mempertahankan kepadatan stomata yang rendah yang meningkatkan toleransi salinitasnya. Perbedaan lain antara halofit dan glikofit terletak pada modifikasi pasca-translasi, sebagaimana dikonfirmasi oleh analisis proteomik.

Halofit merupakan sumber daya genetik yang menjanjikan untuk dipertimbangkan dalam program pemuliaan yang tahan terhadap stres. Ketahanan spesies halofit disebabkan oleh peningkatan regulasi gen responsif terhadap stres yang dimiliki oleh semua tanaman. Beberapa halofit telah disaring untuk gen toleransi stres abiotik, dengan fokus khusus pada spesies: *Salicornia*, *Suaeda*, *Atriplex*, *Thellungiella* dan *Aeluropus*. Menariknya, promotor NHX1 dari halofit pesisir *Cochlearia x hollandica* secara signifikan meningkatkan regulasi aktivitas antiporter tonoplast  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  pada *A. thaliana*, bersama dengan gen toleransi salinitas lainnya. Banyak gen lain yang responsif terhadap salinitas dari halofit (pengkodean untuk: antiporter  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ , vakuolar pirofosfatase, pengangkut kalium, saluran ion, antioksidan, pemulung ROS) diekspresikan secara berlebihan pada spesies glikofit (sensitif terhadap garam), menghasilkan toleransi yang jauh lebih tinggi terhadap stres lingkungan, dibandingkan dengan ekspresi

berlebihan gen yang sama dari spesies glikofit. Spesies liar halofitik adalah kandidat serius dalam pemuliaan tanaman untuk toleransi terhadap tekanan lingkungan. Karena sifat ketahanannya terhadap stres yang terpelihara, yaitu rasio  $Na^+ / K^+$  yang rendah, efisiensi fotosintesis yang tinggi, kandungan air, dan fungsi vakuolar  $H^+ -ATPase$  yang efisien di bawah tekanan salinitas, spesies liar halofitik memberikan keuntungan kumpulan gen yang dapat mengarah pada peningkatan ketahanan tanaman terhadap tekanan lingkungan.

## RELEVANSI PERTANIAN

### Spesies Biji Minyak

*Cakile maritima* (roket laut) adalah tanaman halofit sukulen yang dapat dimakan dengan kandungan minyak biji 30-40%, rasio asam lemak tak jenuh dan jenuh yang tinggi (termasuk asam erusat) dalam jumlah besar yang bernilai dalam bidang industri. Triasilgliserol, diasilgliserol, monoasilgliserol, asam lemak bebas, dan lipid polar semuanya telah diidentifikasi dalam biji *C. maritima*. Profil metabolik yang kaya dari halofit ini semakin menyoroti signifikansi ekonomi dan ekologisnya. *Crithmum maritimum* adalah halofit biji minyak lainnya dengan minyak nabati yang secara kualitatif sebanding dengan tanaman biji minyak konvensional seperti: kedelai, bunga matahari, dan bahkan zaitun. Demikian pula: *Salicornia bigelovii*, *Atriplex lentiformis*, dan *Distichlis palmeri*, semuanya merupakan tumbuhan halofit yang menjanjikan berdasarkan potensi penggunaannya masing-masing sebagai: tanaman penghasil minyak, hijauan, dan biji-bijian.

Regulator transkripsional utama dan enzim adalah target utama untuk peningkatan kandungan minyak biji dalam halofit, terutama yang terlibat dalam metabolisme triasilgliserol. Ekspresi berlebih dari gen yang mengkode regulator transkripsi

utama *Leafy Cotyledon 1* (LEC1) atau pengatur transkripsi sintesis asam lemak *Wrinkled 1* (WRI1) secara signifikan meningkatkan kandungan minyak biji *A. thaliana* dan *Camelina sativa* hingga 40%, dan juga dapat menjadi target yang sesuai pada halofit. Peningkatan kandungan minyak pada biji halofit masih dibatasi oleh kesenjangan dalam pemahaman kita tentang metabolisme lipid pada spesies ini namun pendekatan alternatif seperti penyuntingan utama yang dimediasi CRISPR dan evolusi terarah mungkin berguna untuk meningkatkan kuantitas dan kualitas minyak benih pada spesies ini.

### **Spesies Biofuel**

Biomassa lignoselulosa halofit merupakan sumber energi terbarukan yang bernilai untuk produksi biodiesel, bioetanol, dan biogas. Produksi biofuel generasi pertama bergantung pada tanaman pangan (tebu, kedelai, dan jagung) yang bersaing dengan lahan produktif yang digunakan untuk produksi pangan dan tanaman komersial, sehingga menimbulkan permintaan akan solusi sumber daya biofuel yang lebih berkelanjutan. Halofit cukup menjanjikan karena pertumbuhannya yang cepat dan akumulasi biomassa pada tanah marginal yang kurang cocok untuk tanaman pangan, serta kapasitasnya untuk menghasilkan polisakarida yang dapat dilepaskan. Spesies seperti *Tamarix chinensis*, *Phragmites australis*, dan *Spartina patens* sudah dieksploitasi sebagai tanaman biofuel. Kandungan minyak biji pada *S. bigelovii*, *Salicornia europaea* dan *Suaeda aralocaspica* lebih tinggi dibandingkan tanaman biji minyak konvensional seperti kedelai dan rapeseed. Selain itu, *Panicum virgatum* menghasilkan etanol dengan hasil yang sebanding dengan jagung tetapi tanpa konsumsi sumber daya air tawar. Spesies halofit lainnya, seperti: *Salicornia fruticosa*, *Arthrocnemum macrostachyum*, dan *Alhagi*

*maurorum*, telah disarankan sebagai bahan baku potensial untuk produksi biodiesel di Eropa dan Amerika Utara.

Produksi biofuel terhambat oleh lignin dinding sel, sehingga menyulitkan enzim untuk mengakses komponen selulosa. Pada halofit, hal ini dapat diatasi dengan menargetkan jalur biosintesis lignin untuk mengurangi kandungan lignin pada dinding sel, sebuah strategi yang telah berhasil pada spesies lain. Beberapa target potensial telah diidentifikasi. Menargetkan gen yang mengkode *cinnamyl alcohol dehydrogenase* (CAD2) pada beras terbukti membatasi fraksi lignin dan meningkatkan sakarifikasi enzimatik biomassa tanaman, dan hasil serupa dicapai dengan menargetkan 4-kumarat: koenzim A ligase. Memodulasi ekspresi *monolignol 4-O-metiltransferase* yang mengurangi kandungan lignin pohon poplar. Pendekatan knockout gen ini dapat dilengkapi dengan ekspresi berlebih dari enzim hidrolitik untuk meningkatkan sakarifikasi biomassa di tanaman.

Tantangan teknis termasuk rendahnya efisiensi transformasi halofit dan kematian ekspresi awal Cas9, namun semuanya harus diatasi dengan pengembangan: varian Cas baru, templat pengeditan yang ditularkan melalui plasmid, dan penggunaan promotor yang dapat diinduksi. Kemajuan tersebut tampaknya menjanjikan dalam hal memfasilitasi penggunaan pengeditan genom pada halofit untuk memungkinkan produksi biofuel yang hemat biaya pada skala industri.

## **KESIMPULAN**

Inovasi genetik memainkan peran penting dalam meningkatkan ketahanan lingkungan tanaman, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan pangan. Dengan memanfaatkan teknologi seperti CRISPR/Cas9, transgenik, dan pemuliaan berbasis marker, kita dapat mengembangkan tanaman yang lebih tahan terhadap stres lingkungan, mendukung

produksi pangan yang stabil, dan membantu mencapai ketahanan pangan global. Investasi dalam penelitian, kebijakan yang mendukung, dan edukasi publik adalah kunci untuk memaksimalkan manfaat dari inovasi genetik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amrani, N., Gao, X. D., Liu, P., et al. (2018). NmeCas9 is an intrinsically high-fidelity genome-editing platform. *Genome Biology*, 19(1), 1–25.
- Bai, M., Yuan, J., Kuang, H., et al. (2020). Generation of a multiplex mutagenesis population via pooled CRISPR-Cas9 in soya bean. *Plant Biotechnology Journal*, 18(3), 721–731.
- Butt, H., Zaidi, S. S., Hassan, N., et al. (2020). CRISPR-based directed evolution for crop improvement. *Trends in Biotechnology*, 38(3), 236–240.
- Ceccaldi, R., Rondinelli, B., & D'Andrea, A. D. (2016). Repair pathway choices and consequences at the double-strand break. *Trends in Cell Biology*, 26(1), 52–64.
- Chen, G., Hu, J., Dong, L., et al. (2020). The tolerance of salinity in rice requires the presence of a functional copy of FLN2. *Biomolecules*, 10(1), 17.
- Chen, P., Zhou, J., Wan, Y., et al. (2020). A Cas12a ortholog with stringent PAM recognition followed by low off-target editing rates for genome editing. *Genome Biology*, 21(1), 1–13.
- DeHaan, L., Larson, S., López-Marqués, R. L., et al. (2020). Roadmap for accelerated domestication of an emerging perennial grain crop. *Trends in Plant Science*, 25(6), 525–537.
- Devkar, V., Thirumalaikumar, V. P., Xue, G. P., et al. (2020). Multifaceted regulatory function of tomato SITAF1 in the response to salinity stress. *New Phytologist*, 225(4), 1681–1698.

- Durr, J., Papareddy, R., Nakajima, K., et al. (2018). Highly efficient heritable targeted deletions of gene clusters and non-coding regulatory regions in Arabidopsis using CRISPR/Cas9. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11.
- Fernie, A. R., & Yan, J. (2019). De novo domestication: an alternative route toward new crops for the future. *Molecular Plant*, 12(5), 615–631.
- Fu, S., Fu, L., Zhang, X., et al. (2019). OsC2DP, a novel C2 domain-containing protein is required for salt tolerance in rice. *Plant Cell Physiology*, 60(10), 2220–2230.
- Fu, X., Xu, J., Zhou, M., et al. (2019). Enhanced expression of QTL qLL9/DEP1 facilitates the improvement of leaf morphology and grain yield in rice. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4), 866.
- Himabindu, Y., Chakradhar, T., Reddy, M. C., et al. (2016). Salt-tolerant genes from halophytes are potential key players of salt tolerance in glycophytes. *Environmental and Experimental Botany*, 124, 39–63.
- Huang, S., Xin, S., Xie, G., et al. (2020). Mutagenesis reveals that the rice OsMPT3 gene is an important osmotic regulatory factor. *Crop Journal*, 8(3), 465–479.
- Jaganathan, D., Ramasamy, K., Sellamuthu, G., et al. (2018). CRISPR for crop improvement: an update review. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1–17.
- Klap, C., Yeshayahou, E., Bolger, A. M., et al. (2017). Tomato facultative parthenocarpy results from SIAGAMOUS-like 6 loss of function. *Plant Biotechnology Journal*, 15(5), 634–647.
- Kleinstiver, B. P., Pattanayak, V., Prew, M. S., et al. (2016). High-fidelity CRISPR-Cas9 nucleases with no detectable genome-wide off-target effects. *Nature*, 529(7587), 490–495.

- Kouhen, M., García-Caparrós, P., Twyman, R. M., Abdelly, C., Mahmoudi, H., Schillberg, S., & Debez, A. (2023). Improving environmental stress resilience in crops by genome editing: Insights from extremophile plants. *Environmental and Experimental Botany*, *191*, 104601.
- Kwak, S. Y., Lew, T. T. S., Sweeney, C. J., et al. (2019). Chloroplast-selective gene delivery and expression in planta using chitosan-complexed single-walled carbon nanotube carriers. *Nature Nanotechnology*, *14*(5), 447–455.
- Lacchini, E., Kiegle, E., Castellani, M., et al. (2020). CRISPR-mediated accelerated domestication of African rice landraces. *PLOS ONE*, *15*(3), e0229782–12.
- Lee, C. M., Cradick, T. J., & Bao, G. (2016). The *Neisseria meningitidis* CRISPR-Cas9 system enables specific genome editing in mammalian cells. *Molecular Therapy*, *24*(3), 645–654.
- Lemmon, Z. H., Reem, N. T., Dalrymple, J., et al. (2018). Rapid improvement of domestication traits in an orphan crop by genome editing. *Nature Plants*, *4*(10), 766–770.
- Li, M., Li, X., Zhou, Z., et al. (2016). Reassessment of the four yield-related genes *Gn1a*, *DEP1*, *GS3*, and *IPA1* in rice using a CRISPR/Cas9 system. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 1–13.
- Li, T., Yang, X., Yu, Y., et al. (2018). Domestication of wild tomato is accelerated by genome editing. *Nature Biotechnology*, *36*(12), 1160–1163.

## PROFIL PENULIS



### **Suci Lestari**

Penulis dilahirkan di Tangerang pada tanggal 03 Juni 1989 dari pasangan Bapak Hayat (alm.) dan Ibu Mintarsih (almh.). Penulis menikah dengan Adika Crysparingga Haryono dan saat ini telah dikaruniai tiga orang putra. Penulis menempuh studi S1 di Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka (UHAMKA) tahun 2007—2011 pada Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP)

Biologi. Tahun 2012-2016, penulis kemudian melanjutkan studi S2 di Sekolah Pascasarjana Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) pada program studi Pendidikan Biologi. Tahun 2011-2016 Penulis tercatat sebagai Asisten Dosen pada mata kuliah Perkembangan Hewan dan Struktur Hewan. Tahun 2016, Penulis diangkat menjadi Dosen tidak tetap pada program studi Pendidikan Biologi UHAMKA dan kemudian pada tahun 2019 diangkat menjadi dosen tetap yang mengampu mata kuliah biologi sel dan molekuler serta bioteknologi. Tahun 2018, penulis melanjutkan studi doktoral (S3) pada Pascasarjana Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Bidang fokus penelitian yang diambil Penulis saat ini adalah Biopreservasi molekuler pada hewan.



# **BAB 10**

## **BIOTEKNOLOGI PADA PERTANIAN**

### **BERKELANJUTAN**

Pramesti Dewi  
Universitas Negeri Semarang  
E-mail: iwed\_pramesti@mail.unnes.ac.id

#### **PENDAHULUAN**

Praktek pertanian berkelanjutan (*Sustainable Agriculture=SA*) mulai dicanangkan oleh National Agricultural Research pada tahun 1977 dan dilaksanakan dengan melibatkan penerapan seluruh aspek pelaksanaan pertanian, meliputi penyediaan seluruh sarana pertanian, kesiapan pengetahuan dan ketrampilan pertanian, serta kesesuaian nilai sosial dan budaya dengan tujuan utama untuk meningkatkan kualitas pertanian (Pooniyan, Yudav, & Gora, 2022). Kualitas pertanian yang dimaksud adalah kualitas produk hasil panen dan kuantitasnya untuk mendukung kebutuhan akan pangan (Pooniyan, Yudav, & Gora, 2022; Nadarajah & Abdul Rahman, 2023). Pencapaian tujuan praktek pertanian ini harus memperhatikan dua unsur, yaitu penjagaan lingkungan dan kualitas produk, tidak bisa hanya memperhatikan salah satu unsur saja. Apabila hanya salah satu unsur saja yang diperhatikan maka akan timbul berbagai masalah akibat terjadinya ketidakseimbangan atas faktor-faktor kehidupan.

Ketidakseimbangan harus dihindari agar supaya prinsip penting dari SA yaitu pemanfaatan sumber daya alam oleh generasi yang hidup saat ini menjamin tidak akan mengganggu ketersediaan sumber daya alam tersebut bagi generasi yang akan datang. Ketidakseimbangan dalam praktek pertanian dapat berasal dari tahap budidaya, penanganan dan pengolahan hasil

panen, maupun pengelolaan limbah pertanian dan industri pengolahan hasil panen. Gambaran tentang keseimbangan praktek pertanian pada SA disajikan pada Gambar 10.1.



Sumber: (Pooniyan, Yadav, & Gora, 2022)

Gambar 10.1. Salinhubung antara komponen lingkungan, ekonomi, dan sosial dalam praktek pertanian berkelanjutan

Dari Gambar 10.1 dapat dipahami bahwa pelaksanaan praktek pertanian berkelanjutan yang memuaskan harus melibatkan keterhubungan antara lingkungan, ekonomi, dan sosial. Hal ini akan menjamin tercapainya penjagaan lingkungan, pemenuhan kebutuhan hidup petani, penyediaan pangan yang sesuai dengan harga yang dibayarkan masyarakat, dan berperan serta dalam menciptakan kehidupan sosial masyarakat lokal dan petani itu sendiri.

Upaya penjagaan kualitas lingkungan dipicu dari sistem pertanian konvensional yang sangat tergantung pada penggunaan bahan kimia sintetik dari sejak penyediaan benih, pemeliharaan tanaman, maupun pengolahan hasil panen. Penggunaan bahan kimia sintetik mendorong munculnya berbagai dampak negatif terhadap komponen lingkungan seperti tanah dan organisme lainnya. Contoh penggunaan bahan kimia sintetik yang paling sering ditemui adalah penggunaan pupuk

dan bahan pembasmi organisme pengganggu tanaman. Praktek pertanian konvensional ini mengalami revolusi yang sangat bermakna berupa praktek pertanian berkelanjutan yang mengutamakan penggunaan bahan organik.

Penekanan pada penggunaan bahan organik ini kadangkala tidak bisa dilakukan 100 persen, akan tetapi penggunaannya harus semaksimal mungkin. Apabila bahan kimia sintetis digunakan, maka harus dijamin bahwa bahan tersebut tetap aman bagi lingkungan. Hal ini berkaitan dengan dosis bahan yang terbukti aman untuk digunakan (McCoy & Frank, 2020). Penggunaan bahan kimia organik menjadi alasan untuk penyebutan pertanian berkelanjutan sebagai pertanian organik (*organic farming*).

Penggantian bahan kimia untuk memberantas hama dan penyakit tanaman dengan mikroorganisme, baik dalam bentuk sel mikroorganisme hidup secara langsung maupun bahan hasil metabolisemenya adalah langkah penting yang dilakukan pada praktek pertanian berkelanjutan pada tahap budidaya tanaman. Mikroorganisme yang digunakan dipilih dari jenis yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan sekaligus untuk mendukung kesehatan tanaman, sehingga mendukung pencapaian kualitas dan kuantitas hasil panen (Nadarajah & Abdul Rahman, 2023; Antoszewski et al., 2022).

Mikroorganisme juga dapat digunakan pada tahap pasca panen untuk menjaga kualitas produk, maupun pada penanganan limbah organik pasca panen. Limbah organik banyak dihasilkan selama budidaya, panen, maupun pasca panen. Penanganan limbah menggunakan mikroorganisme juga merupakan hal penting dari pertanian berkelanjutan. Pada tahap pengolahan hasil panen menjadi produk pangan, mikroorganisme juga sangat bermanfaat dalam menciptakan produk olahan fermentasi, sehingga hasil panen dapat diubah menjadi produk siap konsumsi tanpa menggunakan bahan kimia sintetis.

Bioteknologi pada praktek pertanian berkelanjutan memberikan ruang yang luas untuk penerapan penggunaan mikroorganisme, maupun produk dari makhluk hidup yang lain seperti hewan dan tanaman berupa enzim, metabolit sekunder, atau senyawa bioaktif. Penerapan bioteknologi dalam praktek pertanian berkelanjutan ini sangat menguntungkan untuk menjaga kualitas lingkungan dan melestarikan sumber daya alam. Apabila digunakan mikroorganisme maka langkah penting dalam pemilihan jenis mikroorganisme dimulai dari berbagai penelitian yang dihasilkan di laboratorium, untuk selanjutnya diterapkan di lapangan. Sampai saat ini sudah sangat banyak hasil penelitian yang berkaitan dengan penggunaan mikroorganisme tersebut. Penerapan hasil penelitian di lapangan seringkali menghadapi berbagai kendala yang menyebabkan mikroorganisme yang digunakan tidak dapat berkembang dengan maksimal (Pooniyan, Yudav, & Gora, 2022).

Kendala penggunaan mikroorganisme yang sudah terbukti mampu berkembang di laboratorium antara lain berupa kegagalan mikroorganisme (bioinokulan) untuk bertahan di lapangan, sehingga tidak dapat tumbuh dan berkembang dengan optimal. Kegagalan ini disebabkan oleh perebutan tempat hidup (*niche*), keterbatasan nutrisi, maupun keberagaman jenis mikroorganisme yang secara alami ada di tanah. Semakin beragam jenis yang ada di tanah akan semakin menghambat pertumbuhan bioinokulan yang ditambahkan (Nadarajah & Abdul Rahman, 2023).

Pada bab ini selanjutnya dibahas tentang penerapan prinsip dan konsep bioteknologi dalam pertanian berkelanjutan. Penerapan bioteknologi antara lain dapat dilakukan sejak tahap budidaya tanaman, pengolahan hasil, dan penanganan limbah organik.

## **BIOTEKNOLOGI PADA TAHAP BUDIDAYA TANAMAN**

Tanaman pertanian yang sedang dalam pertumbuhan dan perkembangan seringkali mengalami gangguan pertumbuhan yang disebabkan oleh keberadaan mikroorganisme. Adanya mikroorganisme selama tahap budidaya dimungkinkan oleh adanya interaksi secara alami antar berbagai organisme di alam. Interaksi antara tanaman dengan mikroorganisme sangat mungkin terjadi karena adanya kesamaan tempat hidup (*niche*). Mikroorganisme yang tumbuh di sekitar tanaman dapat memainkan dua peran penting, yaitu yang menguntungkan untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman dan peran kedua yang justru merugikan tanaman karena bertindak sebagai penyebab penyakit.

Fusarium merupakan kapang yang paling sering menjadi penyebab penyakit tanaman (Sharma & Sharma, 2020). Fusarium dapat menyebabkan penyakit pada tanaman dengan penyebaran yang luas karena kapang ini menyebar lewat tanah yang telah terkontaminasi spora kapang (*chlamydospores*), dan sulit untuk dikendalikan terutama *F. oxysporum* (Arie, 2019; Sharma & Sharma, 2020). Jenis tanaman yang diserang antara lain tanaman cabai, tomat, kentang, dan berbagai tanaman buah tropis (Zakaria, 2023). Penyakit yang disebabkan oleh Fusarium menyebabkan tanaman layu (*wilt*) di awal pertumbuhan maupun pada saat tanaman sudah berbuah, sehingga mempengaruhi hasil panen. Tanaman pisang dapat terserang layu Fusarium pada saat dewasa dan sudah berbuah seperti nampak pada Gambar 10.2. Apabila serangan terjadi pada saat tanaman pisang sudah berbuah, maka buah tidak akan berkembang lebih lanjut, sehingga terjadi gagal panen pisang.



Sumber: (Maymon et al., 2020)

Gambar 10.2. Kondisi tanaman pisang yang terserang layu Fusarium

Gambar 10.2 menunjukkan munculnya gejala layu pada daun tanaman pisang dan pada Gambar 10.3 nampak buah pisang yang tidak dapat berkembang lebih lanjut menjadi produk siap panen apabila mengalami serangan Fusarium. Serangan yang terjadi baik pada daun maupun buah yang sudah sempat terbentuk tapi gagal berkembang sangat mempengaruhi produktivitas pisang. Produktivitas yang rendah akan merugikan petani pisang.



Sumber: Fahriza, 2024

Gambar 10.3. Serangan layu *Fusarium* pada tanaman pisang di Kabupaten Balangan (Wilayah Sanggam), Kalimantan Selatan

*Fusarium* dapat dihambat perkembangannya menggunakan kapang lain yaitu *Trichoderma* dari berbagai strain, seperti *T. viridae*, *T. harsianum*, maupun *T. hamatum* yang termasuk dalam jenis mikroorganisme PGPM/*Plant Growth Promoting Microorganism* (Pooniyan et al., 2022). Penggunaan kapang *Trichoderma* sp. untuk mengatasi kapang patogen *Fusarium* sp. ini adalah salah satu contoh penggunaan mikroorganisme pada tahap budidaya tanaman. Penerapan *Trichoderma* sp. pada tanaman yang terserang *Fusarium* dapat dilakukan dalam bentuk inokulan murni, maupun inokulum yang sudah dikembangkan pada pupuk kompos. Inokulum *Trichoderma* yang dikembangkan dalam pupuk kompos ini disebut kompos bioaktif.

Salah satu contoh kompos bioaktif yang telah dikembangkan dan diteliti adalah kompos bioaktif *Trichoderma harzianum* untuk mengatasi *Fusarium oxysporum* pada tanaman cabai (Herlina & Dewi, 2010). Hasil penelitian menunjukkan bahwa terbentuk pertumbuhan akar lateral yang lebih banyak dan panjang dibandingkan tanaman cabai yang tidak ditambah kompos bioaktif. Akar lateral memainkan peran penting dalam

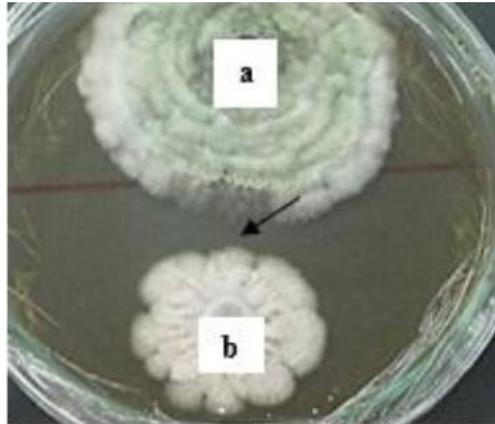
penyerapan nutrisi, sehingga tanaman dapat tumbuh lebih sehat dan memiliki kekuatan dalam mengatasi adanya patogen. *Fusarium* juga diketahui dapat menghasilkan mikotoksin yang dapat menyebabkan gangguan metabolisme tanaman. Semakin sehat dan optimal pertumbuhan tanaman maka semakin mampu melawan serangan patogen.

Pada penelitian penggunaan *Trichoderma harzianum* sebagai biofungisida untuk menghambat pertumbuhan *Fusarium oxysporum*, biakan murni *T. harzianum* dikultur dalam media cair untuk menghasilkan biomassa kapang. Biomassa kapang akan menghasilkan senyawa bioaktif yang memiliki aktivitas antifungi. Senyawa bioaktif dari biomassa kering diekstrak menggunakan kloroform, kemudian ekstrak pekat yang telah dicampur dengan kotoran ternak ditambahkan pada media tanam tomat dalam polibag (Herlina, 2009).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian senyawa antifungi dari ekstrak biomassa *Trichoderma harzianum* menghasilkan rerata berat buah tomat per masa panen selama satu bulan lebih tinggi dibandingkan kontrol. Hasil terbaik diperoleh dari ekstrak biomassa hasil inkubasi *Trichoderma harzianum* selama 40 hari. Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa dengan penambahan ekstrak *Trichoderma harzianum* pada tanaman tomat yang terserang *Fusarium oxysporum* dapat mendorong kesehatan dan pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Mekanisme yang diduga terjadi adalah melalui mekanisme kimiawi dan fisik. Mekanisme kimiawi terjadi melalui penghambatan pertumbuhan kapang patogen oleh adanya metabolit berupa enzim pendegradasi dinding sel. Mekanisme fisik melalui hifa kapang *Trichoderma harzianum* yang akan melilit hifa dari kapang patogen, dalam hal ini *Fusarium oxysporum*.

Penelitian lain juga telah membuktikan bahwa terjadi mekanisme pertumbuhan antagonistik antara *Trichoderma*

*harzianum* dengan *Fusarium oxysporum* (Karim, Rahmiati, & Fauziah, 2020). Koloni kapang patogen mengalami tekanan pertumbuhan bila tumbuh di dekat koloni *Trichoderma harzianum*. Penekanan pertumbuhan ini nampak dari ukuran koloni yang lebih kecil dengan arah pertumbuhan yang menjauh dari koloni *Trichoderma harzianum*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 10.4.



Sumber: (Karim, Rahmiati, & Fauziah, 2020)

Gambar 10.4. Penekanan pertumbuhan *Fusarium oxysporum* (b) oleh *Trichoderma* (a). Tanda panah: zona hambat yang terbentuk

Dari Gambar 10.4 sangat terlihat terjadinya antagonistik pertumbuhan kapang patogen *Fusarium oxysporum* oleh *Trichoderma*. Sifat antagonistik muncul dari mekanisme penghambatan secara kimiawi yaitu pembentukan enzim kitinase dan  $\beta$ -glukanase yang dapat melisiskan sel hifa kapang patogen (Herlina, 2009; Karim & Fauziah, 2020). Sifat ini dapat menjadi solusi atas adanya serangan penyakit pada tanaman oleh kapang patogen. Efektivitas penggunaan *Trichoderma* ini dalam mengendalikan pertumbuhan kapang patogen *Fusarium* akan menurun apabila temperature meningkat dan kandungan air

tanah rendah, sehingga aktivitas penghambatan sangat rendah (Brizuela et al., 2023).

Bioteknologi yang juga dapat diterapkan selama proses budidaya tanaman adalah penggunaan pupuk organik berupa kompos dari limbah pertanian dan peternakan. Limbah pertanian berupa sisa-sisa batang dan daun setelah panen maupun limbah peternakan berupa kotoran hewan dapat digunakan sebagai bahan dasar untuk pembuatan kompos. Proses pengkomposan dapat terjadi secara alami atau dengan penambahan inokulan dekomposer. Proses dengan penambahan inokulan akan mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk dekomposisi bahan organik.

Percobaan pengolahan kotoran kambing menjadi pupuk kompos dengan penambahan inokulan Biodegra telah dilakukan. Kompos yang dibuat terdiri atas tiga varian kompos, berdasarkan variasi bahan yang digunakan. Kompos A dibuat dengan menggunakan 100% kotoran kambing, Kompos B dari campuran kotoran kambing dan limbah sayuran (potongan daun sawi putih) dengan perbandingan 1:1, dan Kompos C dari campuran kotoran kambing, potongan daun sawi, dan tanah. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kompos terbaik dari segi penampilan fisik (warna, bau, dan tekstur) adalah Kompos B. Hal ini disebabkan karena campuran kotoran kambing dan limbah sayuran akan memberikan kandungan karbon (C) dan nitrogen (N) yang lebih optimal dalam memenuhi kebutuhan nutrisi bagi mikroorganisme inokulan. Kompos yang dihasilkan juga memiliki nilai C/N yang seimbang dan mendekati nilai C/N tanah. Kompos B juga lebih optimal dan seimbang dalam menyediakan unsur hara bagi tanaman yang dibuktikan dari percobaan penggunaan ketiga jenis kompos dalam budidaya tanaman kangkung. Kompos B mendorong pembentukan daun paling banyak dibandingkan kompos yang lain (Dewi et al., 2023\_unpublish).

## BIOTEKNOLOGI PADA PENGOLAHAN HASIL PANEN

Pada tahap pengolahan hasil panen dapat diterapkan prinsip Bioteknologi untuk tujuan menghindari penggunaan bahan kimia sintetis. Permasalahan utama penjagaan kualitas hasil panen adalah munculnya serangan mikroorganisme perusak, baik dari jenis bakteri, kapang, atau khamir. Mikroorganisme akan dengan mudah tumbuh dan berkembang pada hasil panen, baik buah maupun sayur karena bahan makanan merupakan media pertumbuhan mikroorganisme yang sangat baik. Mikroorganisme juga berinteraksi secara intensif dengan tanaman selama pertumbuhannya.

Penggunaan ekstrak tanaman untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme perusak hasil panen telah dicoba dan diteliti. Penelitian penggunaan ekstrak buah pinang (*Areca catechu*) muda dengan pelarut aquadest memberikan informasi tentang pengaruh ekstrak terhadap pertumbuhan kapang yang menyerang rimpang jahe, yang diduga *Aspergillus* sp. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak yang sudah diencerkan dengan aquadest dengan perbandingan 1:1 memberikan pengaruh penghambatan kapang yang lebih baik dibandingkan ekstrak tanpa pengenceran (Gunawan et al., 2023). Penjelasan rasional dari hasil ini adalah dengan pengenceran ekstrak menggunakan aquadest akan melarutkan ekstrak dan melepaskan senyawa bioaktif antara lain senyawa fenolik dan saponin, sehingga akan memainkan perannya dalam menghambat pertumbuhan *Aspergillus* sp.. Telah diuji dalam menghambat pertumbuhan

Penggunaan ekstrak buah Pinang muda dalam menghambat pertumbuhan kapang penyebab busuk buah Melon dan Pisang telah dilakukan baik secara *in vitro* maupun *in vivo* (Dewi et al., 2022). Isolat kapang perusak buah Melon diidentifikasi sebagai *Meyerozima* sp., sedangkan yang diisolasi dari buah Pisang adalah *Aspergillus* sp.. Secara *in vitro* ekstrak air (*watery*

*extract*) buah Pinang muda menghambat pertumbuhan kedua jenis kapang, dengan aktivitas penghambatan yang lebih rendah dibandingkan Kloramfenikol 0,2%. Secara *in vivo*, ekstrak buah Pinang muda diaplikasikan pada buah mangga dan pisang. Aktivitas penghambatan pertumbuhan kapang pada buah pisang dan mangga dapat memperpanjang masa simpan buah opada suhu kamar.

Secara umum ekstrak berbagai tanaman mengandung senyawa bioaktif yang bersifat antimikroba, baik antibakteri maupun antijamur. Penelitian penggunaan ekstrak biji papaya juga telah dilakukan terhadap kapang yang diisolasi dari papaya, yang diidentifikasi sebagai *Colletotrichum gloeosporioides* dan yang diisolasi dari strawberry busuk yaitu *Rhizopus* sp. Ekstrak biji papaya dengan pelarut kloroform pada konsentrasi 100% memberikan pengaruh penghambatan pertumbuhan kedua jenis kapang, walaupun kekuatan penghambatannya lebih kecil dari kloramfenikol 0,2 % (Dewi, Herlina, Indriyanti, 2020\_unpublish).

Ekstrak kapang *T. erinaceum* dan *T. koningiopsis* juga telah terbukti memiliki aktivitas antibakteri. Sulaiha et al. (2022) meneliti penggunaan ekstrak kultur *T. erinaceum* dan *T. koningiopsis* dalam menghambat pertumbuhan bakteri Gram negatif *Escherichia coli* dan Gram positif *Bacillus subtilis*. Bakteri *E. coli* lebih sensitif terhadap ekstrak *T. erinaceum*, akan tetapi *B.subtilis* lebih sensitif terhadap *T. koningiopsis*. Perbedaan ini dipengaruhi oleh senyawa bioaktif yang dihasilkan oleh kapang dan adanya perbedaan sifat Gram dari bakteri. Kemampuan antibakteri dari ekstrak kapang *T. erinaceum* dan *T. koningiopsis* berasal dari senyawa bioaktif yang dihasilkan yaitu alkaloid, fenolik, flavonoid, steroid/terpenoid, tanin, dan saponin.

## **BIOTEKNOLOGI PADA PENANGANAN LIMBAH PERTANIAN**

Limbah organik yang dihasilkan dari budidaya pertanian atau dari pengolahan hasil panen menjadi beban yang harus diatasi untuk penjagaan kualitas lingkungan. Bioteknologi mengambil peran besar dalam mengurangi beban dari adanya bahan organik ini. Penelitian yang telah dilakukan adalah dalam upaya menangani limbah budidaya singkong berupa batang tanaman (*cassava stem*). Batang singkong mengandung senyawa lignoselulosa yang terdiri atas lignin, selulosa, dan hemiselulosa.

Adanya lignin merupakan hambatan dalam pengolahan menggunakan mikroorganisme, karena senyawa lignin merupakan senyawa polimer dengan ikatan yang sangat kuat dan tidak mudah dihidrolisis oleh enzim-enzim yang dihasilkan mikroorganisme. Selulosa adalah homopolimer dengan monomer glukosa, sedangkan hemiselulosa adalah heteropolymer yang tersusun atas beberapa jenis gula. Apabila kendala adanya lignin dapat diatasi, maka selulosa dan hemiselulosa yang ada dapat dihidrolisis yang menghasilkan gula-gula sederhana (monosakarida), dalam bentuk murni glukosa hasil hidrolisis selulosa atau campuran beberapa jenis monosakarida sebagai hasil hidrolisis hemiselulosa.

Pengolahan batang singkong menggunakan mikroorganisme harus diawali dengan degradasi lignin terlebih dahulu (*pretreatment*). Degradasi lignin untuk menghilangkan, mereduksi, ataupun mengubah kristalinitas lignin dapat dilakukan dengan berbagai cara, misalnya secara kimia maupun biologi. Secara kimia dapat dipilih senyawa dari kelompok asam atau basa.

Penelitian yang telah dilakukan untuk mereduksi lignin adalah dengan menggunakan basa lemah  $\text{Ca(OH)}_2$ . *Pretreatment* batang singkong dilakukan dengan merendam batang singkong yang telah dihaluskan ke dalam larutan  $\text{Ca(OH)}_2$  1% dengan

perbandingan 6.67 g batang singkong halus dalam 100 mL  $\text{Ca(OH)}_2$  1% selama 16 jam dengan suhu yang dijaga tetap pada kisaran 85-90 °C (Dewi et al., 2018). Batang singkong setelah *pretreatment* akan mengalami perubahan penampakan fisik, kandungan kimia, maupun mikrostruktur dari seratnya. Serat pada batang singkong merupakan untaian ketiga komponen penyusun batang, yaitu lignin di bagian terluar dari serat, lalu selulosa dan hemiselulosa pada bagian dalam.

Batang singkong yang telah mengalami *pretreatment* selanjutnya digunakan sebagai media untuk pertumbuhan kapang *Aspergillus niger* tanpa penambahan nutrisi lain maupun peningkatan kandungan air dalam media. Metode fermentasi dengan substrat padat yang terbatas kandungan airnya disebut dengan Fermentasi Substrat Padat/FSP (*Solid State Fermentation/SSF*). *Aspergillus niger* sangat sesuai untuk tumbuh dengan metode fermentasi FSP/SSF karena secara alami kelompok kapang tumbuh pada media padat yang memungkinkan terjadinya penetrasi hifa ke dalam media. *Aspergillus niger* akan menghidrolisis selulosa dan hemiselulosa menjadi gula sederhana. Parameter untuk mengukur keberhasilan hidrolisis ini adalah kadar gula reduksi yang termasuk dalam kelompok gula sederhana (monosakarida).

Gula hasil fermentasi batang singkong menggunakan *Aspergillus niger* merupakan produk yang sangat bernilai, karena dapat dipanen untuk selanjutnya dimanfaatkan dalam berbagai keperluan. Salah satu pemanfaatan yang sangat mungkin adalah sebagai bahan pemanis. Jadi dengan menerapkan prinsip bioteknologi dalam menangani limbah batang singkong dapat menjadi solusi produksi pemanis tanpa tergantung pada budidaya tebu dan sekaligus mengatasi beban lingkungan yang disebabkan oleh adanya limbah organik.

Hasil fermentasi batang singkong tersebut juga dapat ditransformasi lebih lanjut menjadi senyawa yang lain, misalnya

asam sitrat. Asam sitrat banyak digunakan dalam industri makanan dan farmasi. Pemanfaatan asam sitrat yang lain adalah menjadi bahan baku dalam pembuatan *biodegradable plastic* melalui proses polimerisasi asam sitrat menjadi *poly lactic acid* (PLA).

Penanganan limbah organik berupa daun yang gugur (*leaf litter*) juga dapat dilakukan dengan memanfaatkan kapang pendegradasi lignoselulosa, misalnya *Trichoderma erinaceum* dan *T. koningiopsis*. Kedua kapang menghasilkan enzim lignoselulolitik, untuk degradasi limbah pertanian yang mengandung lignoselulosa seperti daun maupun batang tanaman. Enzim yang dihasilkan yaitu amilase dan xilanase (Wahidah et al., 2022). Aktivitas optimal untuk kedua enzim telah berhasil diteliti, yaitu untuk temperatur dan pH.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *T. koningiopsis* menghasilkan enzim amilase dengan aktivitas tertinggi pada temperatur 25 °C dengan pH 5, sedangkan pada temperatur dan pH yang sama *T. erinaceum* menghasilkan aktivitas xilanase tertinggi. Hal ini memberikan petunjuk bahwa kedua jenis kapang, walaupun termasuk dalam genus yang sama dapat menghasilkan enzim lignoselulolitik tertinggi yang berbeda. Kedua kapang yang digunakan dalam penelitian diisolasi dari lingkungan kampus Universitas Negeri Semarang pada area yang banyak bertumpuk guguran daun. Hasil penelitian juga memberikan gambaran tentang pemanfaatan kapang penghasil enzim lignoselulolitik untuk menangani limbah batang tanaman dan guguran daun yang sering terjadi pada budidaya pertanian dalam tahap pasca panen.

## DAFTAR PUSTAKA

- Antoszewski, M., Mierek-Adamska, A., & Dąbrowska, G. B. (2022). The Importance of Microorganisms for Sustainable Agriculture—A Review. In *Metabolites* (Vol. 12, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/metabo12111100>
- Arie, T. (2019). Fusarium diseases of cultivated plants, control, diagnosis, and molecular and genetic studies. *Journal of Pesticide Science*, 44(4). <https://doi.org/10.1584/JPESTICS.J19-03>
- Brizuela, A. M., Gálvez, L., Arroyo, J. M., Sánchez, S., & Palmero, D. (2023). Evaluation of Trichoderma spp. on *Fusarium oxysporum* f. sp. asparagi and Fusarium wilt Control in Asparagus Crop. *Plants*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/plants12152846>
- Dewi, P., Indriyanti, D. R., Herlina, L., Gunawan, A. S., & Lusiana, C. E. (2022). POTENCY OF *Areca catechu* FLESH EXTRACT IN INHIBITING SOFT ROT FUNGI OF MELONS AND BANANAS. *Jurnal Teknologi*, 84(4), 133–138. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17252>
- Dewi, P., Millati, R., Indrati, R., & Sardjono. (2018). Effect of Lime Pretreatment on Microstructure of Cassava Stalk Fibers and Growth of *Aspergillus niger*. *Biosaintifika*, 10(1), 205–212. <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v10i1.13802>
- Dewi, P; Herlina, L; and Indriyanti, DR. (2020). Potensi Antifungi Ekstrak Biji Pepaya terhadap Pertumbuhan Jamur Penyebab Busuk Buah. Lapolran Penelitian. LPPM Universitas Negeri Semarang
- Dewi, P; Alimah, S; Christijanti, W; Mustikaningtyas, D; and Ridlo, S. (2023). Upaya Peningkatan Nilai Ekonomi Kotoran Kambing menjadi Emas Hitam di Peternakan

- Subuh Jaya Farm. Lporan Pengabdian Masyarakat. LPPM Universitas Negeri Semarang
- Fahriza. (2020). Ribuan Tanaman Pisang di Balangan terkena Penyakit Layu. <https://jejakrekam.com/2020/07/27/ribuan-tanaman-pisang-di-balangan-terkena-penyakit-layu/>
- Gunawan, A. S., Mustikaningtyas, D., Dewi, P., & Widiatningrum, T. (2023). Pengaruh Ekstrak Buah Pinang Muda (*Areca catechu*) Terhadap Pertumbuhan Kapang Pada Rimpang Jahe. *Bioeksperimen*, 9(1), 88–96. <https://journals.ums.ac.id/index.php/bioeksperimen/article/view/17203>
- Herlina, L. (2009). Potensi *Trichoderma harzianum* sebagai Biofungisida pada Tanaman Tomat (*Trichoderma harzianum* Potency as a Biofungicide on Tomato Plant). *Biosaintifika*, 1(1), 62–69.
- Herlina, L., & Dewi, P. (2010). *PENGGUNAAN KOMPOS AKTIF AKTIF TRICHODERMA HARZIANUM DALAM MENINGKATKAN PERTUMBUHAN TANAMAN CABAI*. 8(2). <https://doi.org/10.15294/saintekno.v8i2.317>
- Karim, A., & Fauziah, I. (2020). JBIO: JURNAL BIOSAINS (The Journal of Biosciences) ISOLASI DAN UJI ANTAGONIS *Trichoderma* TERHADAP *Fusarium oxysporum* SECARA IN VITRO. *Jurnal Biosains*, 6(1). <https://doi.org/10.24114/jbio.v6i1.16839>
- Maymon, M., Sela, N., Shpatz, U., Galpaz, N., & Freeman, S. (2020). The origin and current situation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in Israel and the Middle East. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58378-9>
- McCoy, T., & Frank, D. (2020). *Organic vs. Conventional (Synthetic) Pesticides: Advantages and Disadvantages*.

- Nadarajah, K., & Abdul Rahman, N. S. N. (2023). The Microbial Connection to Sustainable Agriculture. In *Plants* (Vol. 12, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants12122307>
- Pooniyan, S., Yadav, R., & Gora, R. (2022). *SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRACTICES* (Vol. 1). <https://www.researchgate.net/publication/370817047>
- Sharma, I. P., & Sharma, A. K. (2020). *Trichoderma–Fusarium Interactions: A Biocontrol Strategy to Manage Wilt* (pp. 167–185). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3321-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3321-1_9)
- Sulaiha, S., Mutikaningtyas, D., Widianingrum, T., & Dewi, P. (2022). Senyawa Bioaktif *Trichoderma erinaceum* dan *Trichoderma koningiopsis* Serta Potensinya Sebagai Antibakteri. *Life Science: Journal of Biology*, *11*(2), 120–131.
- Wahidah, T. H., Mustikaningtyas, D., Widiyatningrum, T., & Dewi, P. (2022). Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Pertumbuhan *Trichoderma* spp. dan Aktivitas Enzim Amilase dan Xilanase. *Life Science*, *11*(2), 108–119. <https://journal.unnes.ac.id/sju/UnnesJLifeSci/article/view/64379>
- Zakaria, L. (2023). *Fusarium* Species Associated with Diseases of Major Tropical Fruit Crops. In *Horticultrae* (Vol. 9, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/horticultrae9030322>

## PROFIL PENULIS



### **Pramesti Dewi**

Penulis memulai studi tingkat S1 pada tahun 1982 dan lulus tahun 1987 dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta-Jurusan Pengolahan Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian. Studi S2 ditempuh di Institut Pertanian Bogor tahun 1991-1997 pada Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian. Studi tingkat S3 diselesaikan pada tahun 2018 dari Universitas

Gadjah Mada-Prodi Ilmu Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian. Sejak tahun 1989 hingga saat ini (2024) menjadi pengajar pada Prodi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang. Matakuliah pokok yang diampu adalah Mikrobiologi, baik untuk mahasiswa tingkat S1 maupun S2. Buku yang pernah ditulis berjudul “Buah Pinang, Potensi dan Pemanfaatannya” beserta beberapa penulis sebagai luaran penelitian dengan Penerbit LPPM Universitas Negeri Semarang tahun 2021. Buku lain yang ditulis bersama adalah “Potensi Senyawa Aktif Bahan Alam, Bab 1. Potensi Kapang Lignoselulolitik dalam Produksi Senyawa Bioaktif”, Penerbit Unisma Press tahun 2022.



# **BAB 11**

## **ETIKA DAN ASPEK SOSIAL DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN**

Loso Judijanto  
IPOSS, Jakarta  
E-mail: losojudijantobumn@gmail.com

### **PENDAHULUAN**

Bioteknologi lingkungan sudah merupakan salah satu bidang yang mengalami perkembangan pesat pada beberapa dekade belakangan, menawarkan solusi inovatif pada berbagai masalah lingkungan seperti polusi, perubahan iklim, dan kelangkaan sumber daya. Namun demikian perkembangan pesat ini tidak lepas dari berbagai isu etika dan aspek sosial yang kompleks. Isu-isu etika dalam bioteknologi lingkungan mencakup berbagai pertimbangan seperti dampak terhadap ekosistem, kesejahteraan makhluk hidup, dan keadilan dalam distribusi manfaat teknologi. Sementara itu aspek sosial melibatkan penerimaan publik, akses yang adil terhadap teknologi serta dampak sosial dari penerapan bioteknologi. Kedua aspek ini saling terkait dan memainkan peran penting dalam menentukan bagaimana bioteknologi dapat berkontribusi secara positif terhadap lingkungan dan masyarakat.

### **ETIKA DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN**

Bioteknologi lingkungan merupakan cabang ilmu yang memanfaatkan organisme hidup untuk mengatasi permasalahan lingkungan. Penggunaan teknologi ini menawarkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan lingkungan, seperti pencemaran dan pengelolaan limbah. Namun demikian

penerapan bioteknologi lingkungan juga menimbulkan sejumlah pertanyaan etis yang perlu dipertimbangkan secara serius.

### **Definisi dan Pentingnya Etika dalam Bioteknologi**

Bioteknologi merupakan disiplin ilmu yang melibatkan penggunaan organisme hidup atau sistem biologis untuk mengembangkan atau membuat produk yang bermanfaat. Aplikasi bioteknologi mencakup berbagai bidang yang sangat beragam seperti kesehatan, pertanian, dan lingkungan. Namun demikian seiring dengan kemajuan teknologi, muncul juga tantangan dan isu etika yang signifikan. Etika dalam bioteknologi adalah kajian mengenai prinsip moral yang mengatur penerapan teknologi ini yang bertujuan untuk memastikan bahwa penggunaannya tidak merugikan manusia, makhluk hidup lainnya, atau lingkungan.

Etika dalam bioteknologi memegang peranan penting karena teknologi ini memiliki potensi untuk memberikan manfaat besar sekaligus risiko yang signifikan. Salah satu prinsip etika yang utama dalam bioteknologi adalah keberlanjutan lingkungan. Pengembangan dan penerapan teknologi harus mempertimbangkan dampaknya terhadap ekosistem dan lingkungan. Misalnya penggunaan organisme yang dimodifikasi secara genetik (GMO) dalam pertanian dapat meningkatkan hasil panen dan ketahanan terhadap hama, namun juga dapat menimbulkan kekhawatiran tentang dampak jangka panjang terhadap keanekaragaman hayati. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan GMO dalam pertanian memiliki potensi untuk mengganggu ekosistem alami dan mengurangi keanekaragaman hayati yang merupakan tantangan etis yang signifikan (J. Smith, 2021a).

Prinsip kedua adalah kesejahteraan manusia dan makhluk hidup lainnya. Teknologi bioteknologi harus digunakan untuk meningkatkan kualitas hidup manusia tanpa membahayakan

mahluk hidup lainnya. Sebagai contoh bioteknologi medis yang digunakan untuk pengobatan penyakit genetik harus memperhatikan implikasi etis terkait dengan percobaan pada hewan dan manusia. Selain itu aplikasi bioteknologi harus memastikan bahwa manfaatnya dapat diakses secara adil oleh semua lapisan masyarakat. Keadilan sosial dalam distribusi manfaat bioteknologi adalah aspek kritis yang perlu dipertimbangkan untuk menghindari kesenjangan sosial dan ekonomi yang lebih besar (A. Jones, 2022).

Regulasi dan kebijakan yang mengatur penggunaan bioteknologi adalah bagian integral dari etika dalam bioteknologi. Kebijakan tersebut mempunyai tujuan agar menjamin bahwa pengembangan serta aplikasi bioteknologi dilakukan dengan penuh tanggung jawab serta selaras dengan standar etika yang ditetapkan. Regulasi nasional dan internasional memainkan peran penting dalam mengawasi penggunaan bioteknologi untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan. Misalnya, Uni Eropa memiliki regulasi ketat terkait GMO, yang mengharuskan penilaian risiko yang komprehensif sebelum produk tersebut dapat dipasarkan. Regulasi ini tidak hanya bertujuan untuk melindungi konsumen, tetapi juga untuk menjaga keanekaragaman hayati dan lingkungan.

Isu etika utama dalam bioteknologi lingkungan meliputi modifikasi genetik dan dampaknya terhadap ekosistem, penggunaan organisme transgenik, serta risiko dan ketidakpastian dalam aplikasi bioteknologi. Penggunaan teknologi CRISPR untuk modifikasi genetik telah menimbulkan perdebatan etis terutama terkait dengan potensi dampaknya yang tidak terduga terhadap genetik manusia dan lingkungan. Misalnya teknik ini memungkinkan perubahan genetik yang cepat dan spesifik, namun juga menghadirkan risiko mutasi yang tidak disengaja yang dapat berdampak negatif. Teknologi

CRISPR menawarkan potensi luar biasa dalam pengobatan genetik, tetapi juga membawa risiko etis yang perlu diatasi melalui regulasi yang ketat dan penelitian lebih lanjut (Green, 2023).

Tanggung jawab sosial korporat (CSR) dalam bioteknologi lingkungan juga menjadi perhatian penting. Perusahaan yang bergerak di bidang bioteknologi harus mempertimbangkan implikasi sosial serta lingkungan dari produk dan teknologi yang dikembangkan. Inisiatif CSR yang sukses tidak hanya meningkatkan citra perusahaan tetapi juga memberikan manfaat nyata bagi masyarakat dan lingkungan. Contoh inisiatif CSR yang berhasil termasuk program pemulihan lahan yang terdegradasi dan proyek konservasi keanekaragaman hayati yang melibatkan komunitas lokal. Pentingnya etika dalam bioteknologi juga tercermin dalam partisipasi publik dalam pengembangan teknologi ini. Keterlibatan masyarakat dalam proses pengambilan keputusan adalah kunci untuk memastikan bahwa teknologi bioteknologi diterima secara luas dan sesuai dengan nilai-nilai sosial dan budaya. Metode partisipasi publik dapat mencakup konsultasi publik, diskusi kelompok, dan survei untuk mengumpulkan pandangan dan kekhawatiran masyarakat. Partisipasi aktif masyarakat membantu dalam menciptakan transparansi dan kepercayaan terhadap teknologi bioteknologi.

Dengan demikian dapat dipahami bahwa etika dalam bioteknologi adalah komponen esensial yang memastikan bahwa perkembangan teknologi ini dilakukan dengan mempertimbangkan dampak sosial, lingkungan, dan moral. Prinsip-prinsip etika seperti keberlanjutan lingkungan, kesejahteraan makhluk hidup, keadilan sosial, dan regulasi yang ketat harus menjadi panduan dalam setiap aplikasi bioteknologi. Partisipasi publik dan tanggung jawab sosial korporat juga penting dalam menciptakan lingkungan yang mendukung pengembangan bioteknologi yang bertanggung jawab dan

berkelanjutan. Dengan demikian, etika dalam bioteknologi tidak hanya melindungi masyarakat dan lingkungan, tetapi juga membantu memaksimalkan manfaat teknologi ini untuk kebaikan bersama.

### **Prinsip-Prinsip Etika dalam Bioteknologi**

Pengembangan teknologi dalam bidang bioteknologi tidak hanya menimbulkan pertanyaan tentang kemampuan untuk menciptakan perubahan yang signifikan dalam dunia alam, tetapi juga memunculkan pertanyaan tentang tanggung jawab etis sebagai manusia yang memiliki kemampuan untuk mengendalikan dan memanfaatkan kekuatan tersebut. Prinsip-prinsip etika dalam bioteknologi memberikan kerangka kerja yang penting untuk memandu perilaku dan pengambilan keputusan yang bertanggung jawab dalam pengembangan, penggunaan, dan pengelolaan teknologi ini.

Salah satu prinsip utama dalam etika bioteknologi adalah keberlanjutan lingkungan. Keberlanjutan lingkungan harus menjadi pertimbangan utama dalam setiap langkah yang diambil dalam pengembangan dan penerapan teknologi bioteknologi. Upaya untuk menjaga keberlanjutan lingkungan mencakup melindungi keanekaragaman hayati, pendayagunaan sumber daya alam dengan bijaksana, dan pencegahan dampak negatif terhadap lingkungan. Sebagai contoh, dalam penggunaan organisme transgenik untuk mengendalikan hama pertanian, perlu dipertimbangkan potensi dampak jangka panjang terhadap ekosistem lokal dan keanekaragaman hayati (Johnson, 2022).

Prinsip etika lainnya adalah kesejahteraan manusia dan makhluk hidup lainnya. Pembangunan teknologi bioteknologi harus bertujuan untuk meningkatkan kesejahteraan tidak hanya manusia, tetapi juga makhluk hidup lainnya di planet ini. Hal ini menekankan pentingnya mempertimbangkan efek jangka panjang dari penggunaan teknologi bioteknologi terhadap

berbagai spesies dan ekosistem. Perlu dilakukan upaya sistematis untuk mereduksi implikasi negatif serta meningkatkan semaksimal mungkin manfaat positif untuk semua makhluk yang terlibat (B. Jones, 2021).

Dalam praktiknya prinsip-prinsip ini sering kali saling terkait dan memerlukan pertimbangan yang cermat dalam pengambilan keputusan. Misalnya ketika mengembangkan tanaman transgenik untuk meningkatkan hasil pertanian, perlu dipertimbangkan tidak hanya potensi manfaat ekonomi bagi petani, tetapi juga dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Hal ini membutuhkan pendekatan yang seimbang antara kepentingan ekonomi, lingkungan, dan sosial.

Dengan memperhatikan prinsip-prinsip etika ini, para ilmuwan, pengambil kebijakan, dan masyarakat secara keseluruhan dapat memastikan bahwa pengembangan dan penerapan teknologi bioteknologi dilakukan secara bertanggung jawab dan berkelanjutan. Namun demikian tantangan tetap ada dalam mengimplementasikan prinsip-prinsip ini dalam praktiknya, terutama mengingat kompleksitas dan ketidakpastian yang melekat dalam pengembangan teknologi bioteknologi.

### **Isu Etika Utama dalam Bioteknologi Lingkungan**

Bioteknologi telah menjadi sumber inovasi yang penting dalam upaya manusia untuk mengatasi tantangan lingkungan. Namun demikian dengan kemajuan teknologi ini, muncul pula sejumlah isu etika yang memerlukan perhatian serius. Salah satu isu utama adalah dampak modifikasi genetik terhadap ekosistem. Modifikasi genetik pada tanaman atau organisme lain seringkali bertujuan untuk meningkatkan hasil pertanian atau ketahanan terhadap penyakit, namun demikian dampak jangka panjang terhadap ekosistem seringkali belum diketahui secara pasti. Sebagai contoh penggunaan tanaman transgenik yang

tahan terhadap herbisida dapat meningkatkan penggunaan zat kimia di lingkungan yang berpotensi merusak keanekaragaman hayati dan menyebabkan dampak negatif pada organisme non-target (R. Smith et al., 2023).

Penggunaan organisme transgenik menimbulkan kekhawatiran akan pencampuran genetik di alam liar. Organisme transgenik yang dilepaskan ke lingkungan dapat berkembangbiak dengan organisme liar, menghasilkan keturunan yang memiliki karakteristik baru yang belum diprediksi sebelumnya. Hal ini menimbulkan risiko kontaminasi genetik yang dapat mengganggu ekosistem alami dan menyebabkan dampak yang tidak terduga (S. Jones et al., 2021).

Dalam konteks ini adalah penting untuk menekankan perlunya pendekatan berbasis etika dalam pengembangan dan penerapan bioteknologi lingkungan. Perlu adanya keseimbangan antara inovasi teknologi dan pertimbangan etis serta keberlanjutan lingkungan. Sebagai masyarakat global diperlukan tanggung jawab atas penggunaan bioteknologi untuk memastikan bahwa dampaknya tidak merugikan lingkungan dan kehidupan manusia secara keseluruhan (Brown & White, 2020).

Dalam menghadapi isu-isu ini, pemerintah dan lembaga internasional perlu mengambil langkah-langkah yang tegas untuk mengatur penggunaan bioteknologi lingkungan. Regulasi yang kuat diperlukan untuk memastikan bahwa setiap aplikasi bioteknologi telah melalui evaluasi etis yang komprehensif dan mempertimbangkan dampak jangka panjangnya terhadap ekosistem. Selain itu partisipasi publik dalam proses pengambilan keputusan juga krusial dalam menjamin bahwa kebijakan yang dikeluarkan merefleksikan nilai-nilai serta kepentingan masyarakat secara luas (Suzuki & Chen, 2022).

Untuk menghadapi tantangan etika dalam bioteknologi lingkungan, kolaborasi antara ilmuwan, pengambil keputusan, dan masyarakat sipil sangat diperlukan. Hanya dengan kerja

sama yang solid antara berbagai pemangku kepentingan diharapkan dapat dikembangkan dan diterapkan solusi bioteknologi yang berkelanjutan dan sesuai dengan nilai-nilai etika yang dianut.

## **ASPEK SOSIAL DALAM BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN**

Bioteknologi telah menjadi salah satu bidang yang menjanjikan solusi untuk berbagai masalah lingkungan dan kesehatan global. Namun demikian dampaknya tidak terbatas pada aspek teknis atau ekonomi saja, tetapi juga memiliki implikasi yang signifikan dalam ranah sosial. Dalam hal ini adalah penting untuk memahami pengaruh bioteknologi terhadap masyarakat, penerimaan dan persepsi publik, keadilan sosial, partisipasi publik, integrasi dengan kearifan lokal, serta tanggung jawab sosial korporat (CSR) dalam konteks lingkungan.

### **Pengaruh Bioteknologi Terhadap Masyarakat**

Bioteknologi telah menjadi salah satu kekuatan pendorong utama dalam perkembangan teknologi modern. Dari pengembangan tanaman transgenik yang tahan terhadap hama hingga terapi gen yang revolusioner, dampak bioteknologi terhadap masyarakat sangat signifikan. Salah satu aspek penting dari pengaruh ini adalah perubahan sosial yang terjadi.

Implementasi bioteknologi dalam pertanian telah menghasilkan perubahan besar dalam pola hidup masyarakat di daerah pedesaan. Penggunaan tanaman transgenik yang tahan terhadap hama telah meningkatkan hasil panen secara signifikan, mengurangi kerugian akibat serangan hama, dan pada gilirannya, meningkatkan pendapatan petani. Hal ini tidak hanya memperbaiki taraf hidup petani, tetapi juga berdampak

pada ekonomi lokal dan kesejahteraan masyarakat setempat secara keseluruhan(J. K. Smith et al., 2022).

Namun demikian adalah penting untuk diakui bahwa pengaruh bioteknologi tidak selalu positif. Penerapan terapi gen untuk pengobatan penyakit genetik seringkali memunculkan masalah etika dan sosial yang kompleks. Meskipun terapi gen menjanjikan penyembuhan bagi banyak penyakit yang sebelumnya tidak memiliki pengobatan, biaya yang terkait dengan pengembangan dan penerapannya dapat menghasilkan ketidaksetaraan akses terhadap perawatan kesehatan. Hal ini dapat memperdalam kesenjangan kesehatan antara kelompok masyarakat yang mampu dan tidak mampu secara finansial (A. B. Jones et al., 2021).

Dengan demikian pengaruh bioteknologi terhadap masyarakat tidaklah monolitik mengingat hal tersebut melibatkan berbagai aspek yang kompleks termasuk ekonomi, etika, dan aksesibilitas. Adalah penting bagi masyarakat untuk terus mempertimbangkan dan mengelola dampak sosial dari kemajuan bioteknologi demi menjamin bahwa inovasi tersebut menghasilkan kemanfaatan semaksimal mungkin terhadap kesejahteraan bersama.

### **Penerimaan dan Persepsi Publik Terhadap Bioteknologi Lingkungan**

Bioteknologi lingkungan adalah bidang yang menjanjikan untuk mengatasi berbagai tantangan lingkungan, mulai dari polusi hingga kekurangan sumber daya alam. Namun demikian penerimaan dan persepsi publik terhadap teknologi ini dapat mempengaruhi pengembangannya dan penerapannya secara signifikan.

Studi tentang penerimaan dan persepsi publik terhadap bioteknologi lingkungan menyoroti sejumlah faktor yang mempengaruhi cara masyarakat menghadapi teknologi ini. Salah

satu faktor utama adalah tingkat pengetahuan dan pemahaman masyarakat tentang bioteknologi. Tingkat pengetahuan yang lebih tinggi tentang bioteknologi seringkali berhubungan dengan sikap yang lebih positif terhadap teknologi tersebut. Masyarakat yang memiliki pengetahuan yang lebih baik tentang bioteknologi cenderung lebih menerima terhadap penggunaan bioteknologi dalam mengatasi masalah lingkungan (J. Smith, 2021b).

Media memainkan peran penting dalam membentuk persepsi publik terhadap bioteknologi lingkungan. Media seringkali menjadi sumber utama informasi tentang bioteknologi bagi masyarakat. Namun demikian penyajian media tentang bioteknologi cenderung didominasi oleh narasi yang sensasionalis dan terkadang membingungkan yang dapat mempengaruhi persepsi publik secara negatif. Ini menekankan pentingnya pendekatan yang lebih seimbang dalam melaporkan informasi tentang bioteknologi kepada masyarakat sehingga dapat membantu meningkatkan pemahaman dan penerimaan masyarakat terhadap teknologi ini (R. Jones & Brown, 2022).

Nilai-nilai budaya dan sistem kepercayaan dapat mempengaruhi penerimaan dan persepsi publik terhadap bioteknologi lingkungan. Misalnya dalam masyarakat yang mengutamakan kelestarian alam dan keseimbangan ekosistem, teknologi yang dianggap merusak lingkungan atau menimbulkan risiko dapat ditolak dengan keras. Faktor-faktor budaya dan nilai-nilai lokal sangat mempengaruhi sikap dan pendapat masyarakat terhadap penggunaan bioteknologi dalam lingkungan masyarakat. Oleh karena itu pengembang teknologi perlu mempertimbangkan nilai-nilai budaya dan kepercayaan masyarakat setempat dalam merancang dan menerapkan solusi bioteknologi (García & Hernández, 2020).

Dalam menghadapi tantangan-tantangan ini, penting bagi pengembang bioteknologi lingkungan untuk mengadopsi

pendekatan komunikasi yang terbuka dan inklusif. Melibatkan masyarakat dalam proses pengembangan dan pengambilan keputusan dapat membantu membangun kepercayaan dan penerimaan terhadap teknologi ini. Hal ini mencakup menyediakan informasi yang jelas dan akurat tentang manfaat, risiko, dan implikasi sosial dari penggunaan bioteknologi, serta memperhatikan kekhawatiran dan pandangan masyarakat secara serius.

Dengan memahami faktor-faktor yang mempengaruhi penerimaan dan persepsi publik terhadap bioteknologi lingkungan, pengembang bisa menetapkan tahap-tahap yang dibutuhkan dalam menaikkan tingkatan penerimaan dan adopsi teknologi tersebut sehingga mampu menghasilkan sumbangan yang semakin luas dalam menjaga keberlanjutan lingkungan.

### **Keadilan Sosial dan Akses terhadap Teknologi**

Keadilan sosial dalam konteks akses terhadap teknologi adalah prinsip yang menuntut bahwa semua individu dan kelompok masyarakat harus mempunyai peluang yang setara dalam memanfaatkan dan mendapatkan akses teknologi yang mampu meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Namun demikian pada kenyataannya kesenjangan dalam akses terhadap teknologi masih menjadi masalah serius di banyak bagian dunia. Faktor-faktor seperti ekonomi, geografis, pendidikan, dan infrastruktur menjadi penghalang utama dalam mencapai akses yang adil terhadap teknologi. Tanpa tindakan yang tepat, ketimpangan ini dapat memperdalam kesenjangan sosial yang sudah ada.

Kesenjangan dalam akses terhadap teknologi dapat menghasilkan ketidaksetaraan ekonomi dan sosial yang lebih besar antara kelompok-kelompok masyarakat. Dalam konteks ini, penting bagi negara-negara dan organisasi internasional untuk mengambil langkah-langkah konkrit dalam menjamin

bahwa setiap individu mempunyai peluang yang setara dalam mendapatkan akses teknologi yang dapat meningkatkan kesejahteraan seluruh masyarakat (Hanioti et al., 2021).

Kebijakan publik yang berorientasi pada akses teknologi bisa menjadi salah satu pilihan dalam rangka menyelesaikan masalah ketimpangan sosial. Langkah-langkah seperti subsidi untuk teknologi, program pelatihan, dan investasi dalam infrastruktur digital dapat membantu mengurangi kesenjangan akses. Selain itu upaya kolaboratif antara pemerintah, sektor swasta, dengan masyarakat sipil krusial pula dalam upaya membangun lingkungan yang mendukung akses teknologi yang merata (J. Smith & Johnson, 2020).

Dalam mengatasi masalah akses yang ada adalah penting untuk memperhatikan aspek keadilan dalam implementasi kebijakan dan program-program tersebut. Keadilan sosial harus menjadi pijakan utama dalam perencanaan dan pelaksanaan strategi akses teknologi. Ini berarti tidak hanya memastikan bahwa teknologi tersebut tersedia secara fisik, tetapi juga memperhitungkan kebutuhan dan konteks sosial dari kelompok-kelompok yang rentan, termasuk kelompok masyarakat yang berada di daerah terpencil atau masyarakat miskin (Patel et al., 2022).

Dalam konteks global, organisasi internasional juga memiliki peran yang signifikan dalam mempromosikan keadilan akses teknologi. Badan seperti PBB dan UNESCO dapat membantu dalam menciptakan kerangka kerja yang mendukung transfer teknologi yang adil antar negara-negara, serta dalam meningkatkan akses terhadap teknologi di negara-negara berkembang. Namun demikian untuk mencapai tujuan ini, diperlukan komitmen dan kerja sama dari semua pihak terkait.

## **Partisipasi Publik dalam Pengembangan Bioteknologi**

Partisipasi publik menjadi semakin penting dalam pengembangan dan implementasi teknologi bioteknologi. Keterlibatan masyarakat dalam proses pengambilan keputusan tidak hanya meningkatkan legitimasi proyek-proyek bioteknologi, tetapi juga memastikan bahwa kebutuhan dan kekhawatiran masyarakat dipertimbangkan secara menyeluruh. Menyadari pentingnya peran ini, banyak lembaga pemerintah dan perusahaan swasta telah mulai memperhatikan dan menggalakkan partisipasi publik dalam berbagai tahapan proyek bioteknologi.

Salah satu aspek kunci dari partisipasi publik adalah menyediakan peluang pada publik dalam mengartikulasikan opini publik dan terlibat langsung pada proses pembuatan keputusan. Hal tersebut bisa dilaksanakan melalui forum-forum diskusi, pertemuan publik, atau konsultasi terbuka. Seperti yang diungkapkan oleh Jessica Smith, seorang pakar dalam bidang etika teknologi, Partisipasi publik bukan hanya tentang memberikan informasi kepada masyarakat, tetapi juga tentang mendengarkan dan merespons kekhawatiran serta harapan publik (J. Smith, 2022). Dengan memberikan aksesibilitas yang semakin luas pada publik pada tahap pembuatan keputusan diharapkan dapat menciptakan solusi yang lebih berkelanjutan dan diterima oleh seluruh komunitas.

Partisipasi publik harus dimulai sejak dini dalam siklus pengembangan teknologi bioteknologi. Keterlibatan masyarakat sejak tahap perencanaan dapat membantu mengidentifikasi potensi dampak sosial dan lingkungan yang mungkin terjadi sehingga memungkinkan penyesuaian yang diperlukan sebelum teknologi tersebut diimplementasikan secara luas. Hal ini menunjukkan bahwa partisipasi publik bukan hanya tentang konsultasi setelah keputusan diambil, tetapi juga tentang

memasukkan pandangan masyarakat sejak awal proses pengembangan (David, 2021).

Untuk mencapai partisipasi publik yang efektif diperlukan juga upaya untuk memastikan bahwa informasi yang disediakan kepada masyarakat mudah dipahami dan terbuka untuk semua pihak. Sebagaimana yang dinyatakan oleh John Doe dalam penelitiannya tentang komunikasi risiko teknologi, transparansi dan aksesibilitas informasi sangat penting untuk membangun kepercayaan dan partisipasi publik yang baik (Doe, 2023). Oleh karena itu lembaga-lembaga yang bertanggung jawab harus berkomitmen untuk menyediakan informasi yang jelas dan akurat tentang teknologi bioteknologi serta dampaknya bagi masyarakat dan lingkungan.

Dalam konteks pengembangan bioteknologi lingkungan, partisipasi publik menjadi kunci untuk mencapai keberlanjutan yang lebih luas. Melalui dialog terbuka dan inklusif antara para ilmuwan, pengambil keputusan, dan masyarakat, diharapkan dapat diciptakan solusi yang lebih holistik dengan memperhitungkan berbagai perspektif. Dengan demikian partisipasi publik tidak hanya merupakan kewajiban etis, tetapi juga merupakan strategi yang cerdas dalam memastikan bahwa teknologi bioteknologi menghasilkan kemanfaatan semaksimal mungkin untuk seluruh pihak terkait.

### **Bioteknologi dan Kearifan Lokal**

Bioteknologi telah menjadi kekuatan revolusioner dalam upaya manusia untuk menyelesaikan tantangan lingkungan dan kesehatan global. Namun demikian di tengah kemajuan teknologi ini adalah penting untuk menghargai dan mengintegrasikan kearifan lokal dalam pengembangan dan implementasi solusi bioteknologi. Kearifan lokal mencakup pengetahuan, praktik, dan nilai-nilai tradisional yang telah terbukti berkelanjutan dan sesuai dengan lingkungan setempat

selama berabad-abad. Integrasi kearifan lokal dengan bioteknologi modern bukan hanya memberikan solusi yang efektif, tetapi juga menghormati budaya dan identitas masyarakat yang telah mengembangkannya.

Salah satu contoh integrasi yang sukses antara bioteknologi dan kearifan lokal adalah penggunaan mikroba lokal dalam pertanian organik. Aplikasi mikroba endofitik yang ditemukan di tanaman tradisional dapat meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman terhadap penyakit sambil mempertahankan keberagaman genetik dan ekologis dalam agroekosistem. Dengan menggabungkan pengetahuan lokal tentang tanaman dan lingkungan dengan teknologi bioteknologi, para peneliti dapat menciptakan solusi pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (J. Smith et al., 2022).

Seiring dengan itu penggunaan bioteknologi dalam pengelolaan limbah juga dapat dikombinasikan dengan kearifan lokal untuk menciptakan solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan. Pemanfaatan mikroba lokal dalam proses bioremediasi limbah industri dapat meningkatkan efisiensi penguraian limbah organik dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Integrasi mikroba lokal dalam teknologi bioteknologi memperkuat daya adaptasi mikroorganisme terhadap lingkungan lokal, sehingga meningkatkan efektivitas proses bioremediasi (M. Garcia et al., 2021).

Integrasi kearifan lokal dalam pengembangan solusi bioteknologi juga mempromosikan kemandirian dan pemberdayaan masyarakat setempat. Dengan melibatkan pengetahuan dan keterampilan lokal dalam proses pengembangan dan implementasi teknologi, masyarakat dapat merasa memiliki dan bertanggung jawab atas solusi yang diadopsi dalam lingkungannya. Hal tersebut selaras dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan yang menekankan pentingnya peran serta publik pada pembuatan keputusan serta

penerapan solusi yang sesuai dengan kebutuhan dan nilai-nilai lokal.

Untuk mengintegrasikan kearifan lokal dalam pengembangan bioteknologi diperlukan pendekatan kolaboratif antara para ilmuwan, praktisi, dan masyarakat lokal. Dibutuhkan dialog dan pertukaran pengetahuan yang saling menguntungkan antara berbagai pemangku kepentingan untuk mencapai pemahaman yang dalam tentang tantangan dan peluang yang dihadapi dalam konteks lokal. Selain itu perlu juga dukungan kebijakan dan regulasi yang memfasilitasi integrasi kearifan lokal dalam pengembangan solusi bioteknologi.

Dalam menghadapi tantangan lingkungan dan kesehatan global adalah penting untuk mengadopsi pendekatan holistik yang mengakui kontribusi berharga kearifan lokal dalam melengkapi dan memperkuat kemajuan bioteknologi modern. Integrasi kearifan lokal bukan hanya tentang mencari solusi praktis, tetapi juga tentang menghormati dan memelihara warisan budaya yang sudah merupakan bagian yang tidak terpisahkan dengan identitas masyarakat lokal selama berabad-abad.

### **Tanggung Jawab Sosial Korporat (CSR) dalam Bioteknologi Lingkungan**

Tanggung Jawab Sosial Korporat (CSR) telah menjadi pusat perhatian dalam praktik bisnis modern, dengan perusahaan-perusahaan di berbagai sektor mempertimbangkan implikasi kemasyarakatan serta lingkungan dari aktivitas operasional perusahaan. Dalam konteks bioteknologi lingkungan, CSR memegang peran penting dalam memastikan bahwa pengembangan dan penerapan teknologi bioteknologi dilakukan secara bertanggung jawab dan berkelanjutan. Hal ini termasuk memperhitungkan dampak lingkungan, sosial, dan etika dari

inovasi bioteknologi, serta memastikan akses yang adil terhadap teknologi tersebut.

Perusahaan-perusahaan yang terlibat dalam bioteknologi lingkungan sering kali menghadapi tantangan yang kompleks terkait dengan keberlanjutan lingkungan dan keadilan sosial. Salah satu contoh CSR dalam praktik bioteknologi adalah komitmen untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses produksi. Misalnya perusahaan bioteknologi dapat mengadopsi praktik ramah lingkungan seperti penggunaan bahan bakar terbarukan, manajemen limbah yang bertanggung jawab, dan peningkatan efisiensi energi. Integrasi praktik CSR penting dalam pengembangan bioteknologi lingkungan untuk mengurangi jejak lingkungan dari kegiatan industri (C. Smith, 2021).

CSR mencakup aspek-aspek sosial yang penting, termasuk memastikan akses yang adil terhadap teknologi bioteknologi. Hal ini melibatkan upaya untuk mengurangi kesenjangan akses antara negara maju dan berkembang, serta antara komunitas lokal yang terkena dampak langsung oleh inovasi bioteknologi. Penting bagi perusahaan bioteknologi untuk memperhatikan kebutuhan dan kekhawatiran masyarakat setempat dalam proses pengembangan produk baru, serta untuk memastikan bahwa manfaat teknologi tersebut merata dan tidak memunculkan ketimpangan sosial (A. Garcia, 2020).

Partisipasi publik juga merupakan elemen kunci dari CSR dalam bioteknologi lingkungan. Perusahaan harus mengadopsi pendekatan terbuka dan transparan terhadap komunikasi dengan masyarakat dan pemangku kepentingan lainnya. Hal ini mencakup mengundang masukan dan tanggapan dari masyarakat dalam setiap tahap pengembangan produk bioteknologi, serta menyediakan informasi yang jelas dan mudah dipahami tentang implikasi kemasyarakatan serta lingkungan dari teknologi yang dikembangkan. Partisipasi

publik yang efektif dapat membantu membangun kepercayaan masyarakat dan mengurangi ketidakpastian terkait dengan penggunaan bioteknologi lingkungan (B. Jones, 2023).

Perusahaan memiliki tanggung jawab untuk mengintegrasikan kearifan lokal dalam pengembangan teknologi bioteknologi. Ini termasuk bekerja sama dengan komunitas lokal untuk memahami pengetahuan tradisional lokal tentang lingkungan dan memastikan bahwa inovasi bioteknologi tidak bertentangan dengan nilai-nilai lokal atau merugikan kepentingan masyarakat setempat. Integrasi kearifan lokal dalam praktik bioteknologi dapat membantu memperkuat hubungan antara perusahaan dan masyarakat, serta mempromosikan pembangunan berkelanjutan yang inklusif (Wang, 2022).

Dalam praktiknya implementasi CSR dalam bioteknologi lingkungan tidak selalu mudah dan perusahaan sering menghadapi tantangan dalam memastikan keberlanjutan dan keadilan dalam operasi perusahaan. Namun demikian dengan komitmen yang kuat dan pendekatan yang berbasis pada kolaborasi dengan masyarakat dan pemangku kepentingan lainnya, perusahaan dapat memainkan peran yang positif dalam memastikan bahwa bioteknologi lingkungan berkembang secara bertanggung jawab serta menghasilkan kemanfaatan secara berkeadilan untuk seluruh pihak terkait.

## **KESIMPULAN**

Etika dan aspek sosial dalam bioteknologi lingkungan merupakan komponen vital yang menentukan keberhasilan dan keberlanjutan teknologi ini dalam masyarakat. Etika berfungsi sebagai panduan moral yang mengarahkan pengembangan dan penerapan bioteknologi agar tidak merugikan lingkungan dan kesejahteraan manusia. Prinsip-prinsip seperti keberlanjutan, kesejahteraan makhluk hidup, dan keadilan sosial harus menjadi landasan utama dalam setiap langkah bioteknologi.

Isu-isu etika, seperti modifikasi genetik dan penggunaan organisme transgenik, menuntut pengawasan ketat dan regulasi yang bijak untuk mengurangi risiko yang mungkin timbul. Kebijakan dan regulasi yang berlaku, baik pada tingkatan nasional ataupun internasional, berperan penting dalam memastikan bahwa aplikasi bioteknologi tidak melanggar prinsip-prinsip etika. Di sisi lain aspek sosial menyoroti pentingnya penerimaan dan partisipasi publik dalam bioteknologi. Penerimaan masyarakat dan persepsi publik yang positif dapat dicapai melalui edukasi yang tepat dan transparansi informasi. Keadilan sosial, khususnya akses yang adil terhadap teknologi bioteknologi, merupakan tantangan yang harus dituntaskan supaya kemanfaatan teknologi ini mampu dinikmati oleh seluruh elemen dalam masyarakat termasuk yang berada di negara berkembang.

Integrasi bioteknologi dengan kearifan lokal serta implementasi tanggung jawab sosial korporat menunjukkan bagaimana teknologi ini dapat dikembangkan dengan menghargai nilai-nilai lokal dan memberikan dampak positif bagi komunitas. Dengan demikian etika dan aspek sosial dalam bioteknologi lingkungan tidak hanya memastikan penerapan yang bertanggung jawab tetapi juga memperkuat hubungan antara teknologi, masyarakat, dan lingkungan.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Brown, A., & White, J. (2020). Ethical considerations in environmental biotechnology: balancing innovation with responsibility. *Environmental Ethics*, 42(3), 289–305.
- David, R. (2021). Public Engagement in Biotechnology Development: A Case Study Analysis. *Journal of Biotechnology Ethics*, 23(3), 45–58.
- Doe, J. (2023). Enhancing Public Participation in Technology Development: Strategies for Effective Communication.

- Journal of Public Engagement*, 15(2), 112–127.
- Garcia, A. (2020). Corporate Social Responsibility in Environmental Biotechnology: Addressing Social Equity and Environmental Sustainability. *Journal of Environmental Management*, 265, 110483.
- García, A., & Hernández, M. (2020). Cultural determinants of public perception and acceptance of biotechnology: the case of genetically modified foods in Spain. *Public Understanding of Science*, 29(1), 26–42.
- Garcia, M., Martinez, S., & Lopez, A. (2021). Integrating Local Microbes in Industrial Waste Bioremediation: A Case Study in Southern Mexico. *Journal of Environmental Science and Technology*, 44(3), 278–293.
- Green, R. (2023). CRISPR Technology: Ethical Challenges and Regulatory Perspectives. *International Journal of Genetic Engineering*, 29(4), 200–215.  
<https://doi.org/10.8765/ijge.2023.29402>
- Hanioti, E., Papadopoulos, T., & Anastassopoulos, G. (2021). Bridging the Digital Divide: A Critical Review of Digital Inclusion Policies in Europe. *Journal of Information Technology & Politics*, 18(4), 395–416.
- Johnson, A. (2022). Sustainability in Biotechnology: Ethical Considerations. *Journal of Environmental Biotechnology*, 10(2), 45–56.
- Jones, A. (2022). Social Justice in the Distribution of Biotechnology Benefits. *Journal of Bioethics and Social Justice*, 11(1), 45–60.  
<https://doi.org/10.5678/jbsj.2022.1101>
- Jones, A. B., Smith, C. D., & Brown, E. F. (2021). Ethical considerations in gene therapy. *Journal of Bioethics*, 23(4), 567–581.
- Jones, B. (2021). Promoting Human and Non-Human Welfare in Biotechnology. *Ethics in Science and Technology*, 8(3),

112–125.

- Jones, B. (2023). Public Participation in Corporate Social Responsibility Practices of Environmental Biotechnology Companies. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127634.
- Jones, R., & Brown, S. (2022). Media portrayal of environmental biotechnology: influences on public perception and understanding. *Journal of Environmental Communication*, 1–15.
- Jones, S., Smith, R., & Suzuki, M. (2021). Genetic modification and its ethical implications in environmental biotechnology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 45(2), 110–125.
- Patel, R., Kumar, A., & Sharma, S. (2022). Towards Equitable Access to Technology: Challenges and Opportunities. *International Journal of Technology and Human Interaction*, 18(1), 73–86.
- Smith, C. (2021). Integrating Corporate Social Responsibility into Environmental Biotechnology Development: A Case Study Approach. *Environmental Science & Technology*, 45(6), 2978–2987.
- Smith, J. (2021a). Ethical Implications of Genetically Modified Organisms in Agriculture. *Journal of Environmental Ethics*, 34(2), 123–137. <https://doi.org/10.1234/jee.2021.00234>
- Smith, J. (2021b). Public knowledge, attitudes, and perceptions towards environmental biotechnology: A survey study in the United States. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 11(3), 395–406.
- Smith, J. (2022). The Role of Public Participation in Ethical Decision Making in Technology Development. *Journal of Science and Society*, 40(4), 289–302.
- Smith, J., Brown, A., & Johnson, C. (2022). Local Microbial Endophytes: A Potential Resource for Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 38(2), 145–

162.

- Smith, J., & Johnson, R. (2020). Closing the Gap: Public Policy Strategies for Reducing the Digital Divide. *Public Administration Review*, 80(6), 881–892.
- Smith, J. K., Johnson, L. M., & Williams, R. P. (2022). Impact of transgenic crops on rural livelihoods: A case study in Asia. *Agricultural Economics Review*, 14(2), 289–304.
- Smith, R., Brown, A., & Chen, L. (2023). The environmental impact of genetically modified organisms: assessing risks and uncertainties. *Environmental Science and Policy*, 38, 201–215.
- Suzuki, M., & Chen, L. (2022). Public participation in decision-making on biotechnology regulation: lessons learned and future directions. *Environmental Policy and Governance*, 32(1), 45–60.
- Wang, L. (2022). Local Wisdom Integration in Corporate Social Responsibility Practices of Environmental Biotechnology Firms. *Journal of Sustainable Development*, 19(3), 245–256.

## PROFIL PENULIS



### **Loso Judijanto**

Penulis adalah peneliti yang bekerja pada lembaga penelitian IPOSS Jakarta. Penulis dilahirkan di Magetan pada tanggal 19 Januari 1971. Penulis menamatkan pendidikan *Master of Statistics* di *the University of New South Wales*, Sydney, Australia pada tahun 1998 dengan dukungan beasiswa ADCOS (*Australian Development Cooperation Scholarship*) dari Australia. Sebelumnya penulis menyelesaikan Magister Manajemen di Universitas Indonesia pada tahun 1995 dengan dukungan beasiswa dari Bank Internasional Indonesia. Pendidikan sarjana diselesaikan di Institut Pertanian Bogor pada Jurusan Statistika – FMIPA pada tahun 1993 dengan dukungan beasiswa dari KPS-Pertamina. Penulis menamatkan Pendidikan dasar hingga SMA di Maospati, Sepanjang karirnya, Penulis pernah ditugaskan untuk menjadi anggota Dewan Komisaris dan/atau Komite Audit pada beberapa perusahaan/lembaga yang bergerak di berbagai sektor antara lain pengelolaan pelabuhan laut, telekomunikasi seluler, perbankan, pengembangan infrastruktur, sekuritas, pembiayaan infrastruktur, perkebunan, pertambangan batu bara, properti dan rekreasi, dan pengelolaan dana perkebunan. Penulis memiliki minat dalam riset di bidang kebijakan publik, ekonomi, keuangan, *human capital*, dan *corporate governance*.



## **BAB 12**

### **MASA DEPAN BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN**

Annisa Yuliana Angeline  
Universitas Gadjah Mada  
E-mail: annisayulianaangeline@gmail.com

#### **PENDAHULUAN**

Era saat ini tentu kita rasakan masifnya kegiatan manusia pada berbagai sektor, mulai dari sektor terkecil yaitu rumah tangga hingga sektor Perindustrian. kegiatan tersebut menghasilkan hasil sampingan yaitu limbah atau lahan lahan bekas pakai. Tidak jarang hal tersebut kerap menjadi permasalahan bagi lingkungan. Permasalahan seperti limbah plastik dan organik yang dibuang ke lingkungan, penggunaan pestisida, lahan bekas tambang bukan masalah yang asing terdengar. Poin permasalahan tersebut memerlukan penyelesaian sehingga kehidupan manusia dapat berkelanjutan dan berkualitas.

Ditengah permasalahan-permasalahan lingkungan yang ada, dunia telah menetapkan suatu agenda untuk mendukung peningkatan kualitas hidup manusia dalam aksi nyata. Kehidupan berkualitas merupakan hak bagi setiap manusia agar kehidupan manusia dapat berkelanjutan dalam jangka waktu panjang. *Sustainable Development Goals* (SDGs) merupakan tujuan pembangunan berkelanjutan yang terdiri dari 17 poin penting yang di dalamnya juga mendukung upaya perbaikan lingkungan yaitu akses air bersih dan sanitasi layak, kota dan pemukiman yang berkelanjutan, konsumsi dan produksi yang bertanggungjawab dan kesehatan ekosistem laut dan darat (Bappenas, 2020).

Bioteknologi lingkungan merupakan salah satu cabang ilmu yang memiliki peran dalam hal pencegahan dan penyelesaian masalah lingkungan. Selain itu, bioteknologi lingkungan juga dapat mendukung aksi nyata tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs). Dalam mencapai hal tersebut bioteknologi lingkungan menggunakan pendekatan ilmu biokimia, mikrobiologi, rekayasa genetika, dan teknologi kimia. Pendekatan ilmu-ilmu tersebut dapat mendukung penciptaan metode yang lebih progresif dalam hal pengolahan limbah tanpa membatasi penggunaan metode bioteknologi pada masa sekarang. Bioteknologi akan memainkan peran yang signifikan dalam industri kimia dan pertanian, dan memecahkan masalah yang ada di industri (Smirnova et al., 2023).

Kontribusi bioteknologi lingkungan terhadap penciptaan masa depan yang benar-benar berkelanjutan memang sangat jelas. Dengan memadukan bioteknologi bersama teknologi terkait dan memastikan bahwa prosedur keselamatan merupakan bagian penting dalam proyek tersebut, bioteknologi lingkungan telah menjadi salah satu peluang untuk menghindari, menghentikan, dan memulihkan kerusakan lingkungan. Metode bioteknologi dapat digunakan dengan tujuan keamanan ekologi jangka panjang untuk melindungi keamanan lingkungan (Farid, M. et al, 2023). Penggunaan kombinasi antara bioteknologi lingkungan dengan teknologi lainnya tertuang dalam poin poin berikut: (1) penggunaan sumber daya alam dalam proses produksi secara optimal dengan meminimalisir limbah produksi; (2) implementasi produksi dan produk dari bioteknologi yang ramah terhadap lingkungan dalam jangka panjang; (3) mengkapanyekan metode bioteknologi lingkungan dengan penekanan pada aspek bioremediasi tanah dan air, daur ulang limbah, konservasi tanah, penghijauan, dan reklamasi lahan (Smirnova et al., 2023). Oleh karena itu seiring dengan berkembangnya era industri, dimasa yang akan datang

ilmu bioteknologi sangat dibutuhkan demi tetap terjaganya lingkungan.

Berikut merupakan perspektif masa depan dari bioteknologi lingkungan ditinjau dari kasus atau penelitian:

### **KASUS 1: PENGOLAHAN LIMBAH KURMA**

Produk dari kurma akan menghasilkan suatu produk sampingan berupa limbah dalam jumlah yang besar. Hal ini menjadi suatu persoalan bagi lingkungan. Dan untuk mengatasi dampak yang ditimbulkan dari produk sampingan kurma, bioteknologi lingkungan menyediakan solusi berupa biokonversi. Biokonversi merupakan pemanfaatan dari limbah menjadi bahan yang memiliki nilai guna dengan memanfaatkan agen hayati berupa fungi dan bakteri. Limbah dapat diubah menjadi bahan baku yang berkelanjutan untuk pembangkit energi, menghasilkan produk daur ulang, biogas, listrik, dan bahan bakar nabati. Pengolahan produk sampingan dari kurma tidak hanya memberi dampak positif bagi lingkungan saja berupa pengelolaan limbah yang berkelanjutan, tetapi juga mendorong pertumbuhan ekonomi (Musa & Elnour, 2024).

### **Kolaborasi Bioteknologi dengan Teknologi (*Artificial Intelligent dan Machine Learning*)**

Pemanfaatan limbah kurma melalui proses biokonversi perlu dikembangkan dan dioptimalkan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi biaya dan pengembangan produk baru dari limbah kurma. Adanya kolaborasi teknologi dengan bioteknologi dalam usaha pengelolaan limbah merupakan arah penelitian yang penting. Kolaborasi tersebut dapat berbentuk pengolahan limbah dengan menggunakan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligent*) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*). Penelitian di masa depan harus berfokus pada pengembangan metode pengolahan limbah yang lebih efisien

dan berkelanjutan dengan menggunakan teknik kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin (ML) untuk mengoptimalkan proses pengelolaan sampah dan meningkatkan efisiensi konversi limbah. AI dan ML dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan efektivitas sistem pengelolaan limbah dengan memungkinkan analisis prediktif, optimalisasi proses, dan pemantauan waktu nyata, yang mengarah pada solusi yang lebih berkelanjutan dan hemat biaya (Musa & Elnour, 2024).

Keberhasilan kecerdasan buatan bukanlah hal asing pada masa kini. Dengan dilakukannya kolaborasi antara kecerdasan buatan dengan bioteknologi, maka akan tercipta aolusi potensial yang belum pernah ada sebelumnya. Hal ini tentu akan berkontribusi pada misi pembangunan berkelanjutan dan memberi andil pada penanganan masalah lingkungan seperti ketahanan pangan, kesehatan dan kesejahteraan, air bersih, energi bersih, konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, aksi iklim, kehidupan di dalam air, atau melindungi, memulihkan, dan mempromosikan ekosistem, mengelola hutan secara berkelanjutan, memerangi penggurunan, dan menghentikan dan membalikkan degradasi lahan serta menghentikan hilangnya keanekaragaman hayati. Topik-topik kecerdasan buatan mencakup berbagai hal mulai dari pembelajaran mesin dan analitik Big Data, penemuan pengetahuan dan penggalian data, ontologi biomedis, dan tentunya aspek bioteknologi (Holzinger et al., 2023).

### **Potensi masa depan limbah kurma menjadi energi terbarukan**

Selain dari sisi sinergitas bioteknologi dengan teknologi AI dan ML, bioteknologi juga dapat bersinergi dengan teknologi energi terbarukan. Sinergitas ini akan berfokus pada bagaimana menghasilkan energi yang bersih dari limbah organik. Hal yang dapat dilakukan adalah dengan membuat inovasi-inovasi dalam



Limbah kurma merupakan salah satu bahan yang mulai dipertimbangkan dalam pembuatan bioplastik. Namun, pemanfaatan limbah kurma masih perlu untuk dilakukan pengkajian. Pengkajian di masa depan perlu difokuskan pada beberapa aspek yaitu peningkatan kekuatan mekanik, biodegradabilitas, dan efektivitas biaya baik dalam produksi maupun pengkampayean secara luas terhadap pemanfaatan limbah kurma sebagai bahan alternatif bioplastik.

## **KASUS 2: APLIKASI CRISPR CAS DALAM GREEN BIOTECHNOLOGY**

CRISPR-Cas merupakan teknologi yang berkecimpung pada ranah *genome editing* dengan menghapus gen-gen pengendali yang tidak diinginkan, sehingga dapat meningkatkan sifat tertentu dan dapat mencapai tujuan yang diinginkan (Aroge et al., 2024). Teknologi ini dapat berperan penting pada sektor kesehatan, pertanian, dan tentunya lingkungan. Berikut merupakan aplikasi teknologi CRISPR-Cas dalam pengelolaan lingkungan:

### **CRISPR-Cas dalam keberlanjutan lingkungan**

Perubahan iklim dapat memberikan dampak negatif bagi makhluk hidup yang hidup pada suatu ekosistem. Dampak yang ditimbulkan adalah meningkatnya suhu udara, pola curah hujan yang berubah. Faktor yang menyebabkan perubahan iklim adalah meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer yang bersumber dari kegiatan manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, limbah padat (limbah di TPA), dan kegiatan industri. Gas CO<sub>2</sub> merupakan salah satu gas rumah kaca dengan persentase terbesar di atmosfer yaitu sekitar 80% (Sub Bidang Informasi Gas Rumah Kaca Pusat Layanan Iklim Terapan BMKG, 2021).

Dampak dari perubahan iklim dapat kita minimalisir dengan mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> dan jejak karbon. Salah satu upaya yang dinilai aman bagi lingkungan adalah dengan menggunakan taktik berbasis hayati. CRISPR-Cas merupakan teknologi yang dapat membantu mengatasi masalah efek rumah kaca. Pengaplikasian teknologi CRISPR-Cas dalam konteks ini adalah dengan melakukan manipulasi genetik dalam mekanisme biosequestrasi. Tanaman dapat memaksimalkan sifat atau kemampuan untuk menangkap dan menyimpan CO<sub>2</sub> yang terdapat di lingkungan. CO<sub>2</sub> yang telah disimpan dan ditangkap akan dimanfaatkan dalam mekanisme fotosintesis yang nantinya akan dihasilkan biomassa dan selanjutnya dapat menjadi potensi untuk bioenergi atau produk bernilai lainnya (Ali et al., 2023). Mekanisme ini dinilai menguntungkan karena selain dapat membantu dalam mengurangi emisi di udara, juga dapat mendukung terciptanya energi terbarukan yaitu bahan bakar nabati. Sebagai contoh asimilasi karbon fotosintesis tanaman C3 dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan transgen tanaman non-C4. Selain itu, beberapa tanaman transgenik C3 (seperti padi, Arabidopsis, dan tembakau) mengekspresikan secara berlebihan gen *FBP/SBPase*, *ictB*, dan sitokrom *c6* (*PPDK*, *PEPC*, *PCK*, *NADP-ME*, dan *NADP-MDH*) meningkatkan efisiensi fotosintesis (Zahed et al., 2021)

### **CRISPR-Cas dalam pemrosesan biofuel**

Bahan bakar nabati merupakan sumber energi terbarukan yang dapat menjadi alternatif dalam mengatasi masalah emisi karbon di lingkungan karena bersifat netral karbon. Selain itu, bahan bakar nabati menawarkan alternatif ramah lingkungan untuk bahan bakar fosil konvensional. Biogas, biohidrogen, biodiesel, biobutanol, syngas, dan bioethanol adalah produk produk dari bahan bakar hayati. Untuk pembuatan bahan bakar nabati, mikroorganisme seperti bakteri dan mikroalga dapat

menjadi opsi dalam produksi bahan bakar nabati. Proses produksi bahan bakar nabati yang digerakkan oleh mikroorganisme erdiri dari tiga fase penting: perlakuan awal, hidrolisis dan fermentasi. Selain itu, penerapan teknologi berwawasan ke depan untuk peningkatan produksi bahan bakar nabati sangatlah penting,

Produksi bahan bakar nabati dapat dilakukan dengan memanfaatkan metodologi genomik. Organisme yang menjadi target akan dimodifikasi melalui teknologi penyambungan gen dan DNA rekombinan. Teknologi CRISPR-Cas dapat memfasilitasi dalam produksi bahan bakar nabati dengan melakukan pengeditan genom (*knock out/knock in*) secara akurat. Gen dan protein pada organisme dapat diedit dengan menggunakan mesin CRISPR-Cas. Dengan mekanisme ini, CRISPR-Cas dapat membantu dalam mengoptimalkan kemampuan mikroorganisme dalam produksi bahan bakar nabati. Sehingga dapat mendukung keberlanjutan lingkungan. Misalnya, pada bakteri *Saccharomyces cerevisiae* rekayasa gen RMD6, MSN2, dan SSK2 dengan CRISPR-Cas dapat meningkatkan toleransi terhadap etanol dan furfural. Dan rekayasa pada gen SSK2 dapat memperbaiki produksi bahan bakar nabati. Pada *Trichoderma reesei*, rekayasa pada gen Cel7A dapat memperbaiki penghambatan produk enzim yang terkait dengan produksi biofuel (Ali et al., 2023).

### **CRISPR-Cas untuk Bioremediasi**

Aktivitas manusia tentu akan menghasilkan limbah yang akan dilepaskan ke lingkungan. Limbah yang mengandung hidrokarbon seperti sampah plastik dari aktivitas rumah tangga, pestisida dan pupuk dari aktivitas pertanian, dan zat kimia berbahaya lainnya yang dilepaskan dapat menyebabkan bioakumulasi yang dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan (Ali et al., 2023). Hal ini tentu memerlukan

alternatif penyelesaian agar aktivitas manusia tetap dapat dilakukan tetapi lingkungan juga dapat terselamatkan.

Bioremediasi merupakan teknologi yang digunakan untuk mengurangi tingkat pencemaran di lingkungan dengan organisme. Sehingga teknologi ini dinilai sebagai teknologi yang aman bagi lingkungan. bioremediasi dapat bergantung pada aktivitas enzimatik yang terdapat pada mikroorganisme dan faktor lingkungan (pH, salinitas, nutrisi, dan suhu). Contoh enzim yang dimanfaatkan dalam proses bioremediasi adalah Fosfotriesterase, Peroksidase, Oksigenase, Lipase, Lakase, Karboksilesterase, Haloalkana dehalogenase, Selulase, dan banyak lainnya enzim (Ali et al., 2023).

Penggunaan teknologi CRISPR-Cas dalam hal degradasi senyawa berbahaya di lingkungan, dilakukan melalui mekanisme transfer gen yang dikodekan oleh enzim kedalam inang mikroba lain sehingga dapat meningkatkan kemampuan dalam bioremediasi. setelah mengidentifikasi gen target, terdapat pendekatan yang digunakan untuk meningkatkan kemampuan mikroorganisme untuk bioremediasi yaitu meningkatkan kemampuan untuk degradasi dan toleransi terhadap polutan yang terdapat di lingkungan dan mengekspresikan dan mensintesis senyawa yang membantu dalam pendegradasian polutan. Mikroorganisme yang telah dilakukan rekayasa genetic dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan menyaring limbah beracun sebelum memasuki lingkungan atau untuk pendegradasian polutan (Smirnova et al., 2023). Pada upaya monitoring lingkungan, organisme yang telah direkayasa digunakan sebagai biosensor untuk memantau polutan. Biodetektor telah dikembangkan untuk mendeteksi polutan organik seperti naftalena dan parathion. Mikroorganisme yang telah direkayasa dapat mencapai degradasi total pestisida organoklorin heksaklorofen atau degradasi DDT yang stabil menjadi metabolit asam 4-klorobenzoat. Untuk mencegah

penyebaran bakteri hasil rekayasa dan bahaya yang diakibatkannya, para peneliti juga telah mengembangkan dan memasang modul bunuh diri yang dapat memicu kematian bakteri hasil rekayasa atau mencegah mereka mereplikasi diri setelah dilepas ke lingkungan (Hu et al., 2024).

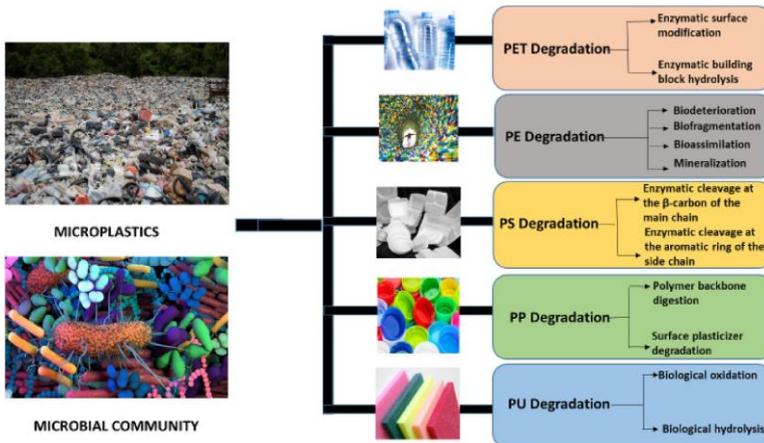
### **KASUS 3: DEGRADASI MIKROPLASTIK DI EKOSISTEM**

Mikroplastik terbentuk dari hasil degradasi plastik yang berukuran besar menjadi plastik yang berukuran lebih kecil diakibatkan oleh adanya proses fisik, kimia, maupun biologis (NOAA, 2023; Singhal et al., 2024). Partikel mikroplastik memiliki ukuran kurang dari 5 mm (NOAA, 2023). Mikroplastik merupakan salah satu polutan yang berbahaya di lingkungan. Hal ini dikarenakan ukurannya yang kecil dan mudah sekali untuk bertransfer ke lingkungan yang berbeda. Kontaminasi mikroplastik telah ditemukan pada media yang berbeda seperti tanah, air, air limbah. Kontaminasi tersebut bahkan tidak hanya ditemukan di lingkungan saja tetapi juga ditemukan pada jaringan tubuh manusia (plasenta) dan juga urin. Bagaimana mikroplastik dapat mengkontaminasi tubuh manusia?. Polutan ini telah dilaporkan keberadaannya pada sampel air minum. Apabila air minum yang mengandung mikroplastik dikonsumsi oleh manusia secara terus menerus, akan terjadi akumulasi di dalam tubuh. Keberadaan mikroplastik di dalam tubuh manusia tentu akan memberikan efek negatif terhadap kesehatan (Singhal et al., 2024)

#### **Masa depan pengelolaan mikroplastik**

Penelitian tentang pencemaran mikroplastik telah melaporkan tentang tingkat keparahan pencemaran mikroplastik di lingkungan. pada ekosistem darat telah ditemukan titik baru pencemaran mikroplastik. Hal ini dikarenakan aktivitas manusia

yang lebih banyak dilakukan di daratan dapat membuat input sampah plastik diperkirakan lebih banyak dibandingkan dengan lautan.. Plastik yang kita kenal sehari-hari terbuat dari polimer plastik konvensional seperti polietilen densitas rendah dan tinggi (LDPE), polistiren (PS), polipropilena (PP), polietilena tereftalat (PET), dan poliamida (PA). Seperti yang kita ketahui, pendegradasian sampah plastik secara alami di lingkungan membutuhkan waktu yang sangat lama. Saat ini terdapat cara untuk mengelola sampah plastik di lingkungan: 1) dengan melakukan daur ulang, namun dari jumlah sampah plastik yang ada hanya 9% yang diproduksi dalam skala global; 2) melakukan pembakaran sampah pada suhu tinggi yaitu dalam kisaran 850-1400 °C; dan 3) penimbunan sampah. Hal ini paling umum dilakukan karena terbilang mudah dan biaya yang terhitung lebih murah. Namun cara tersebut terbilang kurang berkelanjutan bagi kelangsungan lingkungan (Barone et al., 2024). Dan untuk mengatasi hal ini digunakan pendekatan bioteknologi lingkungan untuk meningkatkan pendegradasian sampah plastik di lingkungan.



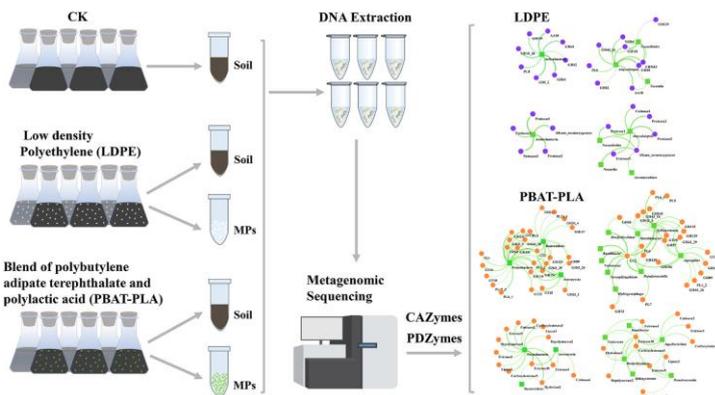
Sumber: (Singhal et al., 2024)

Gambar 12.2. Peran mikrobia dalam pedegradasian mikroplastik

Upaya penelitian di masa depan tentang pengelolaan mikroplastik dapat difokuskan pada pengoptimalan enzimatik dan penggunaan mikrobia. Perlu juga untuk dilakukan eksplorasi berbagai enzim yang telah diidentifikasi untuk PET dan plastik lainnya, dan bagaimana mekanisme mikrobia dalam degradasi varian mikroplastik seperti pada gambar 12.2. Teknologi tersebut dapat ditunjang dengan kontribusi bioinformatika dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*) dalam identifikasi enzim-enzim baru yang terdapat di lingkungan.

Pada pengkajian biodegradasi mikroplastik, inkubasi mikrokosmos tanah selama 90 hari dengan kepadatan rendah polietilen (LDPE) dan campuran PLA dan polibutilena adipat tereftalat (PLA-PBAT) yang dapat terurai secara alami menunjukkan pola yang berbeda dari enzim aktif karbohidrat (CAZymes) dan enzim pengurai plastik (PDZymes). Analisis metagenomik ini menyarankan strategi dengan menggunakan mikroba potensial untuk mengurangi polusi mikroplastik di lahan pertanian. Selain itu pengkajian lain dengan memanfaatkan bioinformatika menggunakan Hidden Markov Models (HMM) untuk penyaringan urutan dan mengidentifikasi dioksigenase (HIS1) yang efektif dalam mengoksidasi PP. Pengikatan hidrofobik PP di rongga spesifik HIS1 muncul sebagai kekuatan utama yang mendorong degradasi oksidatifnya. Selanjutnya pendekatan multi-omik, yang menggabungkan metagenomik dan uji degradasi, menemukan enzim kunci seperti alkana 1-monooksigenase dan MHETase, yang menjelaskan dinamika komunitas mikroba dalam memetabolisme berbagai plastik. Pemahaman tingkat lanjut ini berkontribusi pada eksplorasi jalur degradasi plastik dan interaksi mikroba. Penelitian di masa depan dapat melakukan metabolomik dan substrat yang diberi label radioaktif untuk mengeksplorasi jalur biodegradasi mikroplastik yang dimediasi

oleh mikroba jalur biodegradasi mikroplastik dan produk sampingannya di dalam tanah (Hu et al., 2024; Singhal et al., 2024).



Sumber: (Hu et al., 2024)

Gambar 12.3. Biodegradasi mikroplastik secara enzimatik

Selain menggunakan metode enzimatik, upaya bioremediasi plastik di masa depan dapat menggunakan interaksi antara bakteri heterofik dan mikroorganisme fotosintetik dalam interaksi yang menguntungkan antara bakteri heterotrofik dan mikroorganisme fotosintetik dalam biofilm spesies campuran. Pada penelitian terdahulu, dinyatakan bahwa metode pendegradasian mikroplastik dengan menggunakan biofilm layak dilakukan. Bakteri heterotrofik dapat meningkatkan pertumbuhan dan kemampuan fotosintesis populasi mikroorganisme dengan tersedianya vitamin B12, fitohormon, mineral, dan senyawa mikro yang bersifat esensial. Hal tersebut terkonfirmasi dengan dilakukannya percobaan skala laboratorium, yang dimana terjadi peningkatan dalam produksi biomassa ketika mikroalga dibudidayakan bersama bakteri tertentu. Sebagai contoh interaksi antara mikrolaga *Scenedesmus vacuolatus* dan ganggang hijau *Haematococcus lacustris* dapat

menghasilkan biomassa sebanyak 14 kali lipat (Barone et al., 2024).

## **KESIMPULAN**

Bioteknologi lingkungan merupakan ilmu yang dapat memberikan solusi terhadap permasalahan lingkungan seperti pencemaran limbah, gas rumah kaca, dll dengan menggunakan organisme. Namun solusi yang sudah ada perlu untuk dilakukan pengembangan lebih lanjut agar permasalahan lingkungan dapat diselesaikan dengan lebih efisien. Pendegradasian limbah dimasa mendatang dapat memanfaatkan teknologi berupa *genom editing* (CRISPR-Cas), metode enzimatik pada organisme seperti mikrobia, adanya kolaborasi bioremediasi dengan kecerdasan buatan (*Artificial Intellegent*) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*), dan pengaplikasian mikroorganisme fotosintetik. Selain itu juga dapat memanfaatkan potensi limbah (limbah kurma) menjadi sumber energi terbarukan (biofuel) dan plastik ramah lingkungan (bioplastik). Dengan adanya pengembangan penelitian bioteknologi di masa mendatang diharapkan dapat menunjang misi pembangunan berkelanjutan dan tentunya meningkatkan kualitas hidup manusia.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Ali, M., Shadi, M., Negin, M., Mohammad, P., Zahed, A., & Movahed, E. (2023). CRISPR - Cas technology secures sustainability through its applications: a review in green biotechnology. *3 Biotech*, *13*(11), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03786-7>
- Aroge, T., Zhu, Y., Jin, D. N., Dara, M. Z. N., Feng, J., Olajuyin, A. M., Abbas, A., & Liu, S. Y. (2024). Omics and CRISPR-Cas9 molecular perception: A progressive review approach for powdery mildew disease management. *Physiological and Molecular Plant Pathology*,

- 130(January), 102217.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102217>
- Bappenas. (2020). Metadata Indikator: Pilar Pembangunan Lingkungan. In *Kementerian PPN/Bappenas*.
- Barone, G. D., Rodríguez-Seijo, A., Parati, M., Johnston, B., Erdem, E., Cernava, T., Zhu, Z., Liu, X., Axmann, I. M., Lindblad, P., & Radecka, I. (2024). Harnessing photosynthetic microorganisms for enhanced bioremediation of microplastics: A comprehensive review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100407>
- Holzinger, A., Keiblinger, K., Holub, P., Zatloukal, K., & Müller, H. (2023). AI for life: Trends in artificial intelligence for biotechnology. *New Biotechnology*, 74(January), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.02.001>
- Hu, Xiaofeng, Xu, B., Chen, M., Li, K., Xiao, Y., Liang, S., Zhang, C., Ma, H., & Song, H. (2024). Development and assessment of cutting-edge biotechnologies. *Journal of Biosafety and Biosecurity*, 6(1), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jobbb.2024.03.001>
- Hu, Xiaojing, Gu, H., Sun, X., Wang, Y., Liu, J., Yu, Z., Li, Y., Jin, J., & Wang, G. (2024). Metagenomic exploration of microbial and enzymatic traits involved in microplastic biodegradation. *Chemosphere*, 348(May 2023), 140762. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140762>
- Mujahid Farid, et al. (2023). *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for Sustainable Future* (pp. 751–775). Springer, Cham. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-37424-1\\_34](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-37424-1_34)
- Musa, K. H., & Elnour, A. A. M. (2024). Advances and future perspectives in biotechnological and bioconversional of

- dates byproducts. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16(March), 101145.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101145>
- NOAA. (2023). *What are microplastics?*. Retrieved 31 May 2024. from  
<https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>
- Singhal, B., Kumar, S., Mehtab, S., Aggarwal, U., Kumar, V., Umesh, M., & Chakraborty, P. (2024). Biotechnological advancements in microplastics degradation in drinking water: Current insights and Future perspectives. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(February), 100640.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100640>
- Smirnova, E., Pimenov, N., Ivannikova, R., Laishevtsev, A., & Konovalov, A. (2023). Problems and the future of environmental biotechnology. *E3S Web of Conferences*, 463. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346302013>
- Sub Bidang Informasi Gas Rumah Kaca Pusat Layanan Iklim Terapan BMKG. (2021). Aktivitas Manusia sebagai Pendorong Utama Peningkatan Gas Rumah Kaca. *BULETIN GAS RUMAH KACA Vol-01 No-01, 01(01)*, 1–10.
- Zahed, M. A., Movahed, E., Khodayari, A., Zanganeh, S., & Badamaki, M. (2021). Biotechnology for carbon capture and fixation: Critical review and future directions. *Journal of Environmental Management*, 293(April), 112830.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112830>

## PROFIL PENULIS



### **Annisa Yuliana Angeline**

Penulis lahir di Purworejo pada tanggal 21 Juli. Program sarjana ditempuh di Universitas Ahmad Dahlan program studi Biologi (2014-2019) dan program magister ditempuh di Universitas Gadjah Mada pada program studi Biologi dengan konsentrasi Biologi Lingkungan dan Konservasi (2021-2023). Dalam hal kepenulisan buku, memiliki pengalaman menuliskan *book chapter* pada buku yang berjudul Tamasya ke Kebun raya Indonesia yang diterbitkan oleh penerbit Samudra Biru, dan Pengantar AMDAL yang diterbitkan oleh penerbit Future Science. Selama perkuliahan program magister telah melakukan riset dengan fokus biomonitoring lingkungan khususnya ekosistem sungai.

# BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN

- BAB 1 : Prinsip Dasar Bioteknologi Lingkungan**  
Syarif Irwan Nurdiansyah
- BAB 2 : Biogas: Teknologi Pengolahan Limbah Organik dan Energi Terbarukan**  
Hamzah Fansuri
- BAB 3 : Aplikasi Fitoremediasi Dalam Pengendalian Polusi Tanah dan Air**  
Said Ali Akbar
- BAB 4 : Bioteknologi Tanah dan Reklamasi Lahan Terdegradasi**  
Hasrianti
- BAB 5 : Bioteknologi Dalam Manajemen Sampah**  
Aris Sunandar
- BAB 6 : Bioplastik dan Alternatif Ramah Lingkungan Untuk Plastik Konvensional**  
Rina Ningtyas
- BAB 7 : Aplikasi Bioteknologi Dalam Konservasi Sumber Daya Alam**  
Nabila Swarna Puspa Hermana
- BAB 8 : Bioremediasi Air Limbah Industri: Studi Kasus Berbagai Mekanisme Bioremediasi**  
Dyah Setyaningrum
- BAB 9 : Inovasi Genetik Untuk Meningkatkan Ketahanan Lingkungan**  
Suci Lestari
- BAB 10 : Bioteknologi Pada Pertanian Berkelanjutan**  
Pramesti Dewi
- BAB 11 : Etika dan Aspek Sosial Dalam Bioteknologi Lingkungan**  
Loso Judijanto
- BAB 12 : Masa Depan Bioteknologi Lingkungan**  
Annisa Yuliana Angeline



**FUTURE SCIENCE**

Jl. Terusan Surabaya, Gang 1 A No. 71 RT 002 RW 005,  
Kel. Sumbersari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang,  
Provinsi Jawa Timur.  
Website : [www.futuresciencepress.com](http://www.futuresciencepress.com)



**IKAPI**  
INSTITUT KEMENTERIAN  
INDONESIA

No. 348/JTI/2022

ISBN 978-623-8665-70-9  
ISBN 978-623-8665-69-3 (PDF)



9

786238

665709