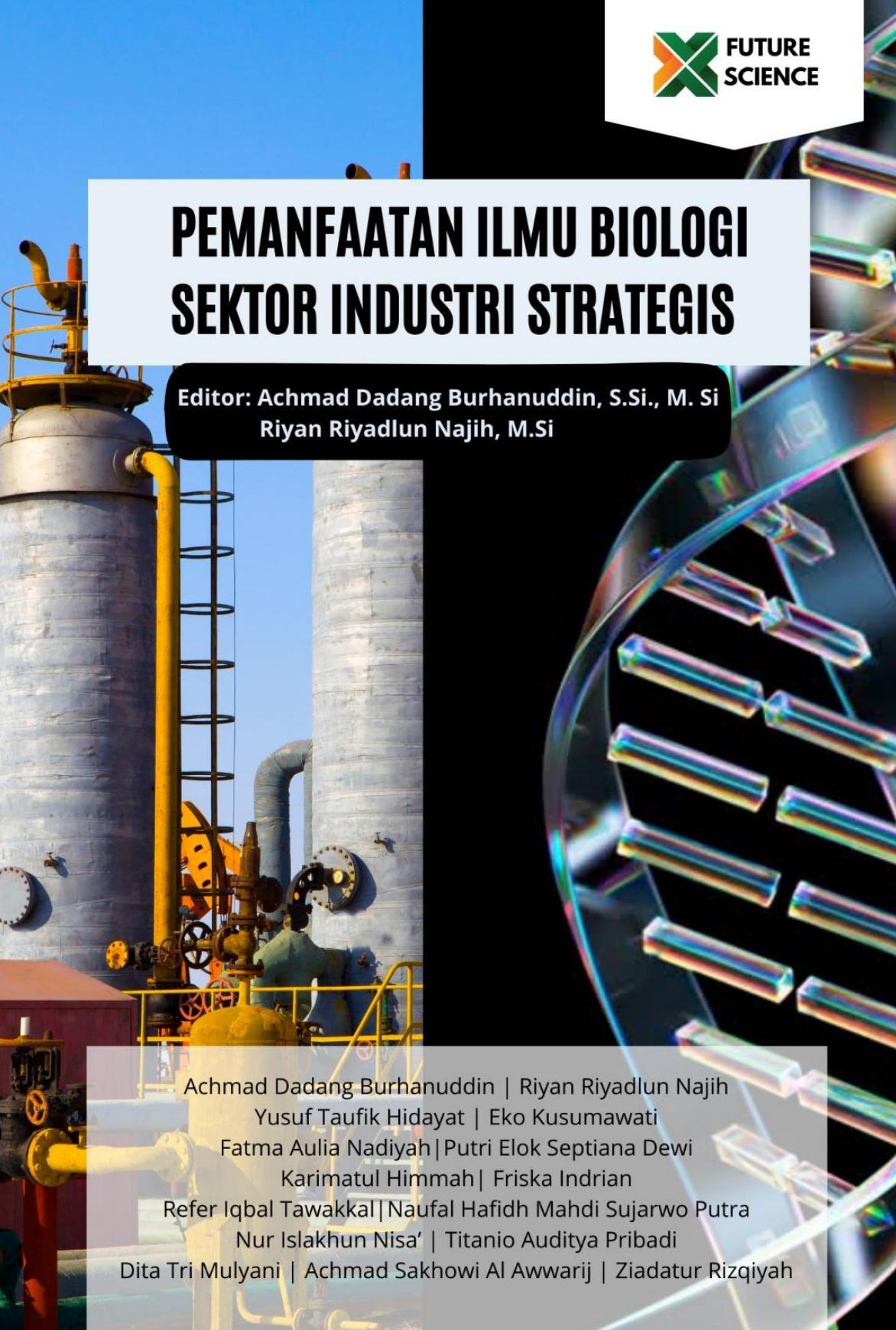


# PEMANFAATAN ILMU BIOLOGI SEKTOR INDUSTRI STRATEGIS

**Editor:** Achmad Dadang Burhanuddin, S.Si., M. Si  
Riyan Riyadlun Najih, M.Si



Achmad Dadang Burhanuddin | Riyan Riyadlun Najih

Yusuf Taufik Hidayat | Eko Kusumawati

Fatma Aulia Nadiyah | Putri Elok Septiana Dewi

Karimatul Himmah | Friska Indrian

Refer Iqbal Tawakkal | Naufal Hafidh Mahdi Sujarwo Putra

Nur Islakhun Nisa' | Titanio Auditya Pribadi

Dita Tri Mulyani | Achmad Sakhowi Al Awwarij | Ziadatur Rizqiyah

Copyright© (2025)

All rights reserved.

No part of this book may be reproduced or used in any manner without the prior written permission of the copyright owner, except for the use of brief quotations. To request permissions, contact the publisher at (editor.ijmaber@futuresciencepress.com)

ISBN:  
978-621-8438-18-7 PDF (downloadable)

Book type:  
Reference book

Published by:  
FSH-PH Publications  
Block 4 Lot 6, Lumina Homes,  
Pamatawan, Subic, Zambales

<https://fsh-publication.com/>

# **Pemanfaatan Ilmu Biologi Sektor Industri Strategis**

Editor:

Achmad Dadang Burhanuddin S.Si, M.Si  
Riyan Riyadlun Najih, M.Si

Penulis:

Achmad Dadang Burhanuddin S.Si., M.Si.  
Riyan Riyadlun Najih, M.Si.  
Yusuf Taufik Hidayat, S.Pi., M.Si.  
Dr. Eko Kusumawati, S.Si, MP.  
Fatma aulia nadiyah, M.Si.  
Putri Elok Septiana Dewi, S. Si., M.Si.  
Karimatul Himmah, S. Si., M. Si.  
Friska Indrian, S.Pi., M.Si.  
Refer Iqbal Tawakkal, S.Si., M.Si.  
Naufal Hafidh Mahdi Sujarwo Putra, S.Pd., M.Si.  
Nur Islakhun Nisa', S.Pd., M.Sc.  
Titanio Auditya Pribadi S.Pd., M.Si.

Dita Tri Mulyani, M.Pd.  
Achmad Sakhowi Al Awwarij, S.K.M., M.KKK  
Ziadatur Rizqiyah S.Si., M.Si.

Technical Editor:  
Naqiyah Afifah Mulachelah, S.Si., M.Si.

Desain cover:  
Nur indah Ratnasari, S.Si.

2025

# DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>x</b>
<b>BAB 1 Sejarah Perkembangan Ilmu Biologi pada Sektor Industri .....</b>	<b>1</b>
12.000-4.000 SM — Masa Neolitikum: Awal Domestikasi Tanaman dan Kemunculan Fermentasi Tradisional .....	2
Abad ke-17 (1670-an) — Penemuan Mikroorganisme oleh Antonie van Leeuwenhoek .....	2
Abad ke-19 (1850-1890) — Louis Pasteur, Teori Mikroba, dan Fondasi Ilmiah Fermentasi .....	3
Akhir Abad ke-19 (1890-an) — Enzim Mikroba dan Awal Komersialisasi Produk Berbasis Biokatalis .....	3
Awal Abad ke-20 (1916-1919) — Fermentasi Industri Berskala Besar dan Lahirnya Istilah “Bioteknologi” .....	4
1928-1940-an — Revolusi Antibiotik dan Lahirnya Produksi Farmasi Berskala Industri .....	5
1953-1970-an — Fondasi Molekul Genetik dan Lahirnya Metode Biologi Molekuler.....	6
1975-1985 — Lahirnya Antibodi Monoklonal, Kemajuan Kultur Sel, dan Era Baru Bioproduk Terapeutik.....	7
1976-1980-an — Kelahiran Industri Bioteknologi Modern: Perusahaan Pionir dan Komersialisasi Produk Rekombinan.....	8
1990-2003 — Era Genom dan Bioinformatika: Revolusi Data Besar untuk Optimasi Proses Biologis dan Industri .....	9
2000-2015 — Rekayasa Metabolik dan Kebangkitan Industri Bahan Hayati .....	10
2012—Sekarang — Era CRISPR, Biologi Sintetis, dan Lahirnya Bioteknologi Industri Generasi Baru .....	11
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>13</b>
<b>BAB 2 Industri Manufaktur I: Pemanfaatan Bakteri sebagai Kunci Industri .....</b>	<b>15</b>

Peran Bakteri dalam Bioindustri Modern .....	15
Aplikasi Bakteri di Industri Pangan dan Minuman Fermentasi..	17
Bakteri sebagai Produsen Metabolit Bernilai Tinggi dalam Industri Farmasi .....	19
Pemanfaatan Bakteri untuk Pengolahan Limbah dan Bioremediasi .....	20
Bakteri dalam Industri Pertanian dan Peternakan: Pupuk Hayati dan Probiotik.....	21
Bakteri sebagai Katalis dalam Produksi Energi Terbarukan ( <i>Biofuel</i> dan Biogas) .....	22
Rekayasa Genetika Bakteri untuk Produksi Skala Industri .....	23
Standar Keamanan, Regulasi, dan Etika dalam Pemanfaatan Bakteri Industri .....	25
Peluang dan Tantangan Bioindustri Berbasis Bakteri di Era Industri 4.0.....	26
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>28</b>
<b>BAB 3.....</b>	<b>34</b>
<b>Fungi sebagai Agen Fermentasi dalam Produk Pangan dan Minuman.....</b>	<b>34</b>
Sejarah Penggunaan Fungi dalam Fermentasi .....	35
Jenis-Jenis Fungi dan Peranannya .....	36
Metabolit Sekunder dan Peran Pelindung.....	41
Studi Kasus Produk Fermentasi Berbasis Fungi.....	41
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>46</b>
<b>BAB 4.....</b>	<b>49</b>
<b>Peran Rekayasa Genetika dalam Pengobatan .....</b>	<b>49</b>
Teknologi DNA Rekombinan dalam produksi obat .....	49
Terapi Gen ( <i>Gene Therapy</i> ).....	51
Pengembangan Vaksin Rekombinan .....	52
Terapi Sel.....	53
Pengeditan Genom ( <i>Genome Editing</i> ) .....	54
Imunoterapi.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>56</b>
<b>BAB 5.....</b>	<b>57</b>
<b>Industri Kesehatan II: Vaksin dalam Keilmuan Biologi</b>	<b>57</b>

Sejarah Penemuan Vaksin .....	57
Dasar Biologi Vaksin.....	60
Jenis Vaksin: Dari Teori Biologi Menuju Produksi Vaksin Industri .....	66
Teknologi dan Industri Vaksin .....	69
Vaksin dalam Perspektif Kesehatan Masyarakat.....	72
Prinsip Biologi dalam Kebijakan dan Jadwal Imunisasi .....	73
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>75</b>
<b>BAB 6.....</b>	<b>77</b>
<b>Industri Pangan: Bioteknologi untuk Ketahanan Pangan dan Peningkatan Mutu Bahan Pangan .....</b>	<b>77</b>
Bioteknologi Pangan.....	78
Peran Bioteknologi dalam Ketahanan Pangan .....	80
Peran Bioteknologi dalam Peningkatan Mutu Bahan Pangan ....	84
Bioteknologi dalam Industri Pangan Berkelanjutan .....	86
Tantangan, Risiko, dan Regulasi Bioteknologi Pangan.....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>90</b>
<b>BAB 7.....</b>	<b>94</b>
<b>Industri Energi: Pengembangan Energi Biofuel dan Energi dari Keanekaragaman Hayati .....</b>	<b>94</b>
Konsep Bioenergi dan <i>Biofuel</i> .....	94
Definisi Bioenergi dan <i>Biofuel</i> .....	95
Keanekaragaman Hayati sebagai Sumber Daya Energi .....	96
Strategi Energi Berbasis Ekosistem dan Produk Hayati .....	96
Jenis-Jenis <i>Biofuel</i> .....	97
Generasi <i>Biofuel</i> .....	100
Sumber Keanekaragaman Hayati untuk <i>Biofuel</i> .....	104
Model Produksi dan Sistem Energi Berbasis Keanekaragaman Hayati.....	111
Feedstock Management: Panen, Kultivasi, dan Pengolahan Biomassa.....	112
<i>Life Cycle Assessment (LCA) Biofuel</i> .....	113
Sistem Biogas Komunitas dan Skala Industri.....	114
<i>Integrated Farming System (IFS)</i> untuk Energi dan Pangan ....	115
<i>Teknologi Waste-to-Energy (WtE)</i> dan Ekonomi Sirkular .....	115

<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>118</b>
<b>BAB 8.....</b>	<b>127</b>
<b>Industri Lingkungan I: Bioremediasi dalam Industri</b>	<b>127</b>
8.1 Sejarah dan Perkembangan Bioremediasi.....	127
8.2 Prinsip Bioremediasi.....	128
8.3 Jenis-jenis Bioremediasi .....	130
8.4 Aplikasi Bioremediasi dalam Industri .....	134
8.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Penggunaan Teknologi Bioremediasi .....	135
8.6 Keunggulan, Kelemahan, dan Tantangan Bioremediasi dalam Industri.....	137
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>139</b>
<b>BAB 9.....</b>	<b>148</b>
<b>Industri Lingkungan II: Analisis Dampak Lingkungan dalam Biologi.....</b>	<b>148</b>
Komponen Lingkungan dalam Analisis Dampak .....	150
Hubungan Komponen Biotik Abiotik dalam Penentuan Dampak .....	152
Metode Identifikasi Dampak Biologis dalam Kajian AMDAL	153
Metode Deskriptif dan Strukturisasi Dampak .....	154
Metode Kuantitatif dan Analisis Ilmiah .....	155
Metode Spasial dan Pemetaan Habitat .....	156
Regulasi dan Kebijakan Lingkungan.....	158
Regulasi AMDAL di Indonesia.....	159
Peran Kelembagaan dan Keterlibatan Masyarakat .....	160
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>161</b>
<b>BAB 10.....</b>	<b>163</b>
<b>Industri Material: Pemanfaatan Biomaterial .....</b>	<b>163</b>
Definisi, Klasifikasi, dan Prinsip Desain Biomaterial .....	164
Proses Produksi dan Pengolahan Biomaterial .....	167
Proses Ekstraksi Biomaterial .....	168
Proses Modifikasi kimia Biomaterial .....	169
Polimerisasi dan Sintetis Biomaterial .....	170
Proses Implementasi Produk Biomaterial.....	171
Aplikasi Biomaterial di Berbagai Sektor Industri.....	173

Keunggulan dan Tantangan .....	176
Prospek Masa Depan Bioindustri Material.....	177
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>180</b>
<b>BAB 11.....</b>	<b>184</b>
<b>Industri Pertanian: Perlindungan Tanaman dalam Biologi .....</b>	<b>184</b>
Dasar-Dasar Biologi Tanaman dalam Industri Pertanian .....	185
Bioteknologi dan Pertanian Berkelanjutan dalam Pelindungan Tanaman .....	188
Bioteknologi Agrikultur dalam Pengembangan dan Pelindungan Tanaman .....	188
Pertanian Berkelanjutan Berbasis Kearifan Lokal Masyarakat dalam Mendukung Pelindungan Tanaman .....	190
Flora Agroforestry Kopi Sebagai Kawasan Konservasi Berbasis Pertanian Lokal.....	191
Industri Agrowisata Sebagai Pendukung Pemuliaan Tanaman dan Pelindungan Tanaman .....	197
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>200</b>
<b>BAB 12.....</b>	<b>204</b>
<b>Industri Digital: Pemanfaatan Biokomputasi dan Bioinformatika sebagai Analisis Industri.....</b>	<b>204</b>
Pengertian Biokomputasi dan Bioinformatika.....	205
Manfaat Biokomputasi dan Bioinformatika .....	206
Metode Biokomputasi dan Bioinformatika .....	209
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>219</b>
<b>BAB 13.....</b>	<b>221</b>
<b>Bidang Keamanan: Bahaya Biologi dalam Lingkungan Industri .....</b>	<b>221</b>
Definisi dan Klasifikasi Ancaman Biologi .....	222
Definisi dan konteks bahaya biologi.....	223
Sumber utama agen biologi dalam industri .....	224
Klasifikasi risiko biologi ( <i>Biosafety Levels – BLS</i> ).....	225
Analisis Risiko dan Skema Dampak Industri .....	227
Kerangka penilaian risiko Biologi ( <i>Biological Risk Assessment – BRA</i> ).....	227

Dampak Bahaya biologi pada sektor industri .....	229
Studi kasus .....	230
Sistem keselamatan biologi ( <i>Biosafety</i> ) dan Keamanan Biologi ( <i>Biosecurity</i> ) .....	231
Strategi keselamatan biologi ( <i>biosafety</i> ) untuk perlindungan pekerja .....	231
Strategi keamanan biologi ( <i>Biosecurity</i> ) untuk perlindungan aset .....	232
Peran bioteknologi dalam mitigasi dan deteksi .....	233
Kesimpulan Bidang Keamanan: Bahaya Biologi dalam Lingkungan Industri .....	233
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>235</b>
<b>BAB 14.....</b>	<b>238</b>
<b>Industri Wisata: Pemanfaatan Biologi dalam Wisata Berkelanjutan.....</b>	<b>238</b>
Pariwisata sebagai Industri mendukung SDGs .....	238
Peran Penting Biologi di Industri Pariwisata Berkelanjutan ....	241
Studi Ekologi untuk Perencanaan Pengelolaan Pariwisata .....	243
Pariwisata Berkelanjutan: Ekowisata .....	245
Perbedaan Ekowisata dan Pariwisata Massal .....	245
Kontribusi Ekowisata pada Edukasi dan Konservasi .....	249
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>251</b>
<b>BAB 15.....</b>	<b>254</b>
<b>Perkembangan Pendidikan Biologi di Era Industri 5.0 .....</b>	<b>254</b>
Tantangan Pendidikan Biologi Tradisional .....	256
Fondasi Konseptual Biologi Digital .....	259
Kurikulum Biologi Berbasis Kompetensi Digital.....	260
Pemanfaatan <i>Virtual Reality</i> (VR) dan <i>Augmented Reality</i> (AR) .....	263
Integrasi <i>Artificial Intelligence</i> (AI) dalam Pembelajaran Biologi .....	266
Penggunaan AI dalam Analisis Citra Mikroskopis dan Identifikasi Spesies .....	266
Contoh Kasus Implementasi AI di Pendidikan Biologi .....	267

Bioinformatika Sebagai Keterampilan Inti .....	268
Bagaimana mekanisme penggunaan BLAST dalam praktikum? .....	269
Pemanfaatan Docking Molekuler dan Skrining Virtual Pada Keilmuan Farmasi.....	270
<i>Citizen Science</i> digital semakin berkembang sebagai bentuk partisipasi masyarakat dalam pemantauan lingkungan.....	278
Metode Penilaian Proyek Berbasis Data Untuk Mengukur dan Memecahkan Permasalahan yang Kompleks.....	280
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>283</b>
<b>PROFIL PENULIS .....</b>	<b>286</b>

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Representasi skematis produksi kimia mikroba dari sumber daya terbarukan .....	5
Gambar 1.2. Dogma Sentral Biologi Molekuler.....	7
Gambar 2.1 Contoh produk bioindustri berbasis bakteri yang berkelanjutan.....	17
Gambar 2.2 Skema rekayasa dan optimasi <i>microbial cell factory</i> .....	24
Gambar 4.1. Proses pembuatan obat hasil menggunakan teknologi DNA rekombinan.....	51
Gambar 5.1 Tangan terinfeksi virus cacar <i>cowpox</i> .....	59
Gambar 5.2 Struktur antibodi secara umum.....	62
Gambar 5.3. Tahapan terbentuknya antibodi dalam imunitas humoral. Abs: antibodi.....	63
Gambar 5.5 Tahap desain vaksin pada jenis <i>sub unit vaccine</i> (1-5) dan keterlibatannya dalam respon imun humoral yang dapat mengaktifasi pembentukan antibodi dalam tubuh inang atau manusia. Protein yang terisolasi (pada tahap 5) dikenali sebagai antigen (kandidat vaksin). .....	67
Gambar 6.2 Intervensi bioteknologi dalam ketahanan pangan.....	81
Gambar 8.1 <i>Biosparging</i> untuk tanah yang terkontaminasi hidrokarbon minyak bumi .....	132
Gambar 8.2. <i>Landfarming</i> untuk bioremediasi tanah yang terkontaminasi.....	133
Gambar 9.1 Life Cycle Assessment (LCA).....	154
Gambar 10.1. Aplikasi Biologi pada Industri Biomaterial. Keterangan: (a) biomaterial, (b) biomekanik dan mekanobiologi, dan (c) biofibrikasi .....	173
Gambar 11.1 Rekayasa Genetik Pada Tanaman.....	189
Gambar 11.2 Persebaran Nangka ( <i>Artocarpus heterophyllus</i> ) .....	192
Gambar 11.3 Persebaran Mahoni ( <i>Swietenia macrophylla</i> ) .....	193
Gambar 11.4 Persebaran Asam Jawa ( <i>Tamarindus indica</i> ).....	194

Gambar 11.5 Persebaran Lamtoro ( <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam) de Wit) .....	195
Gambar 11.6 Persebaran Durian ( <i>Durio Zibethinus</i> ).....	196
Gambar 11.7 Persebaran Pohon Secang ( <i>Biancaea sappan</i> ).....	197
Gambar 11.8 Pertanian Agroforestri Kopi Sebagai Wisata Edukasi	199
Gambar 13.1 Contoh gambar .....	226
Gambar 14. 1 Rantai nilai pariwisata dan SDGs .....	240
Gambar 14.2. Menyusuri alam dengan tetap memperhatikan etika lingkungan adalah cara menjaga kelestarian alam.....	246

# DAFTAR TABEL

Tabel 6.1. Produk hasil bioteknologi konvensional .....	79
Tabel 7.1. Perbandingan Bahan Baku <i>Biofuel</i> Generasi Pertama ..	101
Tabel 10.1. Definisi dan desain biomaterial .....	167
Tabel 12.1. Persamaan dan perbedaan Biokomputasi dan Bioinformatika .....	209
Tabel 13.1. <i>Biosafety</i> Levels .....	226
Tabel 14.1 Pelaksanaan Studi Ekologi dalam Perencanaan pariwisata Berkelanjutan .....	244
Tabel 14. 2. Perbedaan Antara Ekowisata dan Pariwisata Massal ...	247
Tabel 15.1 Rangkuman data miskONSEPSI umum pada genetika molekuler dari studi terpilih. Data ini diambil dari observasi 100-200 siswa per studi, menyoroti pola nasional di Indonesia.....	258

# **BAB 1**

## **Sejarah Perkembangan Ilmu Biologi pada Sektor Industri**

**Yusuf Taufik Hidayat**

Perjalanan ilmu biologi sebagai fondasi bagi berbagai inovasi industri merupakan kisah panjang yang berawal dari praktik-praktik sederhana manusia purba hingga lahirnya teknologi penyuntingan genom modern. Sejak masa Neolitikum, sekitar 12.000 hingga 4.000 SM, manusia telah memanfaatkan prinsip-prinsip biologis dasar melalui domestikasi tanaman dan praktik fermentasi tradisional. Hal ini dilakukan meskipun belum memahami konsep mikroorganisme yang bekerja di baliknya. Sejumlah penelitian berkaitan dengan arkeogenetik dan arkeobotani dapat memperkuat bukti bahwa proses-proses awal tersebut menjadi landasan penting bagi perkembangan ilmu biologi di masa kini (Fuller, 2023).

Sejarah biologi dalam sektor industri menunjukkan perjalanan panjang dari fermentasi tradisional hingga teknologi biomanufaktur modern. Temuan awal dunia mikroba memicu pemahaman ilmiah yang kemudian menjadi dasar optimasi proses industri berbasis mikroorganisme (FAO, 2021). Penemuan mikroorganisme oleh Leeuwenhoek dan penguatan teori mikroba oleh Pasteur menjadi tonggak penting dalam pemahaman proses biologis yang mendasari industri (Pelczar & Chan, 2008). Revolusi biologi molekuler dan rekayasa genetika pada abad ke-20 mendorong lahirnya industri bioteknologi modern yang semakin terintegrasi dengan data biologis skala besar (Campbell *et al.*, 2018).

Sepanjang perjalanan peradaban, manusia terus berupaya memahami alam secara mendalam, serta mengendalikan lingkungan

dan organisme hidup untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Berbagai pendekatan tradisional yang memanfaatkan proses biologis telah diterapkan sejak masa kuno. Rangkaian perkembangan berikut ini menunjukkan bahwa biologi bukan hanya ilmu yang mempelajari kehidupan, tetapi juga motor penggerak kemajuan industri. Dari fermentasi kuno hingga teknologi genom modern, biologi telah membentuk cara manusia memproduksi pangan, obat, energi, dan berbagai bahan hayati lainnya, serta akan terus menjadi pilar utama inovasi industri pada masa mendatang.

## **12.000-4.000 SM — Masa Neolitikum: Awal Domestikasi Tanaman dan Kemunculan Fermentasi Tradisional**

Pada periode Neolitikum, manusia mulai mengalami peralihan penting dari pola hidup berburu dan mengumpulkan menuju sistem budidaya dan pengelolaan tanaman secara terstruktur. Temuan arkeologis, sebagaimana dijelaskan oleh Zeder (2011), menunjukkan bahwa proses domestikasi tanaman tidak hanya mengubah pola produksi pangan, tetapi juga memunculkan praktik fermentasi awal, seperti pembuatan roti, bir, dan minuman beralkohol tradisional. Aktivitas ini menjadi indikasi awal bahwa manusia telah memanfaatkan ilmu biologi untuk mengolah, mengawetkan, dan meningkatkan kualitas bahan pangan.

## **Abad ke-17 (1670-an) — Penemuan Mikroorganisme oleh Antonie van Leeuwenhoek**

Pada dekade 1670-an, Antonie van Leeuwenhoek, yang kemudian dikenal sebagai *Father of Microbiology* atau “Bapak Mikrobiologi”, melakukan pengamatan revolusioner terhadap makhluk hidup berukuran sangat kecil yang ia sebut sebagai “animalcules”. Melalui lensa mikroskop sederhana yang ia rakit sendiri, Leeuwenhoek berhasil mengungkap keberadaan dunia mikroorganisme yang sebelumnya tidak pernah terbayangkan. Penemuan ini menjadi tonggak penting dalam sejarah biologi, karena membuka jalan bagi pemahaman mengenai keragaman mikroba, serta perannya dalam berbagai proses alam. Temuan tersebut kelak menjadi dasar bagi pengembangan penerapan

mikroorganisme dalam sektor industri, termasuk pada fermentasi, pengolahan pangan, produksi enzim, dan berbagai bioproses modern. Dengan demikian, kontribusi Leeuwenhoek tidak hanya memperluas horizon ilmu pengetahuan, tetapi juga memberikan fondasi bagi lahirnya teknologi industri berbasis mikrobiologi (Kutschera, 2023).

### **Abad ke-19 (1850-1890) — Louis Pasteur, Teori Mikroba, dan Fondasi Ilmiah Fermentasi**

Pada paruh kedua abad ke-19, Louis Pasteur memberikan kontribusi mendasar terhadap ilmu biologi melalui pengembangan teori mikroba/kuman (*germ theory*), serta penjelasan ilmiah mengenai proses fermentasi. Dalam berbagai eksperimennya, Pasteur menunjukkan bahwa mikroorganisme merupakan penyebab utama fermentasi dan pembusukan bahan organik. Temuan ini tidak hanya menepis anggapan lama tentang *spontaneous generation*, tetapi juga mengukuhkan bahwa aktivitas mikroba dapat dikendalikan untuk menghasilkan produk yang lebih aman dan berkualitas.

Pemahaman ilmiah tersebut kemudian melahirkan inovasi penting dalam industri, seperti pasteurisasi untuk menekan pertumbuhan mikroba merugikan, serta penggunaan kultur murni dalam pengolahan makanan dan minuman guna memastikan konsistensi dan keamanan produk. Konsep-konsep ini menjadi landasan bagi perkembangan teknik bioproses industri, yang memanfaatkan mikroorganisme secara terarah untuk produksi pangan, minuman fermentasi, enzim, dan berbagai bahan biologis lain. Dengan demikian, karya Pasteur menandai tahap transformasional dalam hubungan antara mikrobiologi dan teknologi industri modern (Cavaillon & Legout, 2022).

### **Akhir Abad ke-19 (1890-an) — Enzim Mikroba dan Awal Komersialisasi Produk Berbasis Biokatalis**

Memasuki dekade 1890-an, pemanfaatan mikroorganisme mengalami perkembangan signifikan dengan mulai dikenalnya enzim mikroba sebagai agen biokatalis yang memiliki nilai industri tinggi. Salah satu tonggak penting pada masa ini adalah keberhasilan Jokichi Takamine dalam mengisolasi dan mengkomersialkan *takadiastase*,

yaitu enzim amilase yang berasal dari *Aspergillus oryzae*. Produk ini kemudian digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi industri, khususnya dalam pengolahan pangan, pembuatan sirup, serta proses-proses yang membutuhkan pemecahan pati.

Menurut Gurung *et al.* (2013), keberhasilan Takamine menandai pergeseran besar dari praktik bioteknologi tradisional, yang terutama mengandalkan fermentasi alami, menuju era produk bioteknis komersial yang dapat diproduksi, distandardisasi, dan diaplikasikan secara terukur. Pemanfaatan enzim mikroba ini menunjukkan potensi besar biokatalis dalam meningkatkan efisiensi proses industri, mengurangi kebutuhan energi, serta memungkinkan produksi bahan pangan, obat, dan senyawa bioaktif secara lebih terkendali. Langkah ini juga menjadi fondasi bagi perkembangan industri enzim modern yang kini menjadi pilar penting dalam berbagai sektor, mulai dari makanan, farmasi, hingga bioteknologi lingkungan.

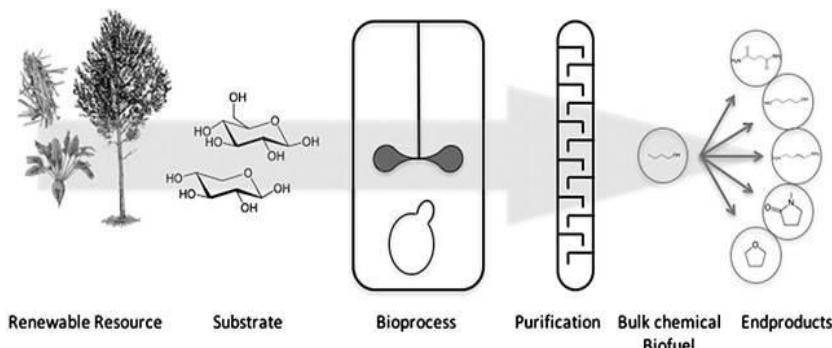
### **Awal Abad ke-20 (1916-1919) — Fermentasi Industri Berskala Besar dan Lahirnya Istilah “Bioteknologi”**

Pada dekade awal abad ke-20, dunia industri memasuki fase baru dalam pemanfaatan proses biologis melalui penerapan fermentasi berskala besar untuk produksi bahan kimia. Salah satu inovasi paling berpengaruh pada masa ini adalah pengembangan proses ABE (Aseton-Butanol-Etanol) yang menggunakan bakteri *Clostridium* untuk menghasilkan pelarut industri. Teknologi ini menjadi sangat penting selama Perang Dunia I, terutama karena aseton diperlukan dalam pembuatan bahan peledak. Keberhasilan produksi ABE menjadi contoh awal dari bioproduksi industri modern, dengan mikroorganisme digunakan secara sistematis dalam sistem reaktor terkontrol untuk menghasilkan senyawa bernilai komersial tinggi.

Berdasarkan artikel peneliti asal Austria Sauer (2016), sekitar lima dekade setelah perkembangan, proses Weizmann beserta turunan teknologinya pada era modern kembali memperoleh perhatian dan signifikansi yang besar. Kebangkitan ini didorong terutama oleh tuntutan global akan keberlanjutan, yaitu upaya untuk beralih dari ketergantungan pada bahan berbasis minyak bumi menuju sumber daya

terbarukan yang mudah diperoleh, sekaligus menurunkan jejak karbon dan meminimalkan penggunaan bahan kimia berbahaya.

Fermentasi mikroba untuk produksi butanol kini mulai terintegrasi ke dalam desain biorafineri modern. Gambar 1.1 menyajikan skema umum proses produksi bahan kimia berbasis mikroba dalam sistem biorafineri. Sumber daya terbarukan, baik yang berasal dari biomassa maupun limbah organik, diolah menjadi aliran substrat yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme. Melalui bioproses, substrat tersebut kemudian dikonversi menjadi suatu produk target. Oleh karena itu, edisi tematik ini tidak hanya menyoroti aspek mikrobiologi, tetapi juga seluruh tahapan dalam rantai proses produksi. Dengan demikian, periode 1916-1919 tidak hanya menandai kemajuan teknologi fermentasi, tetapi juga menjadi fondasi konseptual bagi perkembangan bioteknologi modern yang berkembang pesat pada abad berikutnya.



Sumber: Sauer (2016)

**Gambar 1.1. Representasi skematis produksi kimia mikroba dari sumber daya terbarukan**

## 1928-1940-an — Revolusi Antibiotik dan Lahirnya Produksi Farmasi Berskala Industri

Rentang waktu antara akhir 1920-an hingga dekade 1940-an merupakan salah satu tonggak paling monumental dalam sejarah biologi modern dan perkembangan industri farmasi. Pada tahun 1928, Alexander Fleming secara tidak sengaja menemukan penisilin, ketika ia mengamati bahwa *Penicillium notatum* mampu menghambat

pertumbuhan bakteri patogen. Penemuan ini menjadi titik awal era antibiotik. Bagaimanapun, pemanfaatan klinis dan industri baru benar-benar berlangsung setelah Howard Florey, Ernst Chain, dan timnya berhasil mengembangkan metode produksi penisilin dalam jumlah besar menjelang dan selama Perang Dunia II. Kerja sama antara Amerika Serikat-Inggris Raya dalam memproduksi penisilin yang belum pernah terjadi sebelumnya, berjalan dengan sangat sukses pada tahun 1943. Keberhasilan ini membayangi upaya untuk memproduksi penisilin selama Perang Dunia II di Eropa, khususnya di Belanda. Informasi tentang upaya ini, yang hanya tersedia dalam 10-15 tahun terakhir, memberikan wawasan baru tentang kisah antibiotik pertama (Gaynes, 2017).

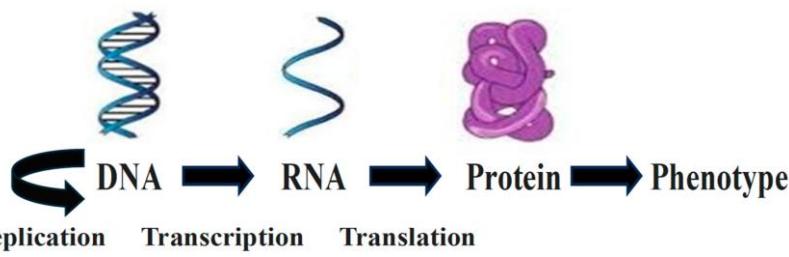
Keberhasilan produksi massal penisilin bukan hanya menyelamatkan ribuan nyawa di medan perang, tetapi juga menandai transformasi mendasar sektor kesehatan yang menjadi industri biomedis berbasis mikroorganisme. Produksi antibiotik, vaksin, dan berbagai agen terapeutik lainnya mulai dilakukan melalui pendekatan bioproses terstandar, yang kemudian berkembang menjadi industri farmasi modern. Periode ini menjadi fondasi bagi berdirinya bioteknologi medis sebagai cabang industri yang strategis, serta memperkuat peran mikroorganisme sebagai komponen utama dalam pengembangan obat-obatan dan intervensi terapeutik berskala global.

## **1953-1970-an — Fondasi Molekul Genetik dan Lahirnya Metode Biologi Molekuler**

Penemuan struktur heliks ganda DNA oleh James Watson dan Francis Crick pada tahun 1953 merupakan transisi krusial dalam ilmu biologi. Periode ini menandai dimulainya era biologi molekuler yang memungkinkan pemahaman mekanisme pewarisan sifat secara molekuler. Seiring perkembangan dekade 1960 hingga 1970-an, para ilmuwan memperkuat fondasi ilmiah ini dengan ditemukannya enzim restriksi, ligasi, plasmid, dan sistem replikasi gen. Rekayasa genetik pun mulai menjadi kenyataan. Puncaknya, pada tahun 1973, Stanley Cohen dan Herbert Boyer berhasil menunjukkan rekombinasi DNA (DNA rekombinan) yang dapat direplikasi dalam sel hidup, yang

menandai era awal rekayasa genetika industri, dengan aplikasi awal pada produksi protein terapeutik seperti insulin. Lebih lanjut, kajian biologi sintetis terbaru menelusuri bagaimana paradigma rekayasa genetika awal telah berevolusi menjadi desain sirkuit genetik modular dan sistem sel yang direkayasa secara presisi.

Menurut Haseltine & Patarca (2024), kerangka pemahaman dalam penelitiannya dapat dirumuskan dengan lebih komprehensif dalam Dogma Sentral Biologi Molekuler yang dikemukakan oleh Francis Crick. Dogma ini menjelaskan alur dasar, berurutan, dan tidak dapat diputarbalikkan dari arus informasi genetik dalam sistem kehidupan. Informasi yang tersimpan dalam DNA ditranskripsi menjadi RNA, kemudian diterjemahkan menjadi protein. Protein inilah yang menentukan fenotipe suatu organisme, yang meliputi struktur, fungsi biologis, serta berbagai sinyal yang mengatur aktivitas seluler maupun organisme secara keseluruhan (Gambar 1.2).



Sumber: Haseltine & Patarca (2024)

**Gambar 1.2. Dogma Sentral Biologi Molekuler**

### **1975-1985 — Lahirnya Antibodi Monoklonal, Kemajuan Kultur Sel, dan Era Baru Bioproduk Terapeutik**

Pada rentang tahun 1975 hingga pertengahan 1980-an, biologi industri memasuki fase transformasi besar melalui kemajuan teknologi kultur sel dan rekayasa imunologi. Tonggak penting dalam periode ini ditandai oleh karya Georges Köhler dan César Milstein (1975), yang berhasil mengembangkan teknik produksi antibodi monoklonal melalui metode hibridoma. Teknik ini memadukan sel limfosit penghasil antibodi dengan sel myeloma yang bersifat abadi, sehingga

menghasilkan garis sel hibrida yang mampu memproduksi antibodi dengan spesifitas tunggal, stabil, dan dalam jumlah besar. Inovasi tersebut menjadi fondasi bagi lahirnya industri biologi modern yang berfokus pada diagnostik, terapi imun, dan pengembangan bioproduk berbasis antibodi, termasuk antibodi terapeutik generasi awal yang akhirnya berkembang menjadi *therapeutic monoclonal antibodies* yang saat ini digunakan secara luas.

Selain itu, terobosan lain yang mendorong percepatan perkembangan bioteknologi industri adalah penemuan metode *Polymerase Chain Reaction* (PCR) oleh Kary Mullis pada tahun 1983. PCR merevolusi analisis genetik karena memungkinkan penggandaan fragmen DNA secara cepat, presisi, dan efisien. Teknologi ini tidak hanya mempercepat penelitian genetika, tetapi juga menjadi pendorong utama dalam produksi biomolekul, diagnostik molekuler, kloning gen, rekayasa protein, serta bioproses industri yang berbasis manipulasi DNA. Secara bersamaan, inovasi produksi antibodi monoklonal dan munculnya teknologi PCR membentuk kerangka dasar bagi bioteknologi modern, memperkuat hubungan antara biologi molekuler, kultur sel, dan industri farmasi dalam menghasilkan produk terapeutik generasi baru.

### **1976-1980-an — Kelahiran Industri Bioteknologi Modern: Perusahaan Pionir dan Komersialisasi Produk Rekombinan**

Periode sejak pertengahan 1970-an hingga awal 1980-an merupakan titik balik dalam sejarah biologi industri. Hal ini ditandai oleh lahirnya teknologi DNA rekombinan yang dipelopori oleh Herbert W. Boyer dan Stanley N. Cohen. Melalui inovasi fundamental ini, mereka membuka jalan bagi manipulasi genetik yang terarah, yakni kemampuan untuk memotong, menyambung, serta menggabungkan DNA dari organisme yang berbeda dengan presisi tinggi. Terobosan tersebut menjadi fondasi bagi kemunculan sektor industri baru, yang kemudian dikenal sebagai industri bioteknologi modern. Teknologi DNA rekombinan yang dikembangkan oleh Boyer dan Cohen terbukti menjadi titik awal industri biofarmasi. Teknologi ini memunculkan

platform produksi insulin rekombinan dan hormon pertumbuhan manusia yang kemudian menjadi standar global (Dunnen, 2022).

Salah satu pencapaian paling berpengaruh adalah berdirinya Genentech pada tahun 1976, yang menjadi perusahaan bioteknologi komersial pertama di dunia. Produksi insulin rekombinan menjadi tonggak sejarah karena menunjukkan bahwa organisme mikroba melalui rekayasa genetika dapat digunakan untuk menghasilkan protein manusia secara aman, efisien, dan dalam skala industri. Perkembangan lebih lanjut menunjukkan bahwa model bisnis bioteknologi generasi pertama, seperti Genentech, terus memengaruhi struktur industri terapi protein dan antibodi modern (Williams & McCulloch, 2023).

Model bisnis berbasis rekayasa genetik dan produksi protein rekombinan kemudian diadopsi secara global oleh perusahaan bioteknologi lain, sehingga membentuk kerangka kerja bagi industri biofarmasi modern. Pada fase inilah bioteknologi mulai diposisikan sebagai pendorong inovasi dalam kesehatan, kedokteran, serta industri berbasis biologi secara lebih luas.

## **1990-2003 — Era Genom dan Bioinformatika: Revolusi Data Besar untuk Optimasi Proses Biologis dan Industri**

Rentang tahun 1990 hingga 2003 menandai transformasi besar dalam ilmu biologi modern melalui pelaksanaan Proyek Genom Manusia (*Human Genome Project/HGP*). Inisiatif kolaboratif berskala internasional ini untuk pertama kalinya berhasil memetakan urutan lengkap genom manusia. Keberhasilan tersebut tidak hanya memperluas pemahaman ilmiah mengenai struktur dan fungsi gen, tetapi juga memicu percepatan pengembangan berbagai teknologi sekuensing berkapasitas tinggi (*high-throughput sequencing*). Kemajuan Proyek Genom Manusia dan teknologi sekuensing berkapasitas tinggi telah menciptakan ekosistem data biologis berskala besar yang menuntut perkembangan metodologi bioinformatika modern (Johnson & Regev, 2021).

Kemajuan tersebut beriringan dengan lahirnya disiplin bioinformatika, yaitu bidang ilmu yang menggabungkan biologi, ilmu komputer, dan analisis data untuk mengelola, menafsirkan, serta

memanfaatkan informasi genom dalam jumlah besar. Ketersediaan data genetik dalam skala masif memungkinkan ilmuwan mengidentifikasi gen fungsional, meng karakterisasi protein, serta memetakan jalur metabolismik dengan tingkat resolusi yang belum pernah dicapai sebelumnya.

Dalam konteks industri, perkembangan genomika dan bioinformatika menjadi fondasi bagi rekayasa strain mikroba yang lebih efisien, desain jalur metabolismik yang dioptimalkan, serta peningkatan kinerja bioproses. Teknologi ini memungkinkan pemilihan dan modifikasi mikroorganisme untuk produksi pangan, farmasi, *biofuel*, serta berbagai bahan kimia berbasis hayati. Selain itu, kemajuan *machine learning* dan *multi-omics integration* memperkuat kemampuan perusahaan bioteknologi dalam memetakan jaringan metabolismik, serta meningkatkan produktivitas bioproses (Patel & Kumar, 2024). Dengan demikian, era genom tidak hanya memperkaya pengetahuan dasar mengenai kehidupan, tetapi juga memperkuat kemampuan industri untuk merancang sistem biologis yang lebih produktif, berkelanjutan, dan terukur.

## **2000-2015 — Rekayasa Metabolik dan Kebangkitan Industri Bahan Hayati**

Pada periode awal abad ke-21 (2000–2015), teknik rekayasa metabolismik (*metabolic engineering*) semakin diadopsi secara luas untuk merancang mikroorganisme yang mampu menghasilkan bahan kimia, *biofuel*, dan bioplastik dari sumber terbarukan. Bioproses berbasis mikroba dimodifikasi secara genetik dengan strategi yang memaksimalkan aliran metabolismik ke jalur produktif, sehingga meningkatkan produktivitas dan efisiensi ekonomi. Di sisi industri, negara-negara dan perusahaan mulai merumuskan strategi bioekonomi, yaitu model ekonomi yang mengandalkan bahan-bahan biologis sebagai bahan baku utama. Hal ini mendorong investasi besar dalam pengembangan pabrik biokonversi (biorafineri) yang mengubah biomassa dan limbah organik menjadi produk bernilai tinggi secara berkelanjutan.

Kemajuan bioteknologi industri saat ini berlangsung pada era yang ditandai oleh percepatan luar biasa dalam berbagai teknologi kunci yang menjadi fondasi ilmu hayati modern. Beragam pendekatan mutakhir, mulai dari metagenomika, proteomika kuantitatif, rekayasa metabolismik, hingga biologi sintetis, telah membuka peluang baru bagi eksplorasi, pemetaan, dan pemanfaatan sistem biologis dengan tingkat presisi yang belum pernah dicapai sebelumnya. Ketika keempat teknologi tersebut dikombinasikan dengan inovasi pada teknologi fermentasi, bioproses, serta teknik pemurnian hilir (*downstream processing*), sebagaimana dijelaskan oleh Villadsen (2007), maka terbentuklah “mesin pendorong” utama yang akan menjadikan produk dan proses bioteknologi industri semakin efisien, ekonomis, dan kompetitif. Penggabungan teknologi hulu dan hilir ini memungkinkan produksi biomolekul bernilai tinggi melalui jalur yang lebih terkendali dan hemat sumber daya, sehingga memberikan keuntungan strategis bagi sektor industri berbasis hayati.

Berdasarkan buku terbitan OECD yang berjudul *Future Prospects for Industrial Biotechnology* (2011), secara keseluruhan, perkembangan ini menunjukkan bahwa bioteknologi industri menuju masa depan yang ditopang oleh sinergi lintas disiplin. Integrasi ilmu biologi modern, rekayasa metabolismik, biologi sintetis, serta teknik kimia akan mempercepat terciptanya proses produksi biomassa, bioenergi, biokimia, dan bioproduk lain yang lebih ramah lingkungan dan berdaya saing tinggi di pasar global.

## **2012–Sekarang — Era CRISPR, Biologi Sintetis, dan Lahirnya Bioteknologi Industri Generasi Baru**

Sejak diperkenalkannya pemanfaatan sistem CRISPR-Cas sebagai alat penyuntingan genom yang efisien (Doudna & Charpentier, 2014), bidang biologi molekuler memasuki fase transformasi besar. Teknologi ini memungkinkan perubahan materi genetik dilakukan dengan tingkat ketepatan yang sangat tinggi, baik pada mikroorganisme, sel tumbuhan, maupun organisme tingkat tinggi lain yang dimanfaatkan sebagai “pabrik biologis” dalam berbagai proses industri.

Kemajuan tersebut kemudian mendorong berkembangnya biologi sintetik, yaitu disiplin yang menggabungkan rekayasa genetika,

komputasi, dan desain sistem biologis untuk menghasilkan organisme dengan fungsi baru. Melalui pendekatan ini, industri mampu memodifikasi mikroba penghasil enzim spesifik, memproduksi molekul kimia bernilai tambah, hingga mengembangkan sistem biomanufaktur yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berbiaya lebih rendah. Berbagai kajian mutakhir menunjukkan bahwa biologi sintetik menjadi salah satu motor utama pertumbuhan bioteknologi industri pada dekade 2020-an. Perusahaan bioteknologi generasi baru semakin mengandalkan pendekatan ini untuk menurunkan biaya produksi, mengurangi limbah, dan meningkatkan keberlanjutan proses. Kajian strategis industri dalam lima tahun terakhir secara konsisten menunjukkan bahwa biologi sintetis dan CRISPR merupakan pendorong utama pertumbuhan bioteknologi industri global pada 2020-2030. Kedua teknologi tersebut diprediksi akan memperluas spektrum produk berbasis biologi, mempercepat pengembangan bioekonomi, serta mendorong lahirnya rantai pasok industri baru yang berbasis pada rekayasa biologis presisi.

Dengan demikian, periode 2012 hingga sekarang dapat dipandang sebagai fase kemunculan bioteknologi industri generasi baru, yang ditandai oleh integrasi antara penyuntingan gen presisi, rekayasa jalur metabolismik, komputasi biologis, dan desain organisme sintetis. Era ini mempercepat transisi dari proses kimia konvensional menuju proses biologis yang lebih bersih, adaptif, dan berkelanjutan, yang merupakan sebuah tonggak penting dalam sejarah perkembangan ilmu biologi pada sektor industri.

# DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, N. A., Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2018). *Biologi* (Edisi Indonesia). Erlangga.
- Cavaillon, J. M., & Legout, S. (2022). Louis Pasteur: Between myth and reality. *Biomolecules*, 12(4), 596.
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 1258096.
- Dunnen, J. T. (2022). Recombinant DNA and the birth of modern molecular medicine: Historical reflections 50 years later. *Human Genetics*, 141, 517–530.
- FAO. (2021). *Microbial technologies for sustainable food systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fuller, D. (2023). Plant domestication and agricultural ecologies. *Current Biology*, 33(11), R636–R649.
- Gaynes, R. (2017). The discovery of penicillin—New insights after more than 75 years of clinical use. *Emerging Infectious Diseases*, 23(5), 849–853.
- Gurung, N., Ray, S., Bose, S., & Rai, V. (2013). A broader view: Microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond. *BioMed Research International*, 2013, 329121.
- Haseltine, W. A., & Patarca, R. (2024). The RNA revolution in the central molecular biology dogma evolution. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12695.
- Johnson, A. D., & Regev, A. (2021). The future of genomics and computational biology after the Human Genome Project. *Science*, 373(6562), 1468–1473.
- Köhler, G., & Milstein, C. (1975). Continuous cultures of fused cells secreting antibody of predefined specificity. *Nature*, 256(5517), 495–497.

- Kutschera, U. (2023). Antonie van Leeuwenhoek (1632–1723): Master of fleas and Father of microbiology. *Microorganisms*, 11(8), 1994.
- OECD. (2011). *Future prospects for industrial biotechnology*. OECD Publishing.
- Patel, R., & Kumar, V. (2024). AI-integrated bioinformatics for systems biology and synthetic metabolic optimization. *Trends in Biotechnology*, 42(1), 18–30.
- Pelczar, M. J., & Chan, E. C. S. (2008). *Dasar-dasar mikrobiologi* (Edisi Indonesia). UI Press.
- Sauer, M. (2016). Industrial production of acetone and butanol by fermentation—100 years later. *FEMS Microbiology Letters*, 363(13), fnw134.
- Villadsen, J. (2007). Innovative technology to meet the demands of the white biotechnology revolution of chemical production. *Chemical Engineering Science*, 62(24), 6957–6968.
- Williams, M., & McCulloch, J. (2023). How Genentech shaped the modern biopharmaceutical industry: Historical and economic perspectives. *Journal of Industrial Biotechnology*, 18(2), 75–92.
- Zeder, M. A. (2011). The origins of agriculture in the Near East. *Current Anthropology*, 52(S4), S221–S235.

# **BAB 2**

## **Industri Manufaktur I:**

### **Pemanfaatan Bakteri sebagai Kunci Industri**

**Eko Kusumawati**

Pemanfaatan bakteri sebagai kunci industri merupakan fondasi utama bioindustri modern, karena organisme ini mampu mengubah bahan baku murah (seperti limbah pertanian, pangan, dan industri) menjadi produk bernilai tinggi seperti enzim, antibiotik, *biofuel*, bioplastik, dan metabolit farmasi. Berbagai kajian mutakhir menunjukkan bahwa “*microbial bioproducts*” yang dihasilkan bakteri berkontribusi langsung pada pengembangan bioekonomi sirkular, pengurangan emisi karbon, serta efisiensi proses manufaktur di sektor pangan, energi, farmasi, dan lingkungan (Arshad *et al.*, 2025). Dengan pertumbuhan teknologi rekayasa genetika, bioproses, dan digitalisasi (Bioprocessing 4.0), bakteri tidak lagi dipandang sebatas agen fermentasi tradisional, tetapi telah ditransformasikan menjadi “*cell factory*” yang dirancang secara presisi untuk menjawab tantangan ketersediaan energi, ketahanan pangan, pengelolaan limbah, dan kesehatan global (Pandey *et al.*, 2023).

#### **Peran Bakteri dalam Bioindustri Modern**

Bakteri menempati posisi sentral dalam bioindustri modern karena keragamannya yang luar biasa, kemampuan tumbuh cepat, serta kemudahan direkayasa secara genetika untuk memproduksi berbagai bioproduk. Berbagai review terbaru tentang “*microbial bioproducts*” menegaskan bahwa bakteri berperan dalam produksi *biofuel*, bioplastik,

surfaktan biosintetik, asam organik, biokatalis, hingga biofarmasi, yang memasok nilai tambah bagi sektor pangan, energi, kimia, dan kesehatan (Arshad *et al.*, 2025). Dengan demikian, bakteri menjadi “katalis biologis” yang mampu menghubungkan sumber daya hayati dengan rantai pasok industri skala besar.

Keunggulan bakteri dibandingkan sel eukariotik (misalnya khamir atau jamur) antara lain yaitu waktu generasi yang singkat, kebutuhan nutrisi yang relatif sederhana, serta kemungkinan manipulasi genetik yang lebih mudah. Kajian mengenai tren terbaru mikrobiologi industri menyoroti bahwa eksplorasi sumber daya genetik bakteri, baik yang terkultur maupun tidak, membuka peluang ditemukannya enzim dan metabolit baru yang lebih stabil, aktif pada kondisi ekstrem, serta kompatibel dengan proses manufaktur modern (Niyonzima, 2019). Hal ini penting untuk menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan efisiensi proses.

Dalam industri farmasi dan kimia halus, bakteri dimanfaatkan sebagai pabrik biologis untuk memproduksi antibiotik, vitamin, asam amino, enzim industri, serta berbagai molekul bioaktif lain yang sulit disintesis secara kimia (Beneit, 2024). Di sektor pangan, bakteri berperan dalam fermentasi, pembentukan cita rasa, serta perpanjangan umur simpan produk. Di sektor lingkungan dan energi, bakteri digunakan dalam pengolahan limbah cair, bioremediasi polutan, dan konversi biomassa menjadi *biofuel* (Gambar 2.1) (Egorov *et al.*, 2018; Araby & Araby, 2024).



Sumber: Jang *et al.*, 2017

**Gambar 2.1 Contoh produk bioindustri berbasis bakteri yang berkelanjutan**

Kontribusi bakteri terhadap bioekonomi sirkular juga tampak dari kemampuannya memanfaatkan limbah lignoselulosa, limbah organik rumah tangga, dan sisa industri agro sebagai substrat fermentasi. Hal ini mengurangi ketergantungan pada bahan baku fosil dan menurunkan jejak karbon proses industri (Araby & Araby, 2024; Mfon, 2024).

### **Aplikasi Bakteri di Industri Pangan dan Minuman Fermentasi**

Dalam industri pangan dan minuman, bakteri, khususnya kelompok *lactic acid bacteria* (LAB) seperti *Lactobacillus*, *Lactococcus*, dan *Streptococcus*, memegang peran utama pada fermentasi susu, sayuran, daging, dan sereal. Berbagai tinjauan mutakhir menegaskan bahwa LAB tidak hanya berkontribusi pada pembentukan rasa, tekstur, dan aroma, tetapi juga meningkatkan nilai gizi dan umur simpan produk (Aguirre-garcia *et al.*, 2024; Christianah,

2024). Produksi asam laktat selama fermentasi menurunkan pH, menciptakan lingkungan yang tidak ramah bagi mikroba pembusuk dan patogen.

Selain fungsi teknologi, LAB juga berperan penting sebagai agen biopreservasi. Berbagai strain LAB terbukti menghasilkan bakteriosin dan senyawa antimikroba lain yang efektif menekan pertumbuhan *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, serta kapang dan khamir kontaminan pangan (Zapa, 2022; Aguirre-garcia *et al.*, 2024). Konsep “*hurdle technology*” dalam keamanan pangan memanfaatkan kombinasi penurunan pH, kompetisi nutrien, dan produksi senyawa antimikroba oleh LAB untuk memperpanjang masa simpan produk tanpa menambah beban penggunaan bahan pengawet kimia.

Pada aspek kesehatan, produk fermentasi berbasis bakteri seperti yogurt, kefir, susu fermentasi, dan beberapa sayuran fermentasi, diakui sebagai sumber probiotik yang dapat memperbaiki keseimbangan mikrobiota usus, meningkatkan respon imun, dan menurunkan risiko penyakit metabolismik tertentu (Zapa, 2022; Aguirre-garcia *et al.*, 2024). Tren terkini menunjukkan peningkatan minat konsumen terhadap pangan fungsional, sehingga industri berlomba mengembangkan strain bakteri dengan profil probiotik unggul dan klaim kesehatan yang terverifikasi.

Seiring berkembangnya teknologi omik (genomik, proteomik, metabolomik), formulasi kultur starter bakteri untuk pangan fermentasi dapat dirancang lebih presisi. Analisis multi-omik memungkinkan pemilihan strain yang tidak hanya aman (GRAS/QPS), tetapi juga memiliki kemampuan teknologis dan probiotik spesifik, seperti toleransi terhadap asam dan empedu, kemampuan menempel pada epitel usus, serta produksi metabolit bioaktif (Christianah, 2024; Loo *et al.*, 2025). Hal ini memberi peluang bagi pengembangan produk fermentasi yang tidak hanya lezat, tetapi juga mampu mendukung kesehatan konsumen.

## **Bakteri sebagai Produsen Metabolit Bernilai Tinggi dalam Industri Farmasi**

Industri farmasi secara historis sangat bergantung pada bakteri sebagai sumber utama metabolit sekunder bernilai tinggi, seperti antibiotik, antitumor, imunomodulator, dan berbagai enzim terapeutik. Review terbaru menegaskan bahwa lebih dari separuh antibiotik yang digunakan klinis berasal dari mikroba, terutama bakteri filamen seperti *Streptomyces* dan kerabatnya (Egorov *et al.*, 2018; Beneit, 2024). Selain itu, bakteri rekombinan seperti *Escherichia coli* dan *Bacillus subtilis* digunakan secara luas sebagai inang untuk produksi insulin, hormon pertumbuhan, sitokin, dan vaksin.

Kemampuan bakteri melakukan biotransformasi stereospesifik menjadikan mereka sangat menarik sebagai biokatalis dalam sintesis obat. Berbagai kajian menunjukkan bahwa enzim bakteri dapat memodifikasi senyawa prekursor menjadi produk akhir dengan selektivitas tinggi dan limbah kimia yang sedikit, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan sintesis kimia konvensional (Niyonzima, 2019; Zheng *et al.*, 2024). Pendekatan ini sangat relevan untuk produksi obat generik, molekul kimia halus, dan bahan baku farmasi (API) yang memerlukan kemurnian optik tinggi.

Perkembangan bioteknologi dan rekayasa genetika semakin memperluas kapasitas bakteri sebagai pabrik metabolit farmasi. Teknologi *metabolic engineering* dan *systems biology* memungkinkan desain ulang jalur metabolisme bakteri untuk mengalihkan fluks metabolit ke produk target, misalnya meningkatkan produksi asam amino esensial, antibiotik generasi baru, atau molekul antikanker (Joshi *et al.*, 2022). Tinjauan terkini menunjukkan bahwa integrasi data multi-omik dengan model komputasi dapat memprediksi titik kendali metabolismik yang paling efektif untuk dimodifikasi.

Di era CRISPR, pengembangan “*bacterial cell factory*” memasuki fase baru. Sistem CRISPR/Cas9, CRISPRi, dan CRISPRa telah digunakan untuk menonaktifkan gen kompetitor, memperkenalkan jalur biosintesis heterolog, dan mengatur ekspresi gen secara dinamis, sehingga produktivitas dan titer metabolit meningkat signifikan. Selain itu, sistem ini menjadikan bakteri sebagai platform utama produksi obat

dan bioterapeutik yang lebih efektif dan berkelanjutan (Cho *et al.*, 2018; Dudeja *et al.*, 2025).

### **Pemanfaatan Bakteri untuk Pengolahan Limbah dan Bioremediasi**

Bakteri merupakan pemeran utama dalam pengolahan limbah cair domestik dan industri melalui proses bioremediasi. Di instalasi pengolahan air limbah (IPAL), komunitas bakteri aerob dan anaerob seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Nitrosomonas*, dan *Nitrobacter* bertanggung jawab atas degradasi bahan organik, transformasi ammonia menjadi nitrat, serta penghilangan nitrogen, fosfor dan sulfur dari air limbah (Kusumawati *et al.*, 2024; Mishra *et al.*, 2025). Dengan perancangan reaktor yang tepat, bakteri mampu menurunkan beban COD, BOD, dan nutrien hingga memenuhi baku mutu lingkungan.

Di luar IPAL konvensional, bakteri juga digunakan untuk bioremediasi berbagai polutan prioritas, seperti hidrokarbon minyak bumi, pestisida, dan logam berat. Sejumlah studi menunjukkan bahwa strain bakteri tertentu mampu menguraikan hidrokarbon kompleks dan menghasilkan biosurfaktan yang meningkatkan ketersediaan substrat hidrofobik untuk degradasi lebih lanjut (Nyika & Dinka, 2022). Aplikasi ini sangat relevan untuk pemulihan tanah dan air yang tercemar tumpahan minyak dan limbah industri.

Pendekatan teknologi bioremediasi modern banyak mengandalkan teknik imobilisasi sel bakteri pada matriks polimer, membran, atau bahan berpori untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi proses. Review terkini menyoroti bahwa imobilisasi sel memungkinkan kepadatan biomassa tinggi, ketahanan terhadap fluktuasi beban polutan, dan kemudahan regenerasi biokatalis di reaktor (Nyika & Dinka, 2022; Ogundolie *et al.*, 2024). Dengan cara ini, bakteri dapat digunakan berulang kali tanpa kehilangan aktivitas secara drastis, sehingga menurunkan biaya operasional.

Integrasi bioremediasi bakteri dengan teknologi energi terbarukan juga terus dikembangkan, misalnya melalui *microbial fuel cells* (MFC) yang secara simultan mengolah limbah organik dan menghasilkan listrik. Berbagai tinjauan menyatakan bahwa MFC, yang memanfaatkan bakteri elektrogenik, dapat mengubah bahan organik

menjadi arus listrik sambil menurunkan COD limbah (Dakal *et al.*, 2025; Montoya-vallejo *et al.*, 2025; Ojha *et al.*, 2025). Konsep-konsep ini memperkuat posisi bakteri sebagai kunci pengelolaan limbah yang lebih hijau, efisien, dan sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular.

## **Bakteri dalam Industri Pertanian dan Peternakan: Pupuk Hayati dan Probiotik**

Dalam pertanian, bakteri tanah yang dikenal sebagai *plant growth-promoting rhizobacteria* (PGPR), telah banyak dikembangkan sebagai pupuk hayati (*biofertilizer*). PGPR mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme, termasuk fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi fitohormon, serta penekanan patogen tular tanah (Aloo *et al.*, 2022; Khosravi *et al.*, 2024). Review terbaru menegaskan bahwa penggunaan PGPR dapat menurunkan kebutuhan pupuk kimia, memperbaiki kesehatan tanah, dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik maupun abiotik (Herdiyanto *et al.*, 2022).

Berbagai aplikasi lapang menunjukkan bahwa biofertilizer berbasis PGPR mampu meningkatkan hasil panen dan efisiensi penggunaan pupuk pada tanaman pangan dan hortikultura (Aloo *et al.*, 2022). Selain itu, kombinasi PGPR dengan bahan organik lokal (pupuk kandang, kompos, atau limbah pertanian) berpotensi menjadi strategi kunci pertanian berkelanjutan yang sesuai dengan prinsip agroekologi, terutama di negara berkembang yang kaya keanekaragaman hayati mikroba.

Di sektor peternakan, bakteri digunakan sebagai probiotik untuk meningkatkan performa produksi dan kesehatan hewan. Laporan mutakhir menunjukkan bahwa, probiotik (terutama LAB dan *Bacillus*) dapat memperbaiki konversi pakan, meningkatkan pertambahan bobot badan, memperkuat sistem imun, serta menurunkan kejadian diare pada unggas, ruminansia muda, dan babi (Wang *et al.*, 2023; Mia *et al.*, 2024). Pada unggas, review komprehensif melaporkan perbaikan performa produksi, kualitas daging dan telur, serta perbaikan morfologi usus akibat suplementasi probiotik (Halder *et al.*, 2024).

Penggunaan probiotik sebagai alternatif pengganti *antibiotic growth promoter* (AGP) menjadi agenda penting untuk mengurangi risiko resistensi antimikroba (Marian *et al.*, 2025). Studi meta-analisis pada anak sapi pra-sapih, misalnya, menunjukkan bahwa probiotik dapat meningkatkan kinerja pertumbuhan, efisiensi pakan, dan status kesehatan, sehingga berpotensi mengurangi kebutuhan antibiotik terapeutik (Wang *et al.*, 2023). Di masa depan, integrasi pupuk hayati berbasis PGPR dan probiotik ternak berbasis bakteri dalam satu sistem agroindustri diharapkan mampu membentuk rantai pasok pangan yang lebih sehat, efisien, dan berkelanjutan dari hulu ke hilir.

### **Bakteri sebagai Katalis dalam Produksi Energi Terbarukan (*Biofuel* dan *Biogas*)**

Bakteri berperan penting dalam produksi energi terbarukan, terutama melalui fermentasi dan pencernaan anaerob yang menghasilkan bioetanol, biobutanol, biogas (biometana), dan berbagai *biofuel* cair maupun gas lainnya. Review terkini menekankan bahwa konsorsium bakteri fermentatif dan metanogenik dapat mengkonversi biomassa lignoselulosa, limbah industri pangan, maupun limbah organik lainnya menjadi bioenergi yang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti bahan bakar fosil (Araby & Araby, 2024). Pengembangan *biofuel* mikroba dipandang sebagai strategi kunci untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan meningkatkan kemandirian energi.

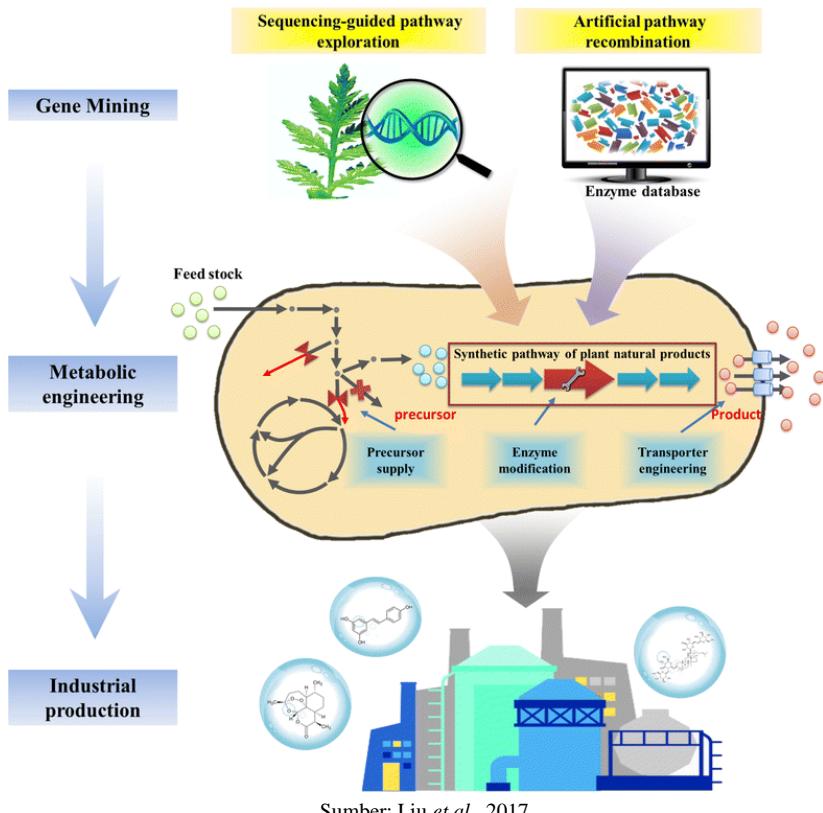
Perkembangan rekayasa metabolismik juga menghasilkan strain bakteri yang dioptimalkan untuk produksi *biofuel* tertentu. Contohnya seperti bakteri penghasil lipid untuk biodiesel atau bakteri yang mampu memfermentasi gula C5 dan C6 dari biomassa lignoselulosa (Chintagunta *et al.*, 2021; Joshi *et al.*, 2022). Tinjauan mutakhir menunjukkan bahwa rekayasa toleransi terhadap produk (misalnya etanol atau butanol) dan stres proses lainnya merupakan faktor kunci untuk meningkatkan produktivitas dan kelayakan ekonomi *biofuel* berbasis bakteri.

Selain fermentasi konvensional, konsep *microbial fuel cells* (MFC) memanfaatkan bakteri elektrogenik untuk mengubah energi kimia substrat organik menjadi listrik secara langsung. Berbagai review

menyatakan bahwa MFC mampu memadukan pengolahan limbah organik dengan produksi listrik skala kecil, sehingga cocok untuk aplikasi terdesentralisasi di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional (Dakal *et al.*, 2025; Naha *et al.*, 2023; Ojha *et al.*, 2025). Meski teknologi ini masih menghadapi kendala efisiensi dan skala, arah pengembangannya menjanjikan sebagai bagian dari portofolio energi terbarukan masa depan. Dari perspektif sistem energi, pengembangan *biofuel* dan bioenergi berbasis bakteri memberikan manfaat untuk diversifikasi sumber energi dan pengelolaan limbah organik secara lebih produktif.

### **Rekayasa Genetika Bakteri untuk Produksi Skala Industri**

Rekayasa genetika menjadikan bakteri sebagai “pabrik sel” (*cell factory*) yang dapat dirancang ulang untuk menghasilkan produk target dengan efisiensi tinggi (Gambar 2.2). Berbagai kajian tentang bioteknologi mikroba menegaskan bahwa rekayasa jalur metabolisme dan regulasi gen pada *E. coli*, *Bacillus*, dan *Corynebacterium* telah sukses meningkatkan produksi asam amino, enzim, vitamin, dan metabolit bermilai tinggi lainnya (Beneit, 2024). Pendekatan ini memungkinkan industri mengalihkan proses sintesis yang sebelumnya tidak ekonomis atau tidak ramah lingkungan menjadi lebih efisien dan berkelanjutan.



Sumber: Liu *et al.*, 2017

**Gambar 2.2 Skema rekayasa dan optimasi *microbial cell factory***

Sistem CRISPR/Cas mempercepat proses modifikasi genom bakteri secara drastis. Review mengenai aplikasi CRISPR/Cas dalam rekayasa metabolismik menunjukkan bahwa teknologi ini dapat digunakan untuk menghapus gen kompetitor, menyisipkan jalur biosintesis baru, serta mengendalikan ekspresi gen secara spesifik, sehingga *yield* dan *titer* produk meningkat secara signifikan (Cho *et al.*, 2018). Contohnya, integrasi jalur solventogenik dan penghapusan gen pembentuk asam pada *Clostridium* telah meningkatkan produksi *biofuel* dan pelarut industri.

Selain modifikasi genom permanen, platform CRISPRi/CRISPRa memungkinkan pengendalian ekspresi gen bakteri secara dinamis tanpa mengubah urutan DNA. Pendekatan ini membuka peluang optimasi proses fermentasi secara *real-time* berdasarkan sinyal sensorik atau data

proses, sehingga produksi dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan atau kebutuhan industri (Cho *et al.*, 2018). Integrasi rekayasa genetika dengan pemodelan bioproses dan kecerdasan buatan memperkuat konsep “*smart biomanufacturing*”.

Bagaimanapun, peningkatan kompleksitas rekayasa genetika bakteri menuntut perhatian serius terhadap aspek stabilitas genetik, keamanan hayati, dan penerimaan sosial. Berbagai studi mengenai *biosafety* di bioteknologi industri menggarisbawahi perlunya desain *safeguard* genetik, penilaian risiko menyeluruh, serta kepatuhan terhadap norma internasional untuk mencegah pelepasan organisme rekayasa genetika yang tidak terkendali ke lingkungan (Garcia *et al.*, 2023). Dengan demikian, keberhasilan rekayasa genetika bakteri di industri tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh tata kelola risiko dan etika yang kuat.

### **Standar Keamanan, Regulasi, dan Etika dalam Pemanfaatan Bakteri Industri**

Pemanfaatan bakteri dalam skala industri harus disertai penerapan standar keamanan hayati (*biosafety*) dan kerangka regulasi yang ketat untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan. Literatur mengenai *biosafety* di bioteknologi industri menegaskan bahwa meskipun banyak strain bakteri industri telah digunakan secara aman selama beberapa dekade, peningkatan kompleksitas rekayasa genetika dan aplikasi lingkungan menimbulkan tantangan baru dalam penilaian risiko (Lensch *et al.*, 2024; Sheina *et al.*, 2017). Oleh karena itu, setiap aplikasi bakteri industri perlu melalui proses evaluasi yang sistematis.

Beberapa panduan internasional, misalnya yang dibahas dalam konferensi OECD tentang penggunaan mikroorganisme untuk tujuan lingkungan, menekankan pentingnya penilaian risiko berbasis ilmu pengetahuan bagi mikroorganisme. Penilaian ini termasuk potensi patogenisitas, toksisitas, kemampuan transfer gen horizontal, serta dampak ekologi jika terlepas ke lingkungan (Publications, 2015). Pendekatan bertahap ini membantu negara-negara menyusun kerangka regulasi yang harmonis untuk mikroorganisme alami maupun rekayasa genetika.

Dari perspektif praktik desain, studi mengenai “*biosafety in industrial biotechnology*” menyoroti pengembangan *genetic safeguards* seperti sistem “*kill-switch*”, ketergantungan nutrien spesifik, atau strategi kontainmen biologis lain yang membatasi kelangsungan hidup bakteri di luar lingkungan proses (Garcia *et al.*, 2023; Lensch *et al.*, 2024). Selain itu, prosedur standar operasional (SOP), klasifikasi tingkat *biosafety* (BSL), dan pelatihan personel menjadi bagian integral dari pengelolaan risiko pada fasilitas produksi mikroba.

Di luar aspek teknis, pemanfaatan bakteri industri juga memunculkan pertanyaan etis terkait akses dan pembagian manfaat sumber daya genetik, potensi *dual-use* (misalnya penyalahgunaan teknologi), serta keadilan distribusi manfaat bioekonomi antara negara maju dan berkembang (Garcia *et al.*, 2023). Dengan demikian, tata kelola etik dan regulatif harus berjalan seiring dengan inovasi teknis, agar pemanfaatan bakteri sebagai kunci industri benar-benar memberikan manfaat secara luas dan bertanggung jawab.

## **Peluang dan Tantangan Bioindustri Berbasis Bakteri di Era Industri 4.0**

Era Industri 4.0 ditandai dengan integrasi digitalisasi, otomatisasi, dan analitik data dalam proses manufaktur, yang termasuk bioproses berbasis bakteri. Konsep *Bioprocessing 4.0* menggambarkan pemanfaatan sensor canggih, pemodelan proses, dan sistem kendali otomatis untuk memonitor dan mengoptimalkan fermentasi bakteri secara *real-time* (Moghadam, 2024). Hal ini memungkinkan peningkatan konsistensi kualitas produk, pengurangan variabilitas *batch*, dan efisiensi pemakaian energi serta bahan baku.

Kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (*machine learning*) semakin banyak diintegrasikan dalam desain dan optimasi bioproses berbasis bakteri. Review terbaru menunjukkan bahwa AI dapat digunakan untuk memprediksi kinerja strain, mengoptimalkan kondisi fermentasi, serta mengembangkan model digital kembar (*digital twin*) bagi bioreaktor (Butean *et al.*, 2025). Pendekatan ini

mempercepat pengembangan proses dari skala laboratorium ke skala industri, serta mengurangi jumlah percobaan fisik yang mahal.

Bagi negara berkembang yang kaya sumber daya hayati seperti Indonesia, bioindustri berbasis bakteri menawarkan peluang besar untuk memanfaatkan limbah biomassa, hasil samping agroindustri, dan keanekaragaman mikroba lokal sebagai basis produk bernilai tambah (Arshad *et al.*, 2025). Penerapan konsep-konsep ini dapat mendorong lahirnya klaster industri baru di bidang pangan fungsional, biofertilizer, bioenergi, dan bioremediasi yang berkontribusi pada pencapaian SDGs dan penguatan daya saing ekspor.

Di sisi lain, transformasi menuju bioindustri 4.0 berbasis bakteri tidak lepas dari tantangan berupa: kebutuhan investasi infrastruktur, ketersediaan SDM lintas disiplin (biologi, teknik, data), kesenjangan regulasi, serta isu penerimaan publik terhadap produk bioteknologi (Pandey *et al.*, 2023). Mengatasi tantangan ini membutuhkan strategi nasional yang terintegrasi antara kebijakan riset, pendidikan, inovasi industri, dan regulasi, sehingga pemanfaatan bakteri sebagai kunci industri dapat berkembang secara inklusif dan berkelanjutan.

# DAFTAR PUSTAKA

- Aguirre-garcia, Y. L., Nery-flores, S. D., Campos-muzquiz, L. G., Flores-gallegos, A. C., Palomo-ligas, L., & Alberto, J. (2024). Lactic Acid Fermentation in the Food Industry and Bio-Preservation of Food. *Fermentation MDPI*, 10(168), 1–18.
- Aloo, B. N., Makumba, B. A., Mbega, E. R., & Shilev, S. (2022). Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. *Frontiers in Plant Science*, September, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448>
- Araby, E., & Araby, R. El. (2024). Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9>
- Arshad, M., Arshad, I., Aslam, H., Sukmawati, D., & Huseynova, A. (2025). Microbial bioproducts: current advances, industrial applications, and future perspectives. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(3), 545–560. <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00247-0>
- Beneit, F. S. (2024). What is the role of microbial biotechnology and genetic engineering in medicine? *Microbiology Open*, 13(March), 1–31. <https://doi.org/10.1002/mbo3.1406>
- Butean, A., Cutean, I., Barbero, R., Enriquez, J., & Matei, A. (2025). A Review of Artificial Intelligence Applications for Biorefineries and Bioprocessing: From Data-Driven Processes to Optimization Strategies and Real-Time Control. *Processes MDPI*, 13(2544), 1–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr13082544>
- Chintagunta, A. D., Zuccaro, G., Kumar, M., & Kumar, S. P. J. (2021). Biodiesel Production From Lignocellulosic Biomass Using Oleaginous Microbes: Prospects for Integrated Biofuel Production. *Frontiers in Microbiology*, 12(August), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.658284>
- Cho, S., Shin, J., & Cho, B. (2018). Applications of CRISPR / Cas System to Bacterial Metabolic Engineering. *International Journal*

- of Molecular Sciences MDPI, 19(1089), 1–19.  
<https://doi.org/10.3390/ijms19041089>
- Christianah, O. I. (2024). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences The Role of Lactic Acid Bacteria in Food Processing , Nutrition and Human Health. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 13(10), 288–296.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.20546/ijcmas.2024.1310.033>
- Dakal, T. C., Singh, N., Kaur, A., Dhillon, P. K., & Bhatankar, J. (2025). New horizons in microbial fuel cell technology: applications , challenges , and prospects. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 18(79), 1–22.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13068-025-02649-y>
- Dudeja, C., Mishra, A., Ali, A., & Singh, P. P. (2025). Microbial Genome Editing with CRISPR – Cas9 : Recent Advances and Emerging Applications Across Sectors. *Fermentation MDPI*, 11(410), 1–20.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation11070410>
- Egorov, A. M., Ulyashova, M. M., & Rubtsova, M. Y. (2018). Bacterial Enzymes and Antibiotic Resistance. *Acta Naturae*, 10(39), 33–48.
- Garcia, E. A., Robaey, Z., & Kampers, L. F. C. (2023). Exploring the Impact of Tensions in Stakeholder Norms on Designing for Value Change: The Case of Biosafety in Industrial Biotechnology. *Science and Engineering Ethics*, 29(2), 1–28.  
<https://doi.org/10.1007/s11948-023-00432-6>
- Halder, N., Sunder, J., De, A. K., Bhattacharya, D., & Joardar, S. N. (2024). Probiotics in poultry: a comprehensive review. *The Journal of Basic and Applied Zoology*.  
<https://doi.org/10.1186/s41936-024-00379-5>
- Herdiyanto, D., Setiawati, R., Azizah, R., & Simarmata, T. (2022). Potential use of PGPR based biofertilizer for improving the nutrient availability in soil and agronomic efficiency of upland rice Potensi pemanfaatan pupuk hayati berbasis PGPR untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara di tanah dan efisiensi agronomis pa. *Jurnal Kultivasi*, 21(3), 293–304.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24198/kultivasi.v21i3.40061>

- Jang, W. D., Hwang, J. H., Kim, H. U., Ryu, J. Y., & Lee, S. Y. (2017). Bacterial cellulose as an example product for sustainable production and consumption. *Microbial Biotechnology*, 10, 1181–1185. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12744>
- Joshi, A., Verma, K. K., Rajput, V. D., Minkina, T., & Arora, J. (2022). Recent advances in metabolic engineering of microorganisms for advancing lignocellulose-derived *biofuels*. *Bioengineered*, 13(4), 8135–8163. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2051856>
- Khosravi, H., Khoshru, B., Fallah, A., & Mitra, D. (2024). Current Research in Microbial Sciences Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: Progress and research prospects. *Current Research in Microbial Sciences*, 7(August), 100268. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100268>
- Kusumawati, E., Retnaningdyah, C., Mustafa, I., & Suharjono. (2024). Screening, identification, and optimization of sulphur-oxidizing bacteria from post-coal mining ponds of different ages in Samarinda, East Kalimantan, Indonesia. *Global Nest Journal*, 26(3). <https://doi.org/10.30955/gnj.005513>
- Lensch, A., Abbas, H., Duwenig, E., Fleischmann, T., Mcmurtry, L., Melton, E., Hjort, C., Sirpa, O. K., Skinner, R., Wyss, M., & Kranenburg, R. Van. (2024). Safety aspects of microorganisms deliberately released into the environment. *EFB Bioeconomy Journal*, 4(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2023.100061>
- Liu, X., Ding, W., & Jiang, H. (2017). Engineering microbial cell factories for the production of plant natural products: from design principles to industrial - scale production. *Microbial Cell Factories*, 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0732-7>
- Loo, J. S., Nur, S., Oslan, H., Anis, N., Mokshin, S., Othman, R., & Amin, Z. (2025). Comprehensive Review of Strategies for Lactic Acid Bacteria Production and Metabolite Enhancement in Probiotic Cultures: Multifunctional Applications in Functional Foods. *Fermentation MDPI*, 11(241), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation11050241>

- Marian, S., Munteanu, C., & Papuc, I. (2025). The Role of Probiotics in Enhancing Animal Health: Mechanisms, Benefits, and Applications in Livestock and Companion Animals. *Animals MDPI*, 15(2986), 1–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ani15202986>
- Mfon, E. I. (2024). Microbial Biotechnology: Application of Bacteria in Various Industrial Processes and Environment Remediation Etido. *International Journal of Development, Sustainability and Environmental Management*, 4(1), 16–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10511013>
- Mia, N., Alam, A., Rahman, M. M., Ali, M. S., & Hashem, M. A. (2024). Probiotics to enhance animal production performance and meat quality: A review. *Meat Research*, 4(2), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.55002/mr.4.2.85>
- Mishra, T., Tiwari, P. B., & Kanchan, S. (2025). Advances in Microbial Bioremediation for Effective Wastewater Treatment. *Water MDPI*, 17(3196), 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w17223196>
- Moghadam, P. Z. (2024). Bioprocessing 4.0: a pragmatic review and future perspectives. *Digital Discovery*, 3(9). <https://doi.org/10.1039/d4dd00127c>
- Montoya-vallejo, C., Carlos, J., Díaz, Q., Yepes, Y. A., & Fernández-morales, F. J. (2025). Microalgal Microbial Fuel Cells: A Comprehensive Review of Mechanisms and Electrochemical Performance. *Applied Sciences MDPI*, 15(3335), 1–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15063335>
- Naha, A., Debroy, R., Sharma, D., Shah, M. P., & Nath, S. (2023). Cleaner and Circular Bioeconomy Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 5(May), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100050>
- Niyonzima, F. N. (2019). Production of Microbial Industrial Enzymes. *Acta Scientific Microbiology*, 2(12), 75–89. <https://doi.org/10.31080/ASMI.2019.02.0434>
- Nyika, J., & Dinka, M. O. (2022). A mini-review on wastewater

- treatment through bioremediation towards enhanced field applications of the technology. *AIMS Environmental Science*, 9(May), 403–431. <https://doi.org/10.3934/environsci.2022025>
- Ogundolie, F. A., Babalola, O. O., & Adetunji, C. O. (2024). A review on bioremediation by microbial immobilization-an effective alternative for wastewater treatment. *AIMS Environmental Science*, 11(September), 918–939. <https://doi.org/10.3934/environsci.2024046>
- Ojha, R., Dash, J., Satpathy, S. S., Ojha, P. C., & Pradhan, D. (2025). A brief review on factors affecting the performance of microbial fuel cell and integration of artificial intelligence. *Discover Sustainability*, 6(702), 1–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s43621-025-01619-6>
- Pandey, K., Pandey, M., Kumar, V., Aggarwal, U., & Singhal, B. (2023). Bioprocessing 4 . 0 in biomanufacturing : paving the way for sustainable bioeconomy. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s43393-023-00206-y>
- Publications, O. (2015). *Biosafety and the Environmental Uses of Microorganisms*. *OECD Publishing*, 1–220. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/9789264213562-en>
- Sheina, N. I., Budanova, E. V., Pivovarov, Y. P., Mjalina, L. I., & Sazonova, L. P. (2017). *Biosafety Assessment of Microbial Strains Used in Biotechnology According to Their Taxonomy*. *International Journal of Biomedicine*, 7(1), 51–56. [https://doi.org/10.21103/Article7\(1\)](https://doi.org/10.21103/Article7(1))
- Wang, L., Sun, H., Gao, H., Xia, Y., Zan, L., & Zhao, C. (2023). A meta - analysis on the effects of probiotics on the performance of pre - weaning dairy calves. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00806-z>
- Zapa, A. (2022). Role of Lactic Acid Bacteria in Food Preservation and Safety. *Foods MDPI*, 11(1283), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods11091283>

Zheng, C., Gao, L., Sun, H., Zhao, X., Gao, Z., & Liu, J. (2024).  
Heliyon Advancements in enzymatic reaction-mediated microbial  
transformation. *Heliyon*, 10(19), e38187.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38187>

## BAB 3

# Fungi sebagai Agen Fermentasi dalam Produk Pangan dan Minuman

**Fatma Aulia Nadiyah**

Fermentasi merupakan salah satu teknologi pangan tertua yang telah digunakan manusia sejak zaman prasejarah untuk mengawetkan dan meningkatkan mutu bahan makanan. Proses ini melibatkan aktivitas mikroorganisme yang mengubah substrat organik menjadi produk metabolit melalui jalur anaerobik maupun aerobik. Di antara berbagai mikroorganisme yang digunakan, fungi—yang mencakup kelompok ragi dan kapang—memiliki peran penting dalam berbagai jenis fermentasi pangan dan minuman. Hal ini dikarenakan kemampuannya menghasilkan enzim-enzim hidrolitik yang efisien (Nout & Kiers, 2005).

Fungi tidak hanya berfungsi sebagai agen biokatalis, tetapi juga sebagai pembentuk karakteristik sensori dan nutrisi dari produk fermentasi. Misalnya, *Saccharomyces cerevisiae* digunakan secara luas dalam pembuatan roti, bir, dan anggur. Spesies ini memiliki kemampuan memfermentasi gula menjadi etanol dan karbon dioksida (Pretorius, 2000).

Selain memberikan manfaat nutrisi dan sensori, fermentasi oleh fungi juga berkontribusi terhadap keamanan pangan dan nilai ekonomi. Produk fermentasi berbasis fungi memiliki masa simpan yang lebih lama, cita rasa khas, serta potensi sebagai sumber senyawa bioaktif seperti antioksidan dan antimikroba (Steinkraus, 1997). Dengan berkembangnya teknologi fermentasi modern dan rekayasa genetika,

pemanfaatan fungi dalam industri pangan semakin luas, mencakup produksi enzim industri, bioetanol, dan pangan fungsional (Gomi, 2019).

Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai karakteristik fungi sebagai agen fermentasi sangat penting dalam pengembangan produk pangan inovatif yang tidak hanya lezat dan bergizi, tetapi juga aman dan berkelanjutan.

## **Sejarah Penggunaan Fungi dalam Fermentasi**

Penggunaan fungi dalam fermentasi telah tercatat sejak ribuan tahun lalu. Di Mesir kuno, ragi digunakan untuk membuat roti dan bir. Di Asia Timur, kapang seperti *Aspergillus oryzae* telah digunakan dalam pembuatan kecap dan miso sejak abad ke-7. Di Indonesia, tempe yang dibuat dengan *Rhizopus oligosporus* telah menjadi makanan pokok sejak abad ke-16. Sejarah ini menunjukkan bahwa fungi bukan hanya agen fermentasi, tetapi juga bagian dari warisan budaya dan tradisi kuliner.

Fermentasi merupakan teknologi pangan yang telah digunakan sejak zaman prasejarah. Bukti arkeologis menunjukkan bahwa praktik fermentasi sudah dikenal sejak 7000 SM di Tiongkok. Minuman beralkohol pada era ini berbasis buah dan madu yang diproduksi secara alami melalui aktivitas mikroorganisme. Ragi yang digunakan untuk membuat roti dan bir di Mesir kuno menandai awal pemanfaatan fungi dalam pengolahan pangan (Steinkraus, 1997).

Di Asia Timur, penggunaan fungi dalam fermentasi berkembang pesat dan menjadi bagian dari tradisi kuliner. Di Jepang, *Aspergillus oryzae* digunakan dalam pembuatan kecap, miso, dan sake. Kapang ini dikenal sebagai “koji mold” dan telah dibudidayakan secara selektif selama berabad-abad karena kemampuannya menghasilkan enzim amilase dan protease yang tinggi. Enzim amilolitik dan proteolitik yang menghidrolisis pati dan protein menjadi senyawa sederhana (Machida *et al.*, 2005).

Di Indonesia, *Rhizopus oligosporus* digunakan dalam pembuatan tempe, makanan fermentasi berbasis kedelai yang kaya protein dan

vitamin B12, serta mengurangi senyawa antinutrisi seperti asam fitat (Nout & Kiers, 2005).

Memasuki era modern, fermentasi yang semula dilakukan secara tradisional mulai dikaji secara ilmiah. Penelitian terhadap fungi seperti *Saccharomyces cerevisiae* membuka jalan bagi pemahaman tentang metabolisme mikroba dan rekayasa genetika. Fungi mulai dimanfaatkan tidak hanya untuk produksi pangan, tetapi juga dalam industri farmasi, bioetanol, dan enzim industri. Genom *Aspergillus oryzae* telah diurutkan untuk memahami potensi bioteknologinya dalam produksi enzim dan senyawa bioaktif (Gomi, 2019).

Sejarah panjang penggunaan fungi dalam fermentasi menunjukkan bahwa mikroorganisme ini tidak hanya berperan dalam produksi pangan, tetapi juga dalam keberlanjutan dan inovasi teknologi. Fermentasi berbasis fungi memungkinkan pemanfaatan limbah pertanian sebagai substrat, memperpanjang masa simpan produk, dan menghasilkan pangan fungsional yang mendukung kesehatan masyarakat. Studi oleh Tamang *et al.* (2016) menunjukkan bahwa fermentasi tradisional berbasis fungi berkontribusi terhadap diversitas mikroba dan ketahanan pangan lokal.

## **Jenis-Jenis Fungi dan Peranannya**

### **a. *Saccharomyces cerevisiae* (Ragi Roti/Ragi Bir)**

Praktik ragi ini mengubah glukosa menjadi etanol dan karbon dioksida. Dalam roti, CO<sub>2</sub> menyebabkan adonan mengembang. Dalam bir dan anggur, etanol menjadi komponen utama. Ragi ini juga digunakan dalam produksi bioetanol sebagai bahan bakar alternatif.

*Saccharomyces cerevisiae*, sering dikenal sebagai ragi roti atau ragi bir, adalah salah satu mikroorganisme yang paling penting dan paling banyak dipelajari dalam bioteknologi pangan dan industri (Boulton & Quain, 2006). Fungi uniseluler ini termasuk dalam filum Ascomycota dan merupakan organisme model eukariotik yang vital dalam penelitian ilmiah (Feldmann, 2012; Goffeau *et al.*, 1996).

Peran utama *S. cerevisiae* didasarkan pada kemampuannya melakukan fermentasi anaerobik. Proses metabolisme anaerobik terjadi ketika gula (seperti glukosa, fruktosa, atau maltosa) dipecah tanpa memerlukan oksigen.

Produk utama dari reaksi ini adalah etanol dan karbon dioksida, yang memberikan peranan krusial dalam berbagai industri, antara lain:

- Industri Pangan (pembuatan roti)  
Karbon dioksida yang dilepaskan selama fermentasi terperangkap dalam jaringan adonan roti, menyebabkan adonan mengembang (*proofing*). Proses ini menciptakan tekstur yang ringan dan berongga (Pramith & Kumar, 2017).
- Industri Minuman Beralkohol (bir dan anggur)  
Etanol yang dihasilkan merupakan komponen utama. Selain itu, produk sampingan fermentasi seperti ester dan alkohol yang tinggi juga berkontribusi pada profil aroma dan rasa yang kompleks (Boulton & Quain, 2006).
- Produksi Bioetanol  
*S. cerevisiae* digunakan secara masif dalam produksi bioetanol sebagai bahan bakar alternatif yang terbarukan. Penelitian terus dikembangkan, termasuk rekayasa metabolismik. Rekayasa ragi dilakukan agar dapat memfermentasi gula yang lebih kompleks (seperti selulosa dan hemiselulosa) untuk meningkatkan efisiensi produksi bioetanol generasi kedua (Balat, 2011; Ostergaard *et al.*, 2000).

### ***b. Aspergillus oryzae***

Kapang jenis ini menghasilkan enzim amilase dan protease yang menghidrolisis pati dan protein. Genomnya telah diteliti secara luas karena potensi bioteknologinya. *Aspergillus oryzae* adalah jenis kapang berfilamen yang memiliki peranan sangat fundamental dalam industri fermentasi di Asia Timur, khususnya Jepang, Tiongkok, dan Korea. Kapang ini dikenal sebagai Koji (*koji-kin*) dan telah digunakan selama ribuan tahun untuk mengawali proses pembuatan bahan makanan penting seperti fermentasi kecap, miso, dan sake.

Kapang ini tidak beracun (*non-toxigenic*) dan sangat efisien dalam menghasilkan serta mensekresikan berbagai macam enzim ekstraseluler dalam jumlah besar (Machida *et al.*, 2205). Kemampuan enzimatik ini merupakan kunci perannya dalam fermentasi pangan. Enzim-enzim yang berperan antara lain:

1. Amilase: *A. oryzae* memproduksi alpha-amilase, glukoamilase, dan enzim lain yang sangat efektif dalam menghidrolisis pati (karbohidrat kompleks) menjadi gula sederhana, terutama glukosa. Gula inilah yang kemudian digunakan oleh ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) untuk fermentasi alkohol.
2. Protease: Kapang ini juga akan enzim protease yang mampu menghidrolisis protein menjadi asam amino. Asam amino ini tidak hanya menjadi nutrisi bagi mikroorganisme lain, tetapi juga berkontribusi langsung pada pembentukan rasa *umami* yang khas pada produk fermentasi.
3. Lipase dan Pektinase: Produksi enzim lain seperti lipase dan pektinase turut memperkaya profil rasa dan tekstur produk akhir.

Aplikasi utama *A. oryzae* melibatkan proses Koji, yaitu menumbuhkan kapang ini pada substrat seperti beras, kedelai, atau jelai. Produk fermentasi yang dihasilkan antara lain:

- Kecap Asin (*Shoyu*): enzim protease memecah protein kedelai, menghasilkan asam amino yang kaya rasa.
- Miso: pasta fermentasi kedelai dan biji-bijian yang rasa gurihnya dibentuk oleh aktivitas enzimatik *A. oryzae*.
- Sake, Mirin, dan Shochu: dalam pembuatan minuman beralkohol Jepang, *A. oryzae* berperan mengubah pati beras menjadi gula, sebelum ragi memulai fermentasi etanol.

#### Potensi Bioteknologi

Genom *A. oryzae* telah diteliti secara luas karena potensi bioteknologinya yang besar (Machida *et al.*, 2205). Genomnya memiliki banyak gen untuk produksi enzim, menjadikannya platform industri yang ideal. Selain untuk pangan, kapang ini juga digunakan dalam produksi enzim komersial (seperti amilase dan protease industri),

serta sebagai inang untuk rekayasa genetika guna memproduksi protein heterolog (Wang *et al.*, 2017).

### c. *Rhizopus oligosporus*

Kapang ini digunakan dalam pembuatan tempe. Enzimnya memecah protein dan lemak, serta meningkatkan ketersediaan zat gizi. Tempe juga mengandung senyawa isoflavon yang bermanfaat bagi kesehatan jantung.

*Rhizopus oligosporus* adalah kapang dari filum Zygomycota yang merupakan mikroorganisme esensial dalam proses fermentasi kacang kedelai menjadi tempe (Hesseltine, 1965). Makanan tradisional Indonesia ini diakui secara global sebagai sumber protein nabati yang sangat baik (Mugditondo *et al.*, 2020). Kapang ini berfungsi sebagai inokulum utama (*laru*), yang menumbuhkan miselium padat berwarna putih untuk mengikat biji kedelai yang telah direbus. Produk tersebut kemudian disebut tempe (Nout & Kiers, 2005).

Peran vital *R. oligosporus* terletak pada kemampuan hidrolitik enzimnya yang tinggi selama proses fermentasi (Hesseltine, 1965). Kapang ini menghasilkan dan mensekresikan beberapa enzim kunci yang mengubah kedelai mentah menjadi produk yang lebih mudah dicerna dan bernilai gizi tinggi. Contoh enzim dan aktivitas metabolismik yang berperan antara lain:

1. Protease: Enzim ini memecah protein kompleks kedelai menjadi peptida pendek dan asam amino bebas (Kiers *et al.*, 2000). Peningkatan asam amino bebas ini tidak hanya memperbaiki rasa (*umami*) tetapi juga meningkatkan daya cerna protein secara signifikan (Nout & Kiers, 2005).
2. Lipase: Enzim lipase menghidrolisis trigliserida menjadi asam-asam lemak bebas (Kiers *et al.*, 2000). Proses ini meningkatkan kandungan asam lemak tak jenuh ganda (PUFA), termasuk asam linoleat, yang bermanfaat bagi kesehatan.
3. Produksi Vitamin: Selain memecah makronutrien, aktivitas fermentasi *R. oligosporus* juga dapat meningkatkan kandungan beberapa vitamin, terutama Vitamin B12 (meskipun biasanya

dihasilkan oleh bakteri kontaminan yang bersimbiosis) dan riboflavin (Nout & Kiers, 2005).

Tempe dikenal sebagai pangan fungsional karena kandungan senyawa bioaktifnya, terutama isoflavan. Kedelai kaya akan isoflavan dalam bentuk glikosida (terikat gula), namun *R. oligosporus* berperan penting dalam meningkatkan bioavailabilitasnya (Wang & Murphy, 1994).

1. Kapang ini menghasilkan enzim beta-glukosidase yang mengubah isoflavan glikosida menjadi bentuk aglikon (seperti daidzein dan genistein) (Wang & Murphy, 1994).
2. Isoflavon aglikon lebih mudah diserap oleh tubuh manusia.
3. Senyawa aktif ini telah dikaitkan dengan berbagai manfaat, termasuk aktivitas antioksidan dan potensinya dalam menurunkan risiko penyakit jantung koroner dengan membantu menurunkan kadar kolesterol LDL (Wang & Murphy, 1994; Mugditondo *et al.*, 2020).

#### ***d. Penicillium camemberti* dan *Penicillium roqueforti***

Kapang ini digunakan dalam keju lunak dan keju biru. Enzim lipase dan protease membentuk aroma dan tekstur yang khas. Keju ini juga mengandung metabolit sekunder seperti roquefortin yang memiliki aktivitas antimikroba.

Dua spesies dari genus *Penicillium* ini adalah agen pematangan (*maturity agents*) yang sangat vital dalam menghasilkan dua kategori keju yang paling ikonik di dunia: keju berkulit putih (*white mold*) dan keju biru (*blue cheese*). Kedua kapang ini telah melalui proses domestikasi yang panjang, menghasilkan strain yang aman dan efisien untuk produksi pangan (Nout & Kiers, 2005).

Peran utama kedua kapang ini adalah memproduksi sejumlah besar enzim ekstraseluler yang berinteraksi dengan komponen keju (lemak dan protein). Enzim-enzim tersebut antara lain:

1. Protease: Enzim protease menghidrolisis kasein (protein utama susu) menjadi peptida dan asam amino bebas. Pada keju lunak seperti Camembert (dihasilkan oleh *P. camemberti*), aktivitas protease di permukaan bergeser ke arah tengah keju,

menghasilkan tekstur yang lembut, *runny*, dan *buttery* (Bars, 1979).

2. Lipase: Enzim lipase memecah lemak susu menjadi asam lemak bebas (Dwivedi & Kinsella, 1974). Pada keju biru seperti Roquefort (dihasilkan oleh *P. roqueforti*), asam lemak bebas ini, terutama asam kaproat dan kaprilat, selanjutnya diubah melalui proses beta-oksidasi oleh kapang menjadi metil keton (seperti 2-heptanon dan 2-nonanon) (Dwivedi & Kinsella, 1974). Senyawa metil keton inilah yang bertanggung jawab atas aroma tajam, pedas, dan khas (*piquant*) dari keju biru (Kinsella & Hwang, 1976).

### **Metabolit Sekunder dan Peran Pelindung**

Kapang-kapang ini juga memproduksi sejumlah metabolit sekunder selama pematangan yang memiliki peran ekologis, termasuk sifat antimikroba:

1. *P. roqueforti* dan Roquefortine C: Kapang ini menghasilkan senyawa alkaloid, terutama Roquefortine C. Senyawa ini diketahui memiliki aktivitas antibakteri terhadap bakteri Gram-positif, yang secara teoritis dapat membantu melindungi keju dari kontaminasi mikroba yang tidak diinginkan selama proses pematangan (Larsen & Knochel, 1997; Vallone *et al.*, 2014). Meskipun Roquefortine C memiliki potensi neurotoksik pada dosis tinggi, kadarnya dalam keju komersial yang matang umumnya sangat rendah dan dianggap aman bagi konsumen (Scott, 1984).

2. *P. camemberti* dan Alkalinitas: *P. camemberti* berkontribusi pada alkalinitas permukaan keju (meningkatkan pH) melalui konsumsi asam laktat dan pelepasan amonia dari degradasi protein, yang kemudian memicu pelunakan dan menghambat pertumbuhan patogen tertentu (Bars, 1979; Nout & Kiers, 2005).

### **Studi Kasus Produk Fermentasi Berbasis Fungi**

#### *a. Tempe*

Tempe adalah produk fermentasi kedelai yang kaya protein dan vitamin B12. Proses fermentasi oleh *Rhizopus oligosporus* mengurangi senyawa antinutrisi seperti asam fitat, meningkatkan ketersediaan mineral seperti zat besi dan kalsium (Nout & Kiers, 2005).

Tempe dikenal kaya akan protein, dengan daya cerna yang lebih tinggi dibandingkan kedelai mentah karena aktivitas enzimatik kapang (Kiers *et al.*, 2000). Selain itu, tempe menjadi sumber yang penting untuk vitamin B kompleks.

Meskipun *R. oligosporus* sendiri tidak memproduksi vitamin 12, keberadaan vitamin penting ini dalam tempe disebabkan oleh aktivitas bakteri simbiotik (seperti spesies *Klebsiella* atau *Citrobacter*) yang tumbuh bersama miselium jamur (Nout & Kiers, 2005). Hal ini menjadikan tempe salah satu sumber vitamin B 12 alami yang dapat diandalkan dalam pola makan berbasis tumbuhan.

Salah satu kontribusi terpenting fermentasi tempe adalah mengurangi atau menghilangkan senyawa yang dapat mengganggu penyerapan zat gizi seperti:

1. Asam Fitat (Phytic Acid): Asam fitat adalah senyawa antinutrisi utama dalam kedelai yang dapat mengikat mineral penting (seperti zat besi, seng, dan kalsium), sehingga menghambat penyerapannya. *R. oligosporus* menghasilkan enzim fitase yang efektif menghidrolisis asam fitat (Lestari & Pato, 2012). Reduksi asam fitat ini secara langsung meningkatkan bioavailabilitas mineral tersebut, sehingga menjadikan mineral dalam tempe lebih mudah diserap oleh tubuh (Barampama & Berset, 1994).

2. Oligosakarida: Kapang juga memecah oligosakarida pemicu flatulensi (seperti raffinose dan stachyose), yang sering menyebabkan masalah pencernaan pada konsumsi kedelai biasa, sehingga tempe lebih mudah diterima oleh usus (Nout & Kiers, 2005).

Tempe, dengan segala keunggulannya, tidak hanya merupakan makanan tradisional, tetapi juga model studi kasus yang menunjukkan bagaimana fermentasi fungi dapat mengubah bahan baku sederhana

menjadi pangan fungsional yang bernilai gizi tinggi dan berpotensi manfaat kesehatan (Mugditondo *et al.*, 2020).

### **b. Sake**

Minuman tradisional Jepang yang dibuat dari beras melalui sinergi antara dua mikroorganisme fungi utama: kapang *Aspergillus oryzae* dan ragi *Saccharomyces cerevisiae*. Proses ini menghasilkan minuman dengan rasa kompleks dan kandungan alkohol sedang.

Sake adalah minuman beralkohol tradisional Jepang yang diproduksi melalui proses fermentasi yang unik dan sangat terstruktur yang dikenal sebagai Fermentasi Paralel Ganda (Multiple Parallel Fermentation/MPF) (Kozaki, 2005).

Proses pembuatan Sake sangat berbeda dari pembuatan bir atau anggur karena dua fungsi biokimia utama—hidrolisis pati dan fermentasi gula—berlangsung secara serentak dalam tangki yang sama. Proses ini menghasilkan efisiensi konversi yang sangat tinggi dan kadar alkohol yang lebih tinggi. Detail prosesnya antara lain:

1. *Koji-Making (A. oryzae)*: Langkah pertama melibatkan penggunaan *A. oryzae* (Koji-kin) untuk menumbuhkan Koji pada sebagian beras yang dikukus. *A. oryzae* mensekresikan enzim hidrolitik kuat, terutama glukoamilase, yang memecah pati beras menjadi glukosa (Kitamoto, 2011). Glukoamilase adalah kunci karena menghasilkan glukosa murni, bukan maltosa, yang berkontribusi pada profil rasa Sake yang unik (Kozaki, 2005).
2. *Moromi Fermentation (S. cerevisiae)*: Beras Koji kemudian dicampur dengan beras yang dikukus, air, dan ragi *S. cerevisiae* (umumnya strain *Kyokai*). Ragi segera memfermentasi glukosa yang tersedia menjadi etanol dan karbon dioksida. Karena proses hidrolisis (oleh *A. oryzae*) dan fermentasi (oleh *S. cerevisiae*) terjadi secara paralel, konsentrasi gula tidak pernah menjadi sangat tinggi, memungkinkan ragi bekerja efisien dan mencapai kadar alkohol yang tinggi (sekitar 18% hingga 20% v/v) (Kitamoto, 2011).

Interaksi sinergis ini menghasilkan minuman dengan rasa kompleks, bersih, dan kadar alkohol sedang hingga tinggi. *S. cerevisiae* dalam lingkungan *moromi* yang kaya asam amino (hasil aktivitas protease *A. oryzae*) juga menghasilkan berbagai metabolit sekunder seperti ester (misalnya, etil asetat, dan isoamil asetat) yang memberikan aroma buah-buahan dan bunga khas pada Sake premium (*Ginjo* dan *Daiginjo*) (Tani *et al.*, 2019). Kualitas Sake sangat bergantung pada manajemen suhu yang hati-hati untuk mengoptimalkan aktivitas *enzimatik* *A. oryzae* dan kinerja fermentasi *S. cerevisiae*.

### **c. Keju Roquefort**

Keju biru adalah keju asal Prancis yang difermentasi oleh *Penicillium roqueforti*. Proses fermentasi menghasilkan aroma tajam dan tekstur lembut. Kandungan metabolit sekunder seperti methyl ketone memberikan karakteristik khas.

Keju Roquefort adalah salah satu keju biru yang paling terkenal dan historis di dunia, dilindungi oleh penunjukan asal (*Appellation d'Origine Protégée* atau AOP) yang mengharuskan pematangannya terjadi di gua-gua alami Roquefort-sur-Soulzon, Prancis (Kinsella & Hwang, 1976). Karakteristik utamanya, yaitu urat biru-kehijauan, tekstur yang lembut, dan aroma yang tajam (pedas), yang sepenuhnya bergantung pada aktivitas kapang *Penicillium roqueforti*.

Fermentasi pada keju biru ini adalah contoh utama lipolisis (pemecahan lemak) yang dikendalikan oleh fungi. *P. roqueforti* disuntikkan ke dalam dadih susu domba, dan selama pematangan, kapang ini melakukan serangkaian transformasi biokimia. Enzim yang berperan antara lain:

1. Lipase: Kapang mensekresikan enzim lipase yang menghidrolisis trigliserida (lemak susu) menjadi gliserol dan asam lemak bebas (Dwivedi & Kinsella, 1974).
2. beta-Oksidasi dan Metil Keton: Asam lemak bebas, terutama yang rantai pendek dan menengah (seperti asam kaprilat), kemudian dioksidasi oleh *P. roqueforti* melalui jalur beta-oksidasi. Produk akhir dari jalur ini adalah metil keton

(misalnya, 2-heptanon dan 2-nonanon). Metil keton adalah metabolit sekunder yang paling krusial. Senyawa ini memberikan aroma tajam, pedas, dan *piquant* yang khas pada Keju Roquefort, yang membedakannya dari keju jenis lain (Kinsella & Hwang, 1976).

Selain memecah lemak, *P. roqueforti* juga menghasilkan enzim protease yang menghidrolisis protein kasein (Bars, 1979). Aktivitas proteolisis ini berkontribusi pada tekstur keju yang berubah dari padat menjadi lembut (*creamy*) saat matang.

*P. roqueforti* juga dikenal memproduksi alkaloid seperti Roquefortine C (Larsen & Knochel, 1997). Meskipun keju ini memiliki potensi senyawa antimikroba yang secara teoritis membantu melindungi keju dari kontaminasi, kadar senyawa tersebut diawasi ketat dan umumnya aman dikonsumsi. Keju Roquefort merupakan studi kasus yang menunjukkan bagaimana kapang yang spesifik dapat sepenuhnya mendefinisikan karakteristik sensori dan kualitas produk pangan premium.

# DAFTAR PUSTAKA

- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(2), 173–181.
- Barampama, Z., & Berset, C. (1994). Effect of fermentation on the physico-chemical properties of amaranth grain. *Food Science and Technology International*, 27(5), 452–458.
- Bars, J. Le. (1979). Cyclopiazonic acid production by *Penicillium camemberti* Thom and natural occurrence of this mycotoxin in cheese. *Applied and Environmental Microbiology*, 38(6), 1052–1055.
- Boulton, C. A., & Quain, D. E. (2006). *Brewing yeast and fermentation*. Blackwell Science.
- Dwivedi, B. K., & Kinsella, J. E. (1974). Continuous production of blue-type cheese flavor by submerged fermentation of *Penicillium roqueforti*. *Journal of Food Science*, 39(2), 297–299.
- Feldmann, H. (2012). *Yeast: Molecular and cell biology*. John Wiley & Sons.
- Goffeau, A., Barrell, B. G., Bussey, H., Davis, R. W., Dujon, B., Ekeberg, H., ... Johnston, M. (1996). Life with 6000 genes: How an entire eukaryotic genome was sequenced. *Science*, 274(5287), 546–567.
- Gomi, K. (2019). Industrial applications of *Aspergillus oryzae* and related species: Enzymes, bioactive compounds, and recombinant proteins. *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Hesseltine, C. W. (1965). A millennium of fungi, food, and fermentation. *Mycologia*, 57(2), 149–197.
- Kiers, J. L., Rombouts, F. M., & Nout, M. J. R. (2000). In vitro digestibility of *Bacillus subtilis* and *Rhizopus oligosporus* spores, vegetative cells and protein fractions. *International Journal of Food Microbiology*, 54(2), 163–171.
- Kinsella, J. E., & Hwang, D. (1976). Enzymes of *Penicillium roqueforti* involved in the biosynthesis of cheese flavor. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 7(1), 1–13.

- Kitamoto, K. (2011). Cell factory *Aspergillus oryzae* and its application for brewing and fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 112(5), 415–419.
- Kozaki, M. (2005). Fermented foods and beverages in Japan. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(4), 361–372.
- Larsen, A. G., & Knochel, S. (1997). Antimicrobial activity of food-related *Penicillium* sp. against pathogenic bacteria in laboratory media and a cheese model system. *Journal of Applied Microbiology*, 83(1), 111–119.
- Lestari, S., & Pato, U. (2012). Aktivitas fitase dan kandungan asam fitat pada kedelai selama proses pembuatan tempe. *Jurnal Natur Indonesia*, 14(2), 127–130.
- Machida, M., Yamada, O., & Gomi, K. (2005). Genomics of *Aspergillus oryzae*: Learning from the history of koji mold and fermentation. *DNA Research*, 12(2), 127–138.
- Mugditondo, H., Taufik, T., & Astuti, R. M. (2020). Review of the health benefits of tempeh: The Indonesian traditional fermented soybean product. *Food Science and Technology Journal*, 7(1), 1–10.
- Nout, M. J. R., & Kiers, J. L. (2005). Tempe fermentation, innovation and functionality: Update into the third millennium. *Journal of Applied Microbiology*, 98(4), 789–805.
- Ostergaard, S., Olsson, L., & Nielsen, J. (2000). Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64(1), 34–50.
- Pramith, M., & Kumar, R. (2017). A review on the role of yeast *Saccharomyces cerevisiae* in bread making. *International Journal of Science and Research*, 6(8), 1085–1087.
- Pretorius, I. S. (2000). Tailoring wine yeast for the new millennium: Novel approaches to the ancient art of winemaking. *Yeast*, 16(8), 675–729.
- Scott, P. M. (1984). The natural occurrence of mycotoxins in foods and feed. *Advances in Chemistry Series*, 215, 239–283.

- Steinkraus, K. H. (1997). Classification of fermented foods: Worldwide review of household fermentation techniques. *Food Control*, 8(5–6), 311–317.
- Tamang, J. P., Watanabe, K., & Holzapfel, W. H. (2016). Diversity of microorganisms in global fermented foods and beverages. *Frontiers in Microbiology*, 7, 377.
- Tani, M., Oshima, S., Noda, A., Tanaka, K., Takaya, N., & Ozeki, Y. (2019). Diversity in volatile compounds and their impact on flavor of Japanese sake. *Food Science and Technology Research*, 25(2), 241–247.
- Vallone, L., Giardini, A., & Soncini, G. (2014). Secondary metabolites from *Penicillium roqueforti*, a starter for the production of Gorgonzola cheese. *Italian Journal of Food Safety*, 3(2), 173–177.
- Wang, H. J., & Murphy, P. A. (1994). Isoflavone content in commercial soybean foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(8), 1666–1673.
- Wang, J., Guo, G., & Sun, M. (2017). Metabolic engineering of *Aspergillus oryzae* for efficient production of industrial enzymes and valuable chemicals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(23), 8565–8576.

## BAB 4

# Peran Rekayasa Genetika dalam Pengobatan

**Putri Elok Septiana Dewi**

Pada abad ke-21 ini, kemajuan di bidang biologi molekuler telah membuka babak baru dalam dunia pengobatan, yakni penerapan teknik rekayasa genetika yang memungkinkan campur tangan langsung pada materi genetik manusia. Pada dasarnya, rekayasa genetika melibatkan manipulasi DNA dengan melakukan *knock out* (penghapusan urutan DNA untuk menonaktifkan atau mengaktifkan ekspresi gen), *knock in* (penyisipan urutan DNA), dan penggantian (penggantian urutan DNA dengan urutan eksogen yang menyebakan perubahan ekspresi gen). Rekayasa genetik kini tidak lagi terbatas pada riset dasar, tetapi telah ke ranah klinis. Berbagai macam peran rekayasa dalam genetika akan dibahas dalam bagian bab ini.

### **Teknologi DNA Rekombinan dalam produksi obat**

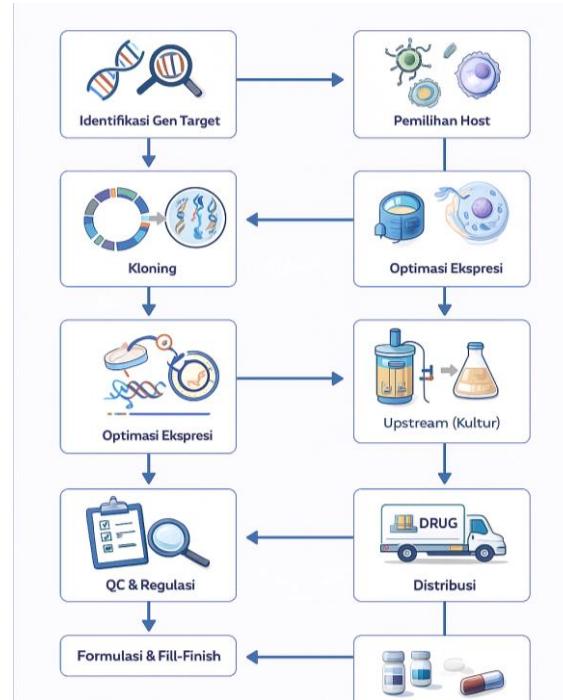
Teknologi DNA rekombinan merupakan salah satu rekayasa genetika dengan melibatkan pengubahan materi genetik, baik memanipulasi ataupun menggabungkan DNA di luar organisme. Hal ini dilakukan untuk memperoleh konstruksi genetik yang baru dengan karakteristik yang telah ditingkatkan dan diinginkan. Teknologi ini melibatkan penyisipan fragmen DNA dari berbagai sumber, yang memiliki urutan gen yang diinginkan melalui vektor yang sesuai. Manipulasi genom organisme dilakukan dengan menyeleksi dan memanen salinan fragmen DNA yang telah diinkorporasi ke dalam kultur. Hasilnya adalah klon yang mengandung fragmen DNA yang relevan.

Dalam konteks biomedis, DNA rekombinan memungkinkan produksi skala besar protein terapeutik, seperti produksi hormon, faktor pertumbuhan, sitokin, serta enzim dengan kemurnian dan konsistensi yang tinggi dibandingkan produk yang diekstrak dari jaringan tubuh manusia atau hewan. Pemanfaatan DNA rekombinan yang telah berhasil diterapkan adalah produksi hormon insulin, pertumbuhan manusia, dan gonadotropin.

Resistensi insulin merupakan gangguan fisiologis yang ditandai dengan kondisi rusaknya sel  $\beta$  sebagai penghasil insulin. Insulin dikenal sebagai pengatur metabolisme glukosa, lipid, dan protein. Berkurangnya kadar insulin menyebabkan peningkatan kadar glukosa dalam plasma, hal ini memicu terjadinya sindrom metabolik seperti aterosklerosis dan diaberes melitus. Terapi penderita resisten insulin dilakukan dengan pemberian insulin komersial. Produksi insulin memanfaatkan teknologi DNA rekombinan, sehingga produksi insulin (biosintetik) tersedia dalam jumlah besar melalui biosintesis pada mikroorganisme (*Escherichia coli*). Biosintesis insulin pada *E. coli* dilakukan dengan kloning rantai A dan B insulin secara terpisah dalam *E. Coli*. Prosesnya dilakukan menggunakan vektor ekspresi pET21b yang kemudian kedua rantai ini diisolasi, dimurnikan, dan ditempelkan secara kimia (Govender *et al.*, 2020). Selain pemanfaatan *E. coli* untuk produksi hormon insulin, *E. coli* juga menghasilkan hormon pertumbuhan (*Human Growth hormone/HGH*). Gen HGH dilakukan proses kloning ke dalam vektor ekspresi pET 3a dan ditransformasikan ke dalam sel *E. coli* (Nasr *et al.*, 2024).

Proses pembuatan hormon sebagai obat berbasis teknologi DNA rekombinan dimulai dengan identifikasi dan isolasi gen target dengan pembawa kode protein yang akan diproduksi secara eksogen. Setelah itu, gen target dikloning ke dalam vektor berupa plasmid untuk membentuk DNA rekombinan, yang kemudian ditransformasikan ke dalam sel inang. Sel inang dikultur untuk optimasi ekspresi gen dan dilanjut proses purifikasi protein. Protein yang murni mengekspresikan hormon sesuai gen target akan memasuki tahap *quality control* (QC). Setelah lulus QC, protein diformulasikan menjadi sediaan farmasi yang

kemudian didistribusikan. Alur pembuatan hormon sebagai obat dapat diamati dalam bentuk grafik sebagai berikut.



**Gambar 4.1. Proses pembuatan obat hasil menggunakan teknologi DNA rekombinan.**

### Terapi Gen (*Gene Therapy*)

Terapi gen adalah pendekatan biomedis yang berusaha mencegah atau mengobati penyakit dengan melakukan modifikasi pada gen suatu individu. Modifikasi gen yang dapat dilakukan ialah dengan pengiriman gen pengganti atau salinan fungsi (*gene addition*), pengeditan genom, serta modifikasi genetik. Terapi gen ini dilakukan dengan vektor virus maupun non-virus (nanopartikel) sebagai penghantar gen ke sel target. Vektor virus yang dimodifikasi untuk menghilangkan sifat patogenisitasnya agar transduksi tinggi dan ekspresi yang stabil. Vektor virus yang bisa digunakan ialah virus adeno-associated, adenovirus, dan lentivirus. Terapi gen kini diterapkan dalam beberapa pengobatan, diantaranya yaitu pengobatan hemoglobinopati, hemofilia, dan kanker.

Talasemia terjadi akibat mutasi pada gen subunit hemoglobin  $\beta$  (HBB). Mutasi pada HBB yang menyebabkan TDT4 dapat mengakibatkan berkurangnya sintesis  $\beta$ -globin ( $\beta^+$ ) atau bahkan tidak adanya sintesis  $\beta$ -globin sama sekali ( $\beta^0$ ). Kondisi ini menimbulkan ketidakseimbangan antara rantai globin mirip- $\alpha$  dan mirip- $\beta$  (misalnya  $\beta$ ,  $\gamma$ , dan  $\delta$ ) pada hemoglobin, sehingga terjadi eritropoiesis yang tidak efektif.

Pendekatan terapi gen dengan menggunakan pengeditan gen CRISPR pada sel punca hematopoietik menunjukkan keberhasilan sel mengaktifkan produksi hemoglobin janin (*fetal hemoglobin*). Studi sebelumnya melakukan elektroporasi sel punca dan progenitor hematopoietik CD34+ yang diperoleh dari donor sehat, dengan CRISPR-Cas9 yang menargetkan *enhancer* spesifik eritroid BCL11A. BCL11A adalah faktor transkripsi yang menekan ekspresi  $\gamma$ -globin dan hemoglobin janin dalam sel eritroid.

Rekayasa sel T atau yang dikenal dengan *Autologous chimeric antigen receptor* (CAR-T) merupakan penambahan *receptor chimeric antigen* (CAR) ke sel T pasien leukimia, yang kemudian menghasilkan produk CAR-T dan kini menjadi terapi kuratif untuk limfoma dan leukemia *refractory*. Upaya saat ini juga mengarah pada CAR-T allogenik "off-the-shelf" dan integrasi pengeditan gen untuk mengurangi risiko *graft-versus-host* atau meningkatkan efektivitas terhadap tumor.

## Pengembangan Vaksin Rekombinan

Teknologi rekombinan telah mengubah paradigma pengembangan vaksin dari metode inaktivasi patogen menjadi strategi fleksibel dan efektif dalam penargetan antigen untuk menginduksi respons imun. Terdapat 3 jenis vaksin rekombinan yang telah dikembangkan, yakni: vaksin subunit/protein, vaksin vektor rekombinan, dan vaksin DNA.

Vaksin subunit atau protein menggunakan protein struktural dalam perakitan virus. Pengembangan vaksin dengue merupakan salah satu aplikasi dari vaksin protein. Virus dengue mengkode 3 protein struktural, yakni: protein kapsid, protein membran, dan protein

selubung. Protein ini memiliki potensi sebagai antigen yang dapat direkayasa, dikloning, dan diekspresikan ke sel inang. Pemanfaatan antigen dari protein yang bukan merupakan virus hidup atau virus inaktif dapat meningkatkan imunogenitas karena resiko infeksi yang rendah (Tripathi & Srivastava, 2018).

Vaksin vektor rekombinan memanfaatkan virus atau bakteri sebagai vektor yang dimodifikasi membawa gen antigen patogen dan digunakan sebagai alat penghantaran antigen ke dalam sel inang. Tubuh akan mengekspresikan antigen yang akan memicu respons imun. Vaksin COVID-19 merupakan contoh dari vaksin vektor rekombinan yang memanfaatkan vektor adenovirus.

Vaksin DNA berasal dari gen antigen yang dikloning ke dalam plasmid vektor. Sebagai contoh, INO-4800 adalah vaksin berbasis DNA Spike SARS-CoV-2. Vaksin ini hasil optimalisasi kontruksi DNA dan plasmid ditransferkan secara intradermal (Andrade *et al.*, 2021). Vaksin vektor rekombinan memiliki keunggulan seperti memicu respons imun ganda (humoral & seluler); keamanan relatif tinggi karena tidak menggunakan patogen hidup (hanya gen antigen) sehingga risiko infeksi atau replikasi patogen sangat minim; produksi dapat dilakukan dengan cepat dan fleksibel; serta memungkinkan dosis vaksin relatif kecil tetapi efektif.

## Terapi Sel

Terapi sel berperan penting dalam biomedis saat ini karena perannya dalam meningkatkan keberlangsungan hidup yang lebih progresif di onkologi. CAR T-cell (*chimeric antigen receptor T-cell*) telah merevolusi pengobatan berbagai tumor dan kanker seperti leukemia limfoblastik akut, limfoma folikular, dan limfoma sel mantel. CAR T-cell merupakan hasil rekayasa genetik limfosit T untuk mengekspresikan reseptor sintetis yang mengenali antigen permukaan sel tumor dan menyebabkan sel T membunuh sel tumor (Brudno *et al.*, 2025).

Terapi sel punca atau *mesenchymal stromal cell* (MSCs) memfaatkan kemampuannya dalam regenerasi jaringan untuk modulasi imun sebagai terapi penyakit inflamasi/infeksi. Terapi sel

punya memiliki keunggulan terapeutik, diantaranya adalah kemampuan regeneratif dan target spesifik yang dapat menggantikan sel yang hilang dan memulihkan fungsi jaringan, serta kemampuannya dapat meredam peradangan berlebihan (relevan pada ARDS, GVHD, dan penyakit autoimun).

Terapi sel memiliki prospek yang sangat bagus dalam dunia medis, diantaranya adalah perkembangan sel CAR generasi baru yang multi target dengan toksisitas rendah. Terapi sel dapat dilakukan dengan kombinasi blokade *checkpoint* dan modulator respons imun untuk mengatasi resistensi dan memperkuat respons, serta mengurangi efek samping seperti terjadinya autoimunitas.

### **Pengeditan Genom (*Genome Editing*)**

*Genome editing* adalah rangkaian teknik untuk membuat perubahan terarah pada DNA organisme dengan cara menghapus, memasukkan, mengganti, atau memodifikasi urutan spesifik. Teknologi awal meliputi ZFN (*zinc-finger nucleases*) dan TALENs dengan merekayasa genetik pada enzim untuk mengenali urutan DNA tertentu, lalu memotong dan menghasilkan desain protein yang kompleks. Seiring berkembang jaman terjadi revolusi dengan mengembangkan CRISPR–Cas9.

CRISPR–Cas9 berperan penting dalam dunia medis dengan menggunakan *guide RNA* (gRNA) untuk menargetkan Cas9 ke lokasi genom spesifik dan menghasilkan *double-strand break* (DSB). DSB ini kemudian diperbaiki oleh mekanisme seluler NHEJ (*non-homologous end joining*) yang menghasilkan *insert* atau *delete* untuk gangguan gen, sementara HDR (*homology-directed repair*) memungkinkan penggantian pemasukan urutan yang diinginkan. CRISPR digunakan untuk merekayasa sel T, baik dengan melakukan *knock-out* *PD-1* maupun dengan memasukkan konstruksi CAR untuk pengobatan antitumor. Selain itu, aplikasi klinis teknologi ini juga telah diuji pada pengobatan hemoglobinopati (*sickle cell disease* dan  $\beta$ -*thalassemia*). Terapi yang menargetkan *enhancer BCL11A* terbukti mampu mengurangi manifestasi *sickle cell*.

## **Imunoterapi**

Imunoterapi merupakan pendekatan teraupetik yang memanfaatkan sistem kekebalan tubuh. Imunoterapi akan memicu modulasi sistem imun agar mengenali dan menghancurkan sel yang rusak. Imunoterapi biasa diterapkan pada pengobatan kanker, autoimun, dan penyakit degeneratif.

Pendekatan imunoterapi diantaranya seperti *checkpoint inhibitor*, antibodi monoklonal, vaksin kanker, dan sitokin atau adjuvan imun. Imunoterapi dengan antibodi monoklonal atau molekul *checkpoint* (misalnya inhibitor PD-1 / PD-L1, CTLA-4) memicu sistem imun sendiri mengenali dan menyerang sel tumor. Imunoterapi juga bisa berupa suntikan sitokin (misalnya interleukin dan interferon), untuk meningkatkan atau mengarahkan respons imun.

# DAFTAR PUSTAKA

- Andrade, V. M., Christensen-quick, A., Agnes, J., Tur, J., Reed, C., Kalia, R., Marrero, I., Elwood, D., Schultheis, K., Purwar, M., Reuschel, E., McMullan, T., Pezzoli, P., Kraynyak, K., Sylvester, A., Mammen, M. P., Tebas, P., Kim, J. J., Weiner, D. B., ... Broderick, K. E. (2021). INO-4800 DNA vaccine induces neutralizing antibodies and T cell activity against global SARS-CoV-2 variants. *Npj Vaccines*, 1–4. <https://doi.org/10.1038/s41541-021-00384-7>
- Brudno, J. N., Maus, M. V., & Hinrichs, C. S. (2025). *CAR T Cells and T-Cell Therapies for Cancer*. 332(22), 1924–1935. <https://doi.org/10.1001/jama.2024.19462.CAR>
- Govender, K., Naicker, T., Lin, J., Baijnath, S., Chuturgoon, A. A., Abdul, N. S., Doerat, T., Kruger, H. G., & Govender, T. (2020). A novel and more efficient biosynthesis approach for human insulin production in Escherichia coli (E. coli). *AMB Express*. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00969-w>
- Nasr, S. M., Samir, S., & Okasha, H. (2024). Interdisciplinary gene manipulation, molecular cloning, and recombinant expression of modified human growth hormone isoform-1 in E. coli system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257(Pt 1), 128637. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128637>
- Tripathi, N. K., & Shrivastava, A. (2018). *Recent Developments in Recombinant Protein – Based Dengue Vaccines*. 9(August), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.01919>

# **BAB 5**

## **Industri Kesehatan II: Vaksin dalam Keilmuan Biologi**

**Karimatul Himmah**

Vaksin bekerja dengan melatih sistem kekebalan tubuh untuk mengenali dan melawan patogen tertentu, virus atau bakteri, tanpa menyebabkan penyakit serius. Produksi Vaksin hingga saat ini tidak terlepas dari keilmuan biologi seperti imunologi, mikrobiologi, dan bioteknologi. Teknologi vaksin telah berkembang pesat dan memungkinkan pengembangan vaksin yang lebih cepat, lebih aman, dan lebih efektif. Vaksin yang telah diproduksi dipergunakan dalam masyarakat untuk membentuk kekebalan tubuh atas suatu infeksi dan memberikan dampak besar seperti membentuk *herd immunity* (kekebalan kelompok) yang dapat mencegah epidemi maupun pandemi suatu penyakit berbahaya.

### **Sejarah Penemuan Vaksin**

Kelangsungan hidup manusia secara mendasar bergantung pada pengembangan dan pemeliharaan mekanisme pertahanan tubuh untuk menghadapi serangan patogen yang berkelanjutan dan timbulnya suatu penyakit. Sepanjang sejarah peradaban, manusia telah menghadapi ancaman dari infeksi penyakit menular. Wabah seperti cacar, kolera, influenza, hingga COVID-19 telah menelan jutaan korban jiwa. Kehadiran vaksin menjadikan suatu penyakit maupun infeksi dapat dicegah sebelum menyerang tubuh. Manusia mengandalkan sistem imun alami sebelum ilmu biologi modern berkembang seperti saat ini. Sejarah mencatat dampak besar wabah seperti cacar (*smallpox*) telah

merenggut banyak jiwa. Cacar merupakan penyakit yang menimbulkan gejala-gejala yang ditandai dengan demam tinggi, muntah, dan luka mulut, yang kemudian diikuti dengan lesi berisi cairan di sekitar tubuh. Kematian sering terjadi mendadak, biasanya dalam waktu dua minggu. Bagi para penderitanya, terutama yang dalam kategori parah, cacar dapat meninggalkan dampak permanen seperti kebutaan dan kemandulan. Pada masa itu, insting untuk bertahan hidup memunculkan upaya-upaya awal imunisasi, seperti praktik variolasi di Tiongkok kuno. Praktiknya dilakukan dengan cara material dari lesi cacar ringan diberikan kepada individu sehat untuk memicu kekebalan. Praktik ini diduga sudah ada sejak tahun 200 SM. Pada pertengahan tahun 1500-an, dikenal metode insuflasi, yaitu koreng cacar yang dikeringkan dan digiling lalu ditupukan ke hidung. Di India, praktik serupa dilakukan melalui inokulasi menggunakan jarum untuk memindahkan materi pustula cacar ke kulit anak-anak. Variolasi diperkenalkan ke Eropa pada tahun 1721 oleh Lady Mary Wortley Montagu, setelah ia mengamati praktik tersebut di Kekaisaran Ottoman (Turki). Hampir pada waktu yang sama, di Koloni Amerika, Cotton Mather mempublikasikan praktik tersebut, yang sebelumnya telah diperkenalkan oleh budak-budak di Afrika Barat. (Baxby, 1982; Lauro, Irrera and Eid, 2021; Raven dan Johnson, 2022; WHO, 2025).

Selanjutnya, pada akhir abad ke-18, Edward Jenner mencetuskan penemuan vaksin yang kemudian menjadi dasar ilmu imunisasi modern. Ia menemukan bahwa orang yang terpapar *cowpox* (cacar sapi) ternyata kebal terhadap *smallpox* (cacar manusia). Dari eksperimen sederhana yang dilakukan oleh Jenner, lahirlah konsep vaksinasi yang kemudian berkembang pesat (Baxby, 1982). Jenner melakukan eksperimen menggunakan materi dari luka cacar sapi (Gambar 1) yang diambil dari Sarrah Nelmes, yang selanjutnya ditanamkan ke James Phipps (anak berusia 8 tahun). Phipps pulih sepenuhnya setelah sakit ringan selama beberapa hari. Dua bulan kemudian, pada Juli 1796, Jenner menguji kekebalan Phipps dengan menanamkan (menginokulasi) materi dari luka cacar manusia (*smallpox*). Phipps tetap dalam kondisi sehat sempurna. Eksperimen ini membuktikan bahwa cacar sapi memberikan perlindungan terhadap cacar manusia,

yang kemudian menandai lahirnya vaksinasi dan menjadikan Phipps orang pertama yang divaksinasi cacar (Baxby, 1982; WHO, 2025). Hal yang dilakukan Jenner pada dasarnya adalah memanfaatkan prinsip-prinsip biologi dasar yakni mengenalkan antigen kepada sistem imun untuk memicu respons sel memori. Prinsip sederhana namun sangat penting inilah yang menjadi inti dari setiap vaksin yang dikembangkan hingga hari ini.



Source: Baxby, 1982

**Gambar 5.1 Tangan terinfeksi virus cacar *cowpox*.**

Nama vaksin berasal dari kata Latin *vacca*, yang berarti sapi. Vaksin berfungsi sebagai tameng. Vaksin tidak hanya melindungi individu yang divaksinasi, tetapi juga membentuk kekebalan kelompok (*herd immunity*), yang pada akhirnya memutus mata rantai penularan penyakit. Louis Pasteur memberi apresiasi hasil eksperimen Jenner dan berpendapat bahwa vaksin dapat mencegah banyak penyakit menular. Selama hidupnya, Pasteur berhasil mengembangkan vaksin untuk penyakit kolera, rabies, dan antraks dengan memanfaatkan organisme yang dilemahkan (*attenuated organisms*). Pada abad ke-20, para ahli mikrobiologi mulai memahami perbedaan antara mikroorganisme yang tidak berbahaya (*innocuous*) dan yang menular (*infectious*). Mikroorganisme yang sangat menular kemudian didefinisikan sebagai organisme virulen. Tingkat kemampuan penularan (infektivitas) organisme ini ditentukan oleh adanya faktor

virulensi (*virulence factors*), yaitu komponen-komponen spesifik yang memungkinkan mikroorganisme menginfeksi inang dan menyebabkan penyakit (Smith, 2021; Raven dan Johnson, 2022).

Vaksinasi juga telah berhasil menekan angka kesakitan dan kematian akibat penyakit seperti campak, polio, difteri, pertusis (batuk rejan), dan tetanus. Jutaan nyawa terselamatkan, sekaligus beban ekonomi dan sosial yang ditimbulkan oleh wabah penyakit dapat ditekan secara signifikan. Setiap suntikan vaksin adalah sebuah upaya preventif yang menyelamatkan generasi, memastikan bahwa anak-anak dapat tumbuh dengan sehat dan mencapai potensi mereka secara maksimal. Inilah yang menjadikan vaksinasi sebagai fondasi dari sistem kesehatan primer untuk pembangunan berkelanjutan sebuah bangsa. Dalam jejaring global, dengan perjalanan dan perdagangan lintas batas negara berlangsung cepat, ancaman penyakit menular bersifat global. Oleh karena itu, cakupan vaksinasi yang luas merupakan benteng pertahanan pertama untuk mencegah pandemi dan menjaga stabilitas kesehatan dunia yang tidak luput dari ilmu biologi dan terapannya (Smith, 2021; Flaherty, 2012; WHO, 2025).

## **Dasar Biologi Vaksin**

Inti dari pengembangan vaksin terletak pada pemahaman mendalam tentang biologi dasar. Bidang-bidang seperti imunologi, mikrobiologi, dan virologi menyediakan kerangka teoretis untuk menciptakan vaksin yang efektif dan aman. Selain itu pada tahap perkembangannya diperlukan uji dan penelitian lebih lanjut terkait bidang keilmuan kedokteran untuk uji preklinis maupun farmakologi dan bioavailibilitas dari vaksin yang diproduksi. Dasar biologi vaksin adalah memahami mesin pertahanan di dalam tubuh dan mekanismenya.

## **Prinsip Dasar Sel Memori**

Secara garis besar, sistem kekebalan tubuh terbagi menjadi dua. Pertama, imunitas bawaan (*innate immunity*), yaitu pertahanan non-spesifik yang bekerja sebagai lini pertama, misalnya melalui kulit dan sel-sel fagositik. Kedua, imunitas adaptif (*adaptive immunity*), yaitu

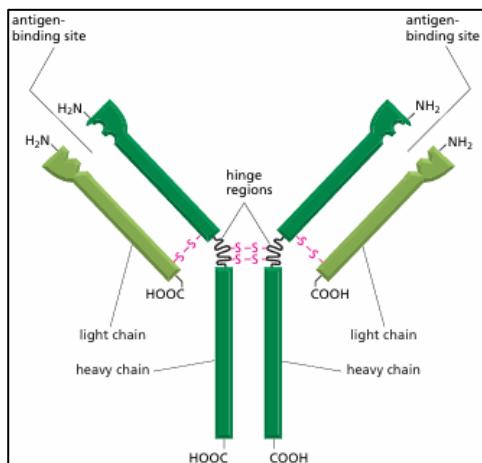
pertahanan spesifik yang mampu membentuk memori imunologis. Sistem imun adaptif kita memiliki kemampuan untuk mengingat pengenalan pertama dengan patogen. Pengenalan pertama ini memicu respons yang relatif lambat (10-14 hari), namun menghasilkan sel-sel memori yang berumur panjang. Ketika patogen yang sama menyerang untuk kedua kali ke sel inang, sel-sel memori ini dengan tanggap mengaktifkan sel pertahanan tubuh. Akibatnya, dalam banyak kasus, infeksi dapat dilawan sebelum gejala penyakit muncul. Vaksin pada dasarnya adalah simulasi pertempuran yang dirancang dengan cermat. Tujuannya adalah untuk memicu pembentukan sel memori tanpa harus menyebabkan penyakit yang sebenarnya. Sel memori akan merekam kehadiran suatu bakteri atau virus di dalam tubuh, untuk siap jika ada infeksi ulang terjadi (Abbas dan Lichtman, 2022; Flaherty, 2012).

Imunitas Adaptif dibagi menjadi dua jenis respons utama, yakni imunitas humorai dan imunitas seluler. Respon imun spesifik melibatkan respon humorai dimulai dengan pengenalan infeksi virus/patogen ke dalam sel. Selanjutnya, pengenalan antigen oleh sel inang akan menstimulasi makrofag. Makrofag kemudian akan melepas interleukin-1. Interleukin-1 bertugas untuk mengaktivasi T *helper* yang kemudian melepas interleukin-2. Tugas interleukin-2 mengaktivasi sel B dan sel T. Setelah itu, terjadi penggandaan sel B. Sel ini akan memproduksi sel memori atau sel plasma dengan cara memproduksi antibodi (Gambar 5. 2-3). Antibodi disebut juga immunoglobulin, yang dapat mengenali antigen virus. Antibodi dilepaskan ke dalam cairan tubuh (*humor*), seperti darah dan limfa. Antibodi mengikat antigen patogen (neutralisasi), menandai patogen agar mudah difagositosis (opsonisasi), atau mengaktifkan sistem komplemen (Raven dan Johnson, 2022).

Jenis kedua dari imunitas adaptif adalah imunitas seluler yang melibatkan aktivasi sel T, yang disebut juga limfosit T. Sel T (Limfosit T) bertindak sebagai pasukan khusus yang mengenali dan menghancurkan sel-sel tubuh sendiri yang sudah terinfeksi (Sel T Sitotoksik). Jenis lain, yang dikenal dengan Sel T Helper, berperan sebagai komandan yang mengoordinasi respons sel B dan sel T lainnya (Gambar 5.3). Hal ini dilakukan dengan cara melepaskan sinyal kimia

atau yang disebut dengan sitokin. Sel T Sitotoksik (*T-killer*) bertugas menghancurkan (melisiskan) sel target yang terinfeksi. Sedangkan Sel *T-helper* bertugas mengaktifkan dan mengatur respons imun lainnya (baik humorai maupun seluler) (Abbas dan Lichtman, 2022; Raven dan Johnson, 2022).

Antigen merupakan molekul asing (protein atau polisakarida) yang dapat dikenali oleh sistem imun dan memicu respons. Dalam konteks vaksin, antigen adalah komponen utama dari patogen (misalnya protein spike pada virus), yang sengaja dipilih dan dimasukkan ke dalam tubuh. Interaksi yang terkoordinasi antara antigen, sel B, sel T, dan antibodi inilah yang menciptakan kekebalan protektif. Vaksin dirancang untuk mengaktifkan seluruh rangkaian respons ini secara optimal. Vaksin menargetkan terbentuknya antibodi oleh aktivitas sel B atau pembentukan sel T di dalam tubuh (Abbas dan Lichtman, 2022; Raven dan Johnson, 2022).

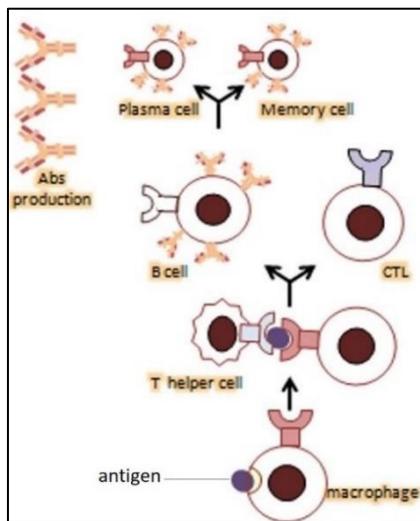


Sumber:Alberts *et al.*, 2015)

**Gambar 5.2 Struktur antibodi secara umum.**

Organ limfoid sentral merupakan tempat limfosit berkembang dari sel progenitor limfoid di *bone marrow* (sumsum tulang). Di dalamnya terdapat sel B yang belum matang, dan sel lain yang akan berkembang menjadi timosit di timus (sel T yang sedang berkembang).

Sel T dan sel B diaktifkan oleh adanya antigen asing (Alberts *et al.*, 2015). Antibodi atau immunoglobulin (Ig) diklasifikasikan dalam lima kelas, yaitu: IgA, IgE, IgG, IgD, dan IgM. Kelima kelas utama antibodi atau Imunoglobulin (Ig) pada manusia memiliki fungsi dan distribusi yang berbeda dalam sistem kekebalan tubuh (Vukovic dan Elsas, 2020).



**Gambar 5.3. Tahapan terbentuknya antibodi dalam imunitas humoral.**  
**Abs: antibodi**

### ***Mekanisme pertahanan Tubuh melawan patogen***

*Natural killer* (NK) merupakan limfosit yang berfungsi sebagai garda terdepan sistem imunitas bawaan (*innate immunity*). Mekanisme pertahanannya berupa mekanisme pertahanan langsung. Tugasnya adalah membunuh sel yang terinfeksi. Sel NK menggunakan mekanisme *Altered Self* melalui pelepasan Granula, yakni melepaskan Perforin (membentuk pori-pori di sel target) dan Granzim (masuk melalui pori-pori dan memicu apoptosis atau kematian sel terprogram). Sistem imun humoral memiliki mekanisme pertahanan tidak langsung (Gambar 5.3). *Antigen Presenting Cell* (APC) seperti sel dendritik, Makrofag, dan sel B berfungsi sebagai inisiator respons imun adaptif. Peran utama APC adalah menangkap, memproses, dan secara fisik menyajikan antigen kepada Limfosit T. Sebaliknya, *Antigen Presenting*

*Molecule* (APM), yang juga dikenal sebagai *Major Histocompatibility Complex* (MHC) atau *Human Leukocyte Antigen* (HLA), adalah molekul protein yang berfungsi sebagai platform di permukaan APC untuk menampilkan fragmen antigen (peptida). Fungsi kunci APM adalah untuk memfasilitasi tampilan fragmen molekul antigen ini agar dapat dikenali oleh Reseptor Sel T (TCR). Dengan demikian, APC adalah pelaksana seluler yang memuat peptida ke APM, sementara APM adalah alat molekuler (MHC Kelas I dan II) yang memungkinkan pengenalan spesifik tersebut. Terdapat dua tipe dari MHC, yakni MHC kelas I dan MHC kelas II (Alberts *et al.*, 2015).

1. MHC Kelas I: Molekul ini ditemukan pada semua sel berinti. Tugasnya adalah menyajikan peptida dari antigen yang berasal dari dalam sel (seperti infeksi virus atau protein kanker) kepada Sel T Sitotoksik (CD8<sup>+</sup>).
2. MHC Kelas II: Molekul ini hanya ditemukan pada APC profesional, seperti Sel Dendritik, Makrofag, dan Sel B. Fungsi utamanya adalah menyajikan peptida dari antigen yang berasal dari luar sel (setelah proses fagositosis) kepada Sel T Helper (CD4<sup>+</sup>).

Sedangkan pada mekanisme Aktivasi Sel T oleh Sel Dendritik sebagai APC, sel dendritik (DC) bertindak sebagai jembatan yang menghubungkan sistem imun bawaan dengan sistem imun adaptif yang spesifik. Prosesnya dimulai ketika DC, yang berfungsi sebagai *Antigen Presenting Cell* (APC), berada di jaringan perifer (seperti kulit). Pada jaringan tersebut, DC secara aktif menangkap dan memfagositosis patogen asing (antigen). Setelah penangkapan, DC mulai matang dan bermigrasi ke organ limfoid sekunder, seperti kelenjar getah bening. Selama perjalanan ini, patogen diproses dan dipecah menjadi fragmen-fragmen kecil yang disebut peptida. Fragmen peptida inilah yang kemudian dimuat ke molekul presentasi antigen atau APM (*Major Histocompatibility Complex/MHC*) yang baru disintesis.

Peptida dari patogen luar akan dimuat ke MHC Kelas II untuk disajikan kepada Sel T Helper (CD4<sup>+</sup>), sementara peptida dari patogen dalam sel (seperti virus) akan dimuat ke MHC Kelas I untuk disajikan

kepada Sel T Sitotoksik (CD8<sup>+</sup>). Setibanya di kelenjar getah bening, DC mencari dan bertemu dengan Sel T naif yang memiliki reseptor yang spesifik terhadap antigen tersebut (TCR). Aktivasi penuh Sel T memerlukan tiga sinyal krusial yang disediakan oleh DC: Sinyal 1 adalah pengenalan spesifik, dengan kompleks MHC-peptida pada DC berikatan dengan Reseptor Sel T (TCR). Sinyal 2 adalah kostimulasi, yang berupa ikatan antara molekul B7 (CD80/CD86) pada DC dengan reseptor CD28 pada Sel T. Sinyal ini berfungsi sebagai izin aktivasi penuh agar sel T bisa menjadi aktif atau tidak anergik. Sinyal 3 adalah sekresi berbagai sitokin oleh DC, yang menentukan jalur diferensiasi Sel T (misalnya menjadi Sel T Helper 1, 2, atau 17). Setelah menerima ketiga sinyal ini, Sel T naif akan teraktivasi, berproliferasi (memperbanyak diri), berdiferensiasi menjadi sel efektor dan sel memori, dan kemudian meninggalkan kelenjar getah bening untuk menjalankan peran spesifik mereka dalam menghancurkan patogen di seluruh tubuh (Abbas and Lichtman, 2022; Raven and Johnson, 2022).

### ***Imunogenisitas dan Reaktogenisitas***

Dalam industri kesehatan, pengembangan vaksin selalu berjalan di atas tali yang menguji keseimbangan antara dua properti biologi yang krusial, yakni imunogenitas dan rektogenisitas.

Imunogenisitas adalah kemampuan suatu vaksin untuk memicu respons imun yang kuat dan lama (menghasilkan banyak sel B dan T memori serta antibodi). Kemampuan ini adalah efek yang diinginkan. Sedangkan reaktogenisitas adalah kemampuan vaksin untuk menimbulkan reaksi samping (seperti demam, nyeri lokal, kelelahan). Reaksi ini adalah efek yang tidak dinginkan, meskipun menjadi bagian dari aktivasi sistem imun yang kuat. Tantangan biologi dan rekayasa terbesar adalah merancang vaksin yang memiliki imunogenisitas tinggi dengan reaktogenisitas rendah. Properti dari suatu antigen untuk mengikat antibodi spesifik yang komplementer dikenal sebagai antigenisitas antigen. Sedangkan, kemampuan suatu antigen untuk menginduksi respon imun disebut imunogenisitas. Antigenisitas merupakan bagian dari antigen yang bereaksi secara spesifik dengan antibodi ataupun limfosit. Daerah antigenik dalam antigen yang dapat

merangsang respon sel B disebut dengan *B cell epitope* (*epitope sel-B*) (Ponomarenko dan Regenmortel, 2015).

Banyak platform vaksin modern (terutama *inactivated* dan subunit) membutuhkan bantuan senyawa yang disebut dengan *adjuvant* (dari bahasa Latin *adjuvare*, yang artinya membantu). Adjuvant adalah komponen kunci dalam formulasi vaksin yang sering diabaikan, namun memegang peran biologis yang sentral. Secara biologis, adjuvant berfungsi sebagai pemicu Bahaya (*danger signal*). Adjuvant menciptakan *microenvironment* di tempat injeksi yang meniru adanya infeksi sesungguhnya. Hal ini dilakukan dengan cara menarik sel-sel imun *innate* (seperti makrofag dan sel dendritik) dan mengaktivasinya secara kuat. Sel dendritik yang teraktivasi ini kemudian akan membawa antigen vaksin ke kelenjar getah bening dan mempresentasikannya kepada sel T dan sel B dengan jauh lebih efisien (Abbas and Lichtman, 2022).

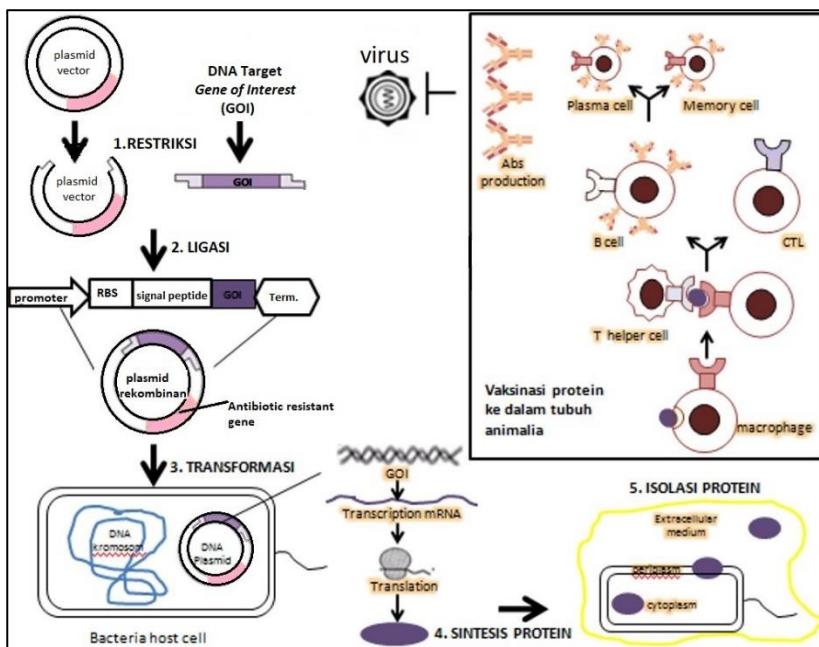
## **Jenis Vaksin: Dari Teori Biologi Menuju Produksi Vaksin Industri**

Pemahaman mendalam tentang imunologi telah melahirkan beragam teknologi vaksin. Pada dasarnya, teknologi vaksin adalah strategi berbeda yang bertujuan sama, yakni memperkenalkan antigen kepada sistem imun.

### **Vaksin Subunit**

Vaksin ini hanya menggunakan fragmen spesifik dari virus atau bakteri (seperti protein permukaan, toksin, atau bagian kapsul) yang diperlukan untuk memicu respons imun, yang akan dikenali sebagai antigen. Vaksin subunit protein atau subunit tertentu disuntikkan, kemudian sistem imun akan belajar mengenali. Vaksin subunit terutama menginduksi respons sel CD4<sup>+</sup>, sel T helper, dan antibodi. Pada perkembangan biologi modern, vaksin sub unit ini melibatkan tahapan desain plasmid rekombinan. Pada prosesnya, DNA target yang spesifik digabungkan ke plasmid, yang selanjutnya plasmid tersebut mengalami transformasi ke sel vektor (bakteri, jamur, atau kulur sel), sehingga DNA taget (GOI) akan mengalami transkripsi dan translasi agar terekspresi menjadi protein (Gambar 5.4). Protein ini nanti akan diisolasi dan nantinya berfungsi sebagaimana antigen. Contoh vaksin

subunit adalah vaksin Hepatitis B, vaksin HPV, dan beberapa vaksin COVID-19 (misalnya, Novavax).



Gambar 5.5 Tahap desain vaksin pada jenis *sub unit vaccine* (1-5) dan keterlibatannya dalam respon imun humoral yang dapat mengaktifasi pembentukan antibodi dalam tubuh inang atau manusia. Protein yang terisolasi (pada tahap 5) dikenali sebagai antigen (kandidat vaksin).

### *Inactivated vaccine*

Vaksin ini dibuat menggunakan seluruh virus atau bakteri yang telah dimatikan (*inactivated*) menggunakan panas, bahan kimia (seperti formalin), atau radiasi. Mikroorganisme tersebut tidak dapat bereplikasi atau menyebabkan penyakit. Inaktivasi ini menghambat kemampuan patogen untuk bereplikasi dan menyebabkan penyakit, namun tetap mempertahankan imunogenisitasnya. Akibatnya, sistem kekebalan tubuh masih dapat mengenali patogen yang ditargetkan.

### *Vaksin Hidup yang dilemahkan (Live attenuated vaccine)*

Vaksin jenis ini menggunakan bentuk hidup dari virus atau bakteri penyebab penyakit yang telah dilemahkan (*attenuated*) di laboratorium, sehingga tidak menyebabkan penyakit pada orang sehat, tetapi masih mampu bereplikasi dalam tubuh. Produksinya bisa dihasilkan dari proses kultur sel. Vaksin ini kehilangan sifat patogeniknya dan hanya menyebabkan infeksi ringan saat disuntikkan. Selain itu, mikroorganisme yang dilemahkan ini mereplikasi diri dan meniru infeksi alami, sehingga dapat memicu respons imun inang atau manusia. Akibat dari perubahan bentuknya, vaksin jenis ini tidak dapat menyebabkan penyakit yang sebenarnya, atau hanya meniru penyakit dalam bentuk yang sangat ringan. Metode paling umum untuk mendapatkan vaksin hidup yang dilemahkan adalah dengan menyebarkan virus melalui serangkaian kultur sel *in vitro* (misalnya dalam sel embrio ayam). Contoh *Live attenuated vaccine* adalah vaksin Campak, Gondok, Rubela (MMR), Cacar Air, Rotavirus, dan vaksin TBC (BCG).

### ***Vaksin Vektor Virus***

Menggunakan virus lain yang tidak berbahaya (disebut vektor) yang membawa materi genetik DNA atau *Gene of Interest* (GOI) ke sel tubuh. Pada prosesnya, vektor viral (misalnya, adenovirus) memasuki sel dan melepaskan materi genetik (DNA). Sel kemudian akan menggunakan DNA ini untuk memproduksi protein antigen target. Tubuh akan mengenali protein ini dan memulai respons imun. Contoh vaksin jenis ini yaitu beberapa vaksin COVID-19 (misalnya, AstraZeneca, Johnson & Johnson/Janssen), dan vaksin Ebola.

### ***Virus-Like Particles Vaccines***

Vaksin ini menggunakan protein virus yang meniru struktur dari virus, tetapi tidak mengandung materi genetik. Contohnya vaksin Hepatitis B Enerix-B®, dan Recombivax HB®.

### ***Nucleic Acid Vaccine (Vaksin Asam Nukleat - mRNA)***

Vaksin ini menggunakan materi genetik, khususnya *messenger RNA* (mRNA), yang dikemas dalam vektor nanopartikel lipid. mRNA

adalah cetak biru genetik sementara yang memberikan instruksi langsung ke sel. Partikel lipid mengantarkan mRNA ke dalam sel. mRNA menginstruksikan mesin seluler untuk memproduksi protein antigen spesifik patogen (misalnya, protein *spike* dari virus SARS-CoV-2). Setelah protein diproduksi, sistem imun mengenalinya dan membuat respons kekebalan. mRNA kemudian dipecah secara alami oleh sel. Contoh vaksin mRNA adalah vaksin COVID-19 (Pfizer-BioNTech dan Moderna) (Halimah, 2024; Himmah *et al.*, 2018; Paramitasari, 2021).

## **Teknologi dan Industri Vaksin**

### ***Desain vaksin dalam pendekatan bioinformatika***

Selama beberapa dekade, pemilihan kandidat antigen untuk vaksin banyak mengandalkan metode empiris dengan menumbuhkan patogen dalam laboratorium, melemahkannya, mematikannya, atau memisahkan partikelnya. Selanjutnya, calon vaksin tersebut kemudian diuji coba satu per satu pada hewan model. Proses ini memakan waktu, biaya besar, dan seringkali menghasilkan target yang kurang optimal. Dewasa ini, bioinformatika bermanfaat dalam desain vaksin yang telah memasuki era vaksinologi modern. Pendekatan baru ini dimulai dari layar komputer, dengan menganalisis *big data* dari patogen untuk memprediksi kandidat antigen terbaik secara *in silico* (melalui simulasi komputer). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi target yang sebelumnya tidak terpikirkan, lebih cepat, dan lebih presisi.

Penemuan antigen vaksin modern adalah proses bertahap yang didorong oleh data *omics*. Proses ini dimulai dengan genomik yang memetakan gen patogen dan memprediksi target permukaan sel. Data ini kemudian divalidasi oleh Proteomik melalui studi protein target. Imuno-informatika menggunakan algoritma untuk memprediksi epitop Sel B dan Sel T dengan bagian spesifik dari antigen, sehingga memungkinkan untuk memicu respons imun protektif yang kuat dan berjangka waktu panjang. Hal ini mengarahkan desain vaksin secara *in silico* sebelum memasuki fase laboratorium (Liljeroos *et al.*, 2015). Terdapat tiga pilar utama pendekatan *omics* yang mendukung desain vaksin modern, yaitu:

1. Genomik: Menganalisis seluruh sekuens DNA atau RNA patogen untuk menemukan gen yang mengkode protein-protein kunci, terutama yang berada di permukaan dan terpapar ke sistem imun inang.
2. Proteomik: Mempelajari seluruh kompleksitas protein yang diekspresikan oleh patogen, termasuk modifikasi pasca-translasi, kelimpahan, dan lokalisasinya.
3. Imunoinformatica: Cabang dari bioinformatika yang khusus menggabungkan ilmu imunologi dengan ilmu komputer untuk memprediksi bagaimana antigen berinteraksi dengan sistem imun (sel B dan sel T).

Secara garis besar, dalam tahap penemuan kandidat vaksin melalui pendekatan bioinformatika, terdapat langkah-langkah umum, diantaranya yaitu mengurutkan seluruh genom patogen. Setelah urutan genom diperoleh, analisis secara *in silico* dilakukan untuk menganotasi genom melalui identifikasi semua gen yang mungkin (*open reading frames/ORFs*). Tahap berikutnya adalah memprediksi lokalisasi protein dengan menggunakan algoritma yang dapat menentukan apakah suatu protein memiliki sinyal sekretori atau domain transmembran. Protein dengan karakteristik tersebut diasumsikan berada di permukaan sel atau disekresikan, sehingga menjadi target yang ideal untuk antibodi. Selanjutnya, analisis komparatif dengan membandingkan genom banyak strain berbeda dari patogen yang sama untuk mengidentifikasi daerah genetik yang "konservatif" (sangat mirip).

Antigen yang bersifat konservatif diharapkan mampu memberikan perlindungan yang luas terhadap berbagai varian. Selanjutnya, penelusuran terhadap fungsi berdasarkan data proteomik dilakukan untuk menganalisis protein yang benar-benar diekspresikan selama infeksi, baik pada antigen maupun pada reseptor atau sel inang (Liljeroos *et al.*, 2015). Dari sejumlah protein yang diprediksi, dipilih kandidat yang paling mungkin memicu respons imun protektif.

1. Prediksi Epitop Sel B: Epitop adalah bagian spesifik dari antigen yang dikenali oleh antibodi atau reseptor sel. Algoritma memprediksi epitop linear (urutan asam amino berurutan) dan konformasional (berdasarkan struktur 3D)

yang paling mungkin menginduksi produksi antibodi neutralisasi.

2. Prediksi Epitop Sel T: Prediksi mengenai peptida kecil dari antigen yang dapat dipresentasikan oleh Molekul MHC (*Major Histocompatibility Complex*) pada sel inang untuk diaktifkan oleh sel T. Respons sel T (khususnya CD4+ T helper dan CD8+ sitotoksik) sangat penting untuk kekebalan yang lengkap dan berumur panjang. Algoritma memprediksi afinitas pengikatan antara peptida antigen dengan berbagai alel MHC manusia yang umum. Hal ini memastikan vaksin akan efektif pada populasi yang beragam secara genetik (Abbas and Lichtman, 2022; Liljeroos *et al.*, 2015).

### ***Vaksin dan Bioproses Industri***

Bioproses adalah teknologi yang berkaitan dengan segala operasi dan proses yang memanfaatkan organisme maupun produk enzimnya untuk menghasilkan suatu produk. Bioproses industri melibatkan penggunaan sel yang dimodifikasi secara genetik dalam bioreaktor. Bioproses telah merevolusi produksi antiviral. Teknologi ini memungkinkan produksi vaksin dalam skala besar, antibodi monoklonal (mAb), interferon (IFN), dan terapi berbasis asam nukleat dengan efikasi dan keamanan yang tinggi. Vaksin dan bioproses industri memiliki hubungan yang erat. Bioproses berfungsi sebagai jalur produksi yang canggih dan terstandardisasi, yang terdiri dari tiga tahap utama.

Tahap pertama adalah *upstream processing*. Pada tahap ini, sel-sel hidup atau reaktor biokimia digunakan sebagai pabrik untuk memproduksi antigen sebagai komponen aktif vaksin. Kultur sel hewan sering digunakan. Sel-sel ini dibiakkan dalam bioreaktor raksasa yang menyediakan lingkungan steril dan terkontrol. Setelah antigen dihasilkan, proses berlanjut ke *downstream processing*, yaitu serangkaian teknik pemurnian untuk mengisolasi antigen tersebut dari segala kontaminan seperti protein seluler atau DNA, sehingga menjamin kemurnian dan keamanannya. Tahap ketiga merupakan tahap formulasi, yang dilakukan pencampuran antigen murni dengan

bahan pembantu seperti adjuvan, lalu mengisinya secara steril ke dalam vial atau jarum suntik sebelum dikemas untuk didistribusikan. Seluruh rangkaian bioproses inilah yang memungkinkan vaksin, dari jenis konvensional hingga modern, dapat diproduksi dalam skala massal dengan kualitas yang konsisten. Solusi ini menjawab tantangan kesehatan global seperti pandemi (Hadiyanto and Azim, 2009; Meade and Rowan, 2023).

### **Vaksin dalam Perspektif Kesehatan Masyarakat**

Perspektif kesehatan masyarakat mengarahkan fokus dari tingkat molekuler dan seluler menuju tingkat populasi. Di tingkat populasi, vaksin bukan lagi sekadar antigen dan adjuvant, melainkan bagian pencegahan suatu penyakit yang dirancang untuk mencapai tujuan yang lebih besar, yakni memutus mata rantai penularan penyakit dan menciptakan komunitas yang terlindungi. Kekebalan Kelompok (*herd immunity*) mengarah ke arah imunitas kelompok dan menjadi bagian logis dari program imunisasi massal. Konsep ini menggambarkan situasi dengan sebagian besar populasi telah kebal terhadap suatu penyakit, sehingga secara tidak langsung memberikan perlindungan kepada individu-individu yang rentan (seperti bayi, lansia, atau orang dengan sistem imun lemah) yang belum dapat atau belum divaksinasi. Kekebalan dalam populasi diharapkan mampu memutus rantai penularan. Ketika suatu populasi memiliki cakupan kekebalan yang tinggi, patogen akan kesulitan menemukan inang yang lemah. Vaksin memberikan perlindungan tidak langsung. Virus atau bakteri tidak memiliki kemampuan untuk menjangkiti di dalam suatu populasi yang sehat dan kebal, sehingga tidak memiliki peluang untuk menemukan target infeksi. Bagaimanapun, terdapat ambang batas kekebalan kelompok yang bervariasi untuk setiap penyakit. Hal ini bergantung pada tingkat penularannya. Semakin menular suatu penyakit, maka semakin tinggi pula cakupan vaksinasi yang dibutuhkan untuk mencapai kekebalan kelompok. Dampak kesehatan masyarakat dapat dinilai melalui indikator keberhasilan vaksinasi, antara lain:

1. Penurunan angka kesakitan (morbidity) dan kematian (mortality) seperti cacar (smallpox) yang berhasil diberantas

2. Pencegahan wabah dan epidemi dengan vaksinasi membentuk tembok pertahanan komunitas yang mencegah penyakit yang sudah terkendali untuk meletus kembali menjadi wabah.
3. Pengendalian beban ekonomi dengan semakin berkurangnya penderita yang sakit. Penyakit menular menyebabkan biaya pengobatan yang tinggi, kehilangan produktivitas, serta beban finansial bagi keluarga dan sistem kesehatan nasional. Vaksinasi adalah investasi kesehatan yang sangat *cost-effective*.
4. Peningkatan kualitas hidup melalui vaksin seperti mencegah kecacatan jangka panjang (yang disebabkan polio) dan memungkinkan anak-anak tumbuh dengan sehat, bersekolah, dan mencapai potensi mereka secara maksimal. (Baxby, 1982; Halilintar et al., 2022; Hidayati & Holifah, 2023; Lauro et al., 2021).

### **Prinsip Biologi dalam Kebijakan dan Jadwal Imunisasi**

Jadwal imunisasi yang ditetapkan oleh pemerintah dirancang berdasarkan pemahaman mendalam tentang biologi, baik biologi patogen maupun biologi sistem imun manusia. Contohnya seperti jadwal imunisasi anak yang diterbitkan oleh Ikatan Dokter Anak Indonesia (IDAI, 2023). Imunisasi merupakan proses seseorang menjadi kebal atau terlindungi dari penyakit infeksi, biasanya melalui pemberian vaksin. Ada beberapa hal yang perlu dikaji terkait imunisasi, diantaranya:

1. Waktu Pemberian: Vaksin diberikan pada usia tertentu karena beberapa pertimbangan biologis seperti:
  - a. *Window of Vulnerability*: diberikan ketika usia bayi paling rentan terhadap infeksi berat (misalnya, pertusis pada bayi baru lahir).
  - b. Kematangan Sistem Imun: diberikan ketika respons imun yang dihasilkan sudah cukup matang untuk membentuk memori yang efektif.
  - c. Interferensi dengan Antibodi Ibu: Jika vaksin diberikan terlalu dini, antibodi pasif dari ibu yang masih beredar dalam tubuh bayi dapat menetralisir

vaksin hidup (seperti campak). Oleh karena itu, pemberian vaksin perlu ditunda.

2. Dosis Penguat (*Booster*): Kadar antibodi dan jumlah sel memori dapat menurun seiring waktu. Dosis *booster* berfungsi untuk mengingatkan kembali sistem imun, memicu respons sekunder yang lebih kuat, sehingga memperpanjang durasi kekebalan. Sebagai bekal pengetahuan, konseling merupakan salah satu cara yang dapat menambah pengetahuan ibu dan masyarakat tentang pentingnya vaksin maupun *booster* (IDAI, 2023; Marini, 2020).

# DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A. K., & Lichtman, H. (2022). *Cellular and molecular immunology*. Elsevier.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2015). *Molecular biology of the cell* (6th ed.). Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.
- Baxby, D. (1982). The natural history of cowpox. *Bristol Medico-Chirurgical Journal*, 97, 12–16.
- BPOM. (2022). *Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Nomor 15 Tahun 2022 tentang penerapan farmakovigilans*.
- Flaherty, D. K. (2012). *Immunology for pharmacy*. Mosby.
- Hadiyanto, & Azim, M. (2009). *Dasar-dasar bioproses* (1st ed.). EF Press Digimedia.
- Halilintar, M. A., Erianti, S., & Sari, S. M. (2022). Gambaran persepsi masyarakat terhadap vaksinasi COVID-19 di wilayah kerja Puskesmas Harapan Raya. *Health Care: Jurnal Kesehatan*, 11(2), 264–278.
- Hidayati, L. N., & Holifah, N. (2023). Persepsi masyarakat terhadap kebijakan pemberian vaksin COVID-19 di Madura: Suatu catatan survei. *NeoRepublikca: Jurnal Ilmu Pemerintahan*, 4(2), 378–386.
- Himmah, K., Kusnanto, H., Hidajah, A. C., & Suharjito, T. (2018). Designing a polytope for use in a broad-spectrum dengue virus vaccine. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 13(2), 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2017.11.002>
- IDAI. (2023). *Jadwal imunisasi anak umur 0–18 tahun* (pp. 4–5). <https://www.idai.or.id/artikel/klinik/imunisasi/jadwal-imunisasi-anak-idai>
- Lauro, R., Irrera, N., & Eid, A. H. (2021). Could antigen presenting cells represent a protective element during SARS-CoV-2 infection in children? *Pathogens*, 10(4), 476. <https://doi.org/10.3390/pathogens10040476>
- Liljeroos, L., et al. (2015). Structural and computational biology in the design of immunogenic vaccine antigens. *Journal of*

- Immunology Research.* <https://doi.org/10.1155/2015/156241>
- Marini, Y. (2020). Konseling pada ibu tentang imunisasi DPT. *Jurnal Kesehatan dan Pembangunan*, 10(20).
- Meade, E., & Rowan, N. (2023). Bioprocessing and the production of antiviral biologics in the prevention and treatment of viral infectious disease. *Vaccines*, 11(9), 992. <https://doi.org/10.3390/vaccines11090992>
- Paramitasari, A. (2021). Mengenal vaksin dan vaksinasi dalam pandemi COVID-19. *Prosiding Webinar Komprehensif COVID-19*, (4). [Preprint].
- Ponomarenko, J., & Van Regenmortel, M. (2015). B cell epitope prediction. *Immunology Letters*, 163, 50–52. (cari volume/issue yang benar karena “January 2009” membingungkan)
- Raven, P. H., & Johnson, G. B. (2022). *Biology* (13th ed.). McGraw-Hill.
- Sinto, R., & Widhani, A. (2019). *Current challenges and opportunities in internal medicine*. Pertemuan Ilmiah Tahunan Ilmu Penyakit Dalam.
- Smith, P. (2021). Vacca: Imagining vaccination. *Spectra*, 2(2), 19–30. <https://doi.org/10.21061/spectra.v8i2.179>
- Vukovic, N., & Van Elsas, A. (2020). Isotype selection for antibody-based cancer therapy. *Clinical and Experimental Immunology*, 201, 351–365. <https://doi.org/10.1111/cei.13545>
- World Health Organization. (2025). *A brief history of vaccines*. <https://www.who.int/news-room/spotlight/history-of-vaccination/a-brief-history-of-vaccination>

## **BAB 6**

# **Industri Pangan: Bioteknologi untuk Ketahanan dan Peningkatan Mutu Bahan Pangan**

**Friska Indrian**

Industri pangan global saat ini menghadapi beragam tantangan dalam memenuhi kebutuhan pangan manusia yang terus meningkat. Dengan proyeksi populasi dunia yang diperkirakan mencapai hampir 10 miliar jiwa pada tahun 2050, permintaan terhadap pangan yang aman, bergizi, dan berkelanjutan diprediksi akan meningkat secara signifikan (FAO, 2021). Indonesia sebagai negara berpenduduk terbesar keempat di dunia, dengan jumlah penduduk sebanyak 287,6 juta jiwa dan pertumbuhan 1,09 % per tahun, turut menghadapi tekanan terhadap ketahanan pangan nasional (BPS, 2025). Tantangan tersebut semakin diperparah oleh perubahan iklim, degradasi lahan, keterbatasan air, munculnya hama dan penyakit baru, serta ketidakstabilan sistem rantai pasok global yang memengaruhi stabilitas produksi dan distribusi pangan (IPCC, 2022).

Seiring dengan meningkatnya literasi dan akses terhadap informasi, kesadaran konsumen terhadap keamanan pangan, keberlanjutan sistem produksi, dan kualitas nutrisi juga semakin meningkat. Konsumen modern menuntut produk yang tidak hanya tersedia dalam jumlah yang cukup, tetapi juga memiliki nilai tambah berupa kualitas rasa yang baik, gizi yang optimal, dan diproses melalui teknologi yang ramah lingkungan (Singh & Singhal, 2020). Transformasi industri pangan menjadi suatu keharusan strategis untuk menjawab perubahan perilaku konsumen dan tantangan global yang ada.

Berdasarkan kondisi tersebut, bioteknologi hadir sebagai solusi strategis yang mampu memperkuat ketahanan pangan sekaligus memperbaiki mutu bahan pangan. Melalui pemanfaatan biologi molekuler, mikrobiologi, rekayasa genetika, dan bioproses industri, bioteknologi menyediakan beragam inovasi yang sulit dicapai melalui metode pertanian dan pengolahan pangan konvensional (Ratledge & Kristiansen, 2020). Integrasi teknologi ini dalam industri pangan modern membuka peluang bagi terbentuknya sistem pangan yang lebih efisien, aman, inovatif, dan berkelanjutan. Peran bioteknologi tidak hanya meningkatkan produktivitas dan mutu bahan pangan, tetapi juga mendukung upaya global menuju ketahanan pangan jangka panjang serta kesehatan masyarakat.

### **Biotehnologi Pangan**

Biotehnologi merupakan disiplin ilmu yang memanfaatkan organisme hidup, bagian organisme, atau produk biologis. Prosesnya dilakukan melalui penerapan berbagai teknik untuk mengembangkan atau memodifikasi produk, meningkatkan sifat tanaman dan hewan, serta mengoptimalkan fungsi mikroorganisme untuk tujuan tertentu (Pal *et al.*, 2025). Dalam konteks pangan, biotehnologi diartikan sebagai penerapan prinsip dan teknik biologis untuk meningkatkan karakteristik, kualitas, keamanan, serta efisiensi proses pengolahan bahan pangan, baik yang berasal dari tanaman, hewan, maupun mikroorganisme (Julyasih, 2024).

Penerapan biotehnologi pangan sebenarnya telah dimulai sejak sekitar 5000 SM, ketika bangsa Sumeria dan Mesir mempraktikkan proses fermentasi untuk pembuatan bir, roti, dan *wine*. Pada masa itu, manusia belum memiliki pengetahuan ilmiah mengenai mekanisme fermentasi, serta belum memahami penyebab terjadinya proses tersebut. Pemahaman ilmiah baru berkembang pada abad ke-19 melalui penelitian Louis Pasteur, yang menjelaskan bahwa fermentasi merupakan aktivitas mikroorganisme yang menyebabkan perubahan karakteristik bahan pangan asalnya (Wikandari *et al.*, 2024). Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, biotehnologi kemudian diterapkan pada bidang pemuliaan tanaman untuk menghasilkan varietas unggul, serta digunakan dalam peningkatan kualitas ternak (Acquah, 2012;

Buchanan *et al.*, 2017). Di bidang medis, meskipun produksi pada masa lalu masih terbatas karena proses fermentasi yang belum optimal, penerapan bioteknologi awal ditandai dengan penemuan vaksin, antibiotik, dan insulin (Wash, 2018).

Bioteknologi pangan diklasifikasikan menjadi bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern. Bioteknologi konvensional merupakan bioteknologi yang memanfaatkan mikroorganisme melalui proses fermentasi untuk menghasilkan produk pangan, tanpa keterlibatan teknik enzimatis atau rekayasa genetika modern (Stanbury *et al.*, 2017). Mikroorganisme berperan dalam mengubah bahan pangan menjadi produk dengan nilai gizi lebih tinggi, memiliki tekstur dan cita rasa lebih baik, serta meningkatkan ketersediaan nutrisi melalui proses biodegradasi alami (Steinkraus, 1997). Salah satu bentuk bioteknologi konvensional adalah fermentasi. Prosesnya melibatkan pemecahan glukosa oleh mikroorganisme menjadi etanol, karbon dioksida, dan energi, sehingga menghasilkan berbagai produk seperti roti, keju, tempe, dan minuman fermentasi tanpa adanya modifikasi genetik (Madigan *et al.*, 2019). Dengan demikian, bioteknologi konvensional berperan penting dalam pengembangan awal teknologi pangan melalui pemanfaatan mikroorganisme secara alami. Beberapa contoh produk hasil bioteknologi konvensional dalam pemanfaatan mikroorganisme dapat dilihat pada Tabel 6.1.

**Tabel 6.1. Produk hasil bioteknologi konvensional**

No.	Bahan Pangan	Mikroorganisme	Produk
1	Susu	<i>Lactobacillus sp</i>	Yogurt
		<i>Streptococcus sp</i>	Mentega
		<i>Penicillium sp</i>	Keju
2	Kedelai	<i>Rhizopus sp</i>	Tempe
		<i>Aspergillus sp</i>	Kecap
3	Kacang tanah	<i>Neurospora</i>	Oncom
4	Singkong	<i>Saccharomyces sp</i> ,	Tapai singkong
		<i>Endomycopsis sp</i>	
5	Beras ketan	<i>Saccharomyces sp</i> ,	Tapai ketan
		<i>Endomycopsis sp</i>	
6	Tepung gandum	<i>Saccharomyces sp</i>	Roti
7	Kubis	<i>Enterobacter sp.</i>	Asinan
8	Kelapa	<i>Acetobacter</i>	<i>Nata de coco</i>

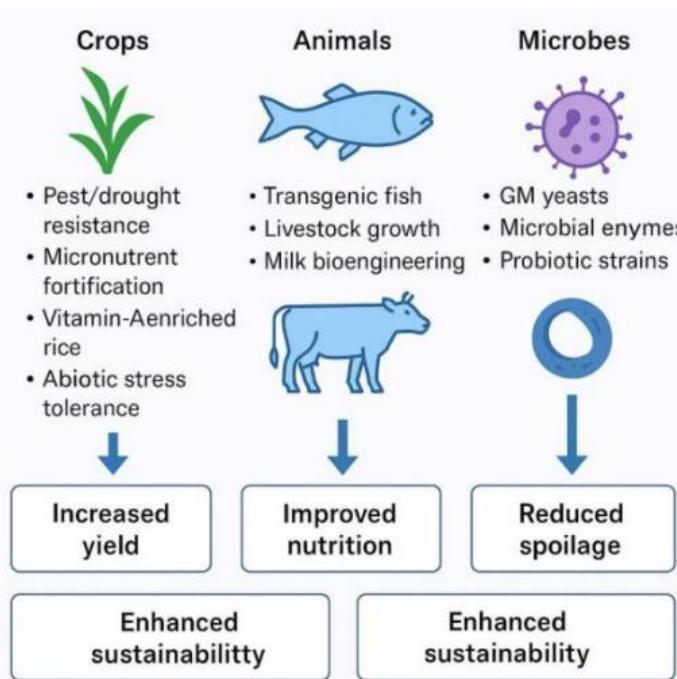
9	Padi-padian	<i>Saccharomyces sp</i>	Minuman beralkohol Pakasam
10	Ikan	<i>Lactobacillus plantarum</i> <i>Pediococcus pentosaceus</i>	<i>Sourdough bread</i>
11	Gandum	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Tempoyak
12	Durian	<i>Mesenteroides sp</i>	Kimci
13	Kubis, lobak	<i>Leuconostoc</i>	

Sumber: Julyasih, 2024; Wikandari *et al.*, 2024

Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, bioteknologi pangan modern berkembang dan diterapkan secara luas. Bioteknologi pangan modern merupakan penerapan teknik rekayasa genetika untuk menghasilkan DNA rekombinan maupun organisme transgenik yang memiliki sifat baru dan lebih unggul. Bioteknologi pangan modern dapat meningkatkan kandungan gizi melalui modifikasi genetik, yang dilakukan berdasarkan prinsip ilmiah dan integrasi pengetahuan biokimia, biomolekuler, dan rekayasa fermentasi. Teknologi ini umumnya diterapkan pada skala industri dan melibatkan berbagai disiplin ilmu. Penerapannya termasuk rekayasa genetik untuk menyisipkan gen tertentu agar organisme memiliki kemampuan baru, serta teknik hibridoma atau fusi sel untuk menghasilkan sel hibrid berfungsi khusus, seperti produksi antibodi monoklonal (Hidayati *et al.*, 2020; Lestari & Cahyani, 2021).

### Peran Bioteknologi dalam Ketahanan Pangan

Dalam mendukung ketahanan pangan, bioteknologi berperan penting melalui pengembangan rekayasa genetika pada tanaman pangan untuk menghasilkan varietas tanaman yang tahan terhadap kekeringan, salinitas, dan penyakit. Selain itu, pengembangan hewan transgenik, seperti ikan dengan pertumbuhan cepat dan hewan ternak yang tahan penyakit, turut meningkatkan efisiensi produksi pangan. Bioteknologi berbasis mikroorganisme juga berperan melalui produksi enzim, probiotik dan senyawa bioaktif, yang mendukung peningkatan kualitas dan ketersediaan pangan (Pal *et al.*, 2025). Ilustrasi mengenai peran bioteknologi dalam mendukung ketahanan pangan dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: Pal *et al.* (2025)

**Gambar 6.2 Intervensi bioteknologi dalam ketahanan pangan**

Penerapan gen toleransi tantangan, seperti DREB dan HKT1 terbukti meningkatkan kemampuan tanaman untuk bertahan pada kondisi lingkungan yang ekstrem (Latif *et al.*, 2018; Nisak & Purwestri, 2020). Untuk memperkuat upaya tersebut, berbagai inovasi bioteknologi juga diarahkan pada percepatan proses perbanyakan tanaman, sehingga ketersediaan bibit unggul dapat terpenuhi secara berkelanjutan. Di Indonesia, penerapan bioteknologi pertanian diwujudkan melalui pelepasan berbagai varietas unggul, seperti padi Inpari 30 Ciherang Sub 1, Inpari 34 Salin Agritan, dan Inpago 12. Selain itu, penerapan lain juga dilakukan melalui pemanfaatan kultur jaringan untuk menghasilkan bibit tanaman hortikultura yang lebih sehat, seragam, dan produktif. Berbagai penelitian nasional menunjukkan bahwa pendekatan bioteknologi tersebut efektif dalam meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim, serta tekanan biotik dan abiotik (Widiastuti & Nuraini, 2023). Selain

pengembangan varietas unggul, upaya penguatan ketahanan pangan juga memerlukan teknologi perbanyak tanaman yang mampu menyediakan bibit secara berkelanjutan.

Teknologi kultur jaringan semakin memperkuat sistem penyediaan bibit nasional melalui kemampuan memperbanyak tanaman secara cepat, seragam, dan bebas patogen. Bibit kultur jaringan pada pisang, ubi jalar, tebu, atau kentang terbukti meningkatkan produktivitas, karena bebas virus dan lebih adaptif terhadap lingkungan (George *et al.*, 2008; Hapsoro *et al.*, 2020). Dalam skala nasional, laboratorium kultur jaringan berperan penting dalam menyediakan bibit komoditas strategis secara konsisten, sekaligus mendukung konservasi plasma nutfah melalui bank gen *in vitro* (Sudarmonowati & Hartati, 2011; Makhkamov *et al.*, 2019).

Sejalan dengan upaya peningkatan produksi tanaman, sektor peternakan dan perikanan juga mengalami perkembangan signifikan melalui penerapan bioteknologi. Contohnya seperti penggunaan probiotik, pakan fermentasi, maupun modifikasi genetik yang mampu meningkatkan efisiensi metabolisme dan performa produksi (Zhou *et al.*, 2020). Di Indonesia, penggunaan probiotik pada ternak dan ikan terbukti meningkatkan kesehatan saluran pencernaan, konversi pakan, serta ketahanan terhadap penyakit, sehingga banyak direkomendasikan dalam praktik budidaya nasional (Hidayat & Marlinda, 2018). Fermentasi pakan menggunakan *Lactobacillus plantarum* atau *Aspergillus niger* juga dilaporkan mampu meningkatkan kecernaan nutrien dan menekan limbah organik, sehingga sesuai untuk diterapkan pada unit peternakan dan perikanan skala kecil (Putra *et al.*, 2020). Selain itu, penerapan sistem bioflok dan probiotik terbukti meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi pakan, sehingga menjadi standar pada berbagai budidaya ikan dan udang (KKP, 2021; Suryaningrum *et al.*, 2022; Septriono *et al.*, 2023).

Untuk menjaga ketersediaan pangan sepanjang rantai pasok, teknologi enzimatik berperan penting dalam menekan kehilangan pangan (*food loss*), memperpanjang umur simpan, dan mempertahankan mutu produk (Rodríguez *et al.*, 2021). Fermentasi menghasilkan metabolit antimikroba yang mampu menghambat

pembusukan, sehingga memperpanjang umur simpan berbagai produk pangan (Winarno, 2018). Pemanfaatan enzim pektinase dan protease juga membantu menjaga kualitas fisik dan sensoris komoditas hortikultura, khususnya buah dan sayuran yang mudah rusak (Sari *et al.*, 2020). Selain itu, pengendalian biologis menggunakan mikroorganisme seperti *Trichoderma* atau *Bacillus subtilis*, menjadi alternatif aman dibandingkan fungisida kimia dan efektif dalam menekan patogen pascapanen (Hapsari & Yuliani, 2019). Penerapan teknologi pelapisan pangan (*edible coating*) berbasis kitosan atau alginat juga terbukti efektif menghambat respirasi dan memperlambat kerusakan buah tropis (Mubarak *et al.*, 2021). Berbagai inovasi tersebut sangat relevan bagi Indonesia yang masih menghadapi tingkat kehilangan padi, hortikultura, dan pasca panen ikan yang cukup tinggi (Irianto & Susanti, 2020).

Selain meningkatkan efisiensi produksi dan penyimpanan, bioteknologi juga memperkaya sumber pangan melalui pemanfaatan mikroorganisme. Mikroba tidak hanya digunakan untuk fermentasi tradisional seperti tempe, tetapi juga berpotensi sebagai sumber protein alternatif melalui teknologi *single cell* protein berbasis mikroalga, *yeast*, dan bakteri (Anupama & Ravindra, 2000). Mikroalga penghasil DHA dan bakteri penghasil vitamin B12 berperan dalam peningkatan nilai gizi pangan (Martínez *et al.*, 2015). Sementara itu, mikroorganisme tanah seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, dan *mikoriza* berperan dalam meningkatkan penyerapan unsur hara, sehingga mendorong peningkatan hasil panen (Singh *et al.*, 2019).

Berbagai inovasi bioteknologi tersebut menjadi fondasi bagi sistem pertanian berkelanjutan yang sangat dibutuhkan Indonesia (Sari & Yuliana, 2021). Dengan penerapan ini, bioteknologi tidak hanya memperkuat produksi dan kualitas pangan, tetapi juga menjamin keberlanjutan ekologis dan sosial dari sistem pangan nasional (Prasetyo *et al.*, 2022). Keberhasilan implementasi teknologi tersebut, didukung oleh kebijakan pemerintah, riset nasional, dan adopsi oleh petani serta industri pangan, sehingga Indonesia lebih siap menghadapi tantangan pangan global pada masa depan (Widiastuti & Nuraini, 2023).

## **Peran Bioteknologi dalam Peningkatan Mutu Bahan Pangan**

Peran bioteknologi dalam peningkatan mutu bahan pangan tampak pada berbagai inovasi yang mampu meningkatkan kualitas, baik rasa, tekstur, maupun kandungan gizi pangan (Tamang *et al.*, 2020). Penerapan bioteknologi modern seperti rekayasa genetik, pemanfaatan enzim, dan teknik fermentasi terkontrol memungkinkan industri pangan menghasilkan produk dengan nilai fungsional yang lebih tinggi dengan sifat sensori yang lebih baik (Roy & Joshi, 2024). Selain itu, pemanfaatan mikroorganisme probiotik juga memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keamanan pangan dan manfaat kesehatan, termasuk peningkatan imunitas dan kesehatan pencernaan (FAO, 2019). Inovasi-inovasi ini turut mendukung upaya perpanjangan umur simpan, pengurangan kerusakan komponen penting selama pengolahan, serta pengembangan produk pangan yang lebih adaptif terhadap kebutuhan konsumen modern (Tamang *et al.*, 2020; Coelho *et al.*, 2022).

Biofortifikasi merupakan salah satu upaya strategis di bidang pertanian untuk meningkatkan kandungan gizi mikro pada bahan pangan. Di Indonesia, pengembangan biofortifikasi telah diterapkan pada beras varietas Inpari-5 melalui teknik pemuliaan tanaman untuk meningkatkan kandungan zat besi (Fe) dan seng (Zn), sehingga tidak hanya memperbaiki nilai gizi, tetapi juga meningkatkan nilai jual komoditas tersebut. Secara global, teknologi biofortifikasi terbukti mampu meningkatkan kandungan mikronutrien pada berbagai komoditas pangan serta berperan penting dalam upaya mengatasi masalah malnutrisi (Bouis & Saltzman, 2017). Selain itu, perkembangan rekayasa genetika turut memperluas inovasi dalam produksi pangan fungsional dan nutrasetikal yang memberikan manfaat kesehatan spesifik, seperti peningkatan antioksidan dan formulasi probiotik terstandarisasi (Granato *et al.*, 2018). Dengan demikian, biofortifikasi dan rekayasa genetika menjadi dua pendekatan bioteknologi yang berkontribusi besar dalam peningkatan mutu gizi dan kesehatan masyarakat.

Pemanfaatan mikroorganisme hasil rekayasa genetik dalam industri pangan merupakan salah satu inovasi penting yang berperan

untuk meningkatkan nutrisi berbagai produk pangan. Beberapa mikroorganisme yang telah dimodifikasi secara genetik seperti *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus* sp., dan *Escherichia coli* diketahui dapat meningkatkan produksi vitamin, asam amino esensial, serta senyawa bioaktif lain yang bermanfaat bagi kesehatan manusia (Du & Shao, 2011; Rusu *et al.*, 2023). Modifikasi *Saccharomyces cerevisiae* dengan gen pengkode sintesis riboflavin terbukti meningkatkan produksi riboflavin pada proses fermentasi roti hingga 150% dibandingkan dengan strain alami (Schwecheimer *et al.*, 2018). Hasil penelitian lain juga menunjukkan bahwa *Lactobacillus plantarum* yang direkayasa dengan gen biosintesis folat dapat meningkatkan kadar folat pada produk susu fermentasi hingga tiga kali lipat dibandingkan metode fermentasi konvensional (Santos *et al.*, 2008).

Peningkatan mutu pangan juga dapat dicapai melalui pemanfaatan mikroorganisme, salah satunya adalah bakteri asam laktat (BAL) yang berperan penting dalam proses fermentasi dan pengembangan pangan fungsional. BAL meningkatkan mutu produk pangan melalui pemanfaatan sifat probiotiknya yang bermanfaat bagi kesehatan, seperti memperbaiki fungsi pencernaan dan meningkatkan daya tahan tubuh. Di Indonesia, beberapa produk komersial yang menggunakan BAL antara lain BIO®, Actimel®, LC1®, dan Yakult® (Raj, *et al.*, 2022).

Pemanfaatan BAL telah berkembang luas dalam industri pangan, yang meliputi proses fermentasi pada susu, daging, sayur, dan buah-buahan. Fermentasi susu dengan *Lactobacillus* sp., menghasilkan berbagai produk seperti yogurt, *shrikhand*, *dahi* susu mentega, kefir, dan keju. Produk-produk tersebut diketahui dapat memberikan dampak positif dalam mengendalikan penyakit kardiovaskular terkait hipertensi (Coelho *et al.*, 2022). Pada bahan pangan berbasis daging, fermentasi mampu menghambat pertumbuhan bakteri patogen, menjadi metode pengawetan melalui pengasaman biologis yang berenergi rendah, sekaligus meningkatkan karakteristik sensori seperti rasa, kelezatan, warna, tekstur, dan nilai gizi (Xiang *et al.*, 2019). Contoh produk fermentasi daging tersebut meliputi salami dari Italia, *salchichom* dan *chorizo* dari Irlandia, serta stik daging sapi dan pepperoni di Amerika (Dwinanti *et al.*, 2025). Sementara itu, fermentasi sayur dan buah-

buahan seperti pada produk kimchi dan tempoyak yang melibatkan *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, dan *Weisella*, diketahui memberikan berbagai efek fungsional, termasuk sifat probiotik, anti-penuaan, anti-inflamasi, antibakteri, antiobesitas, dan antikanker (Xiang *et al.*, 2019; Ardilla *et al.*, 2022).

Pemanfaatan enzim memungkinkan terjadinya modifikasi komponen nutrisi, sehingga menghasilkan produk dengan karakteristik yang lebih baik, seperti sirup glukosa, roti bermutu tinggi, produk susu dengan tekstur lebih halus, serta diaplikasikan pula pada pengolahan daging (de Souza *et al.*, 2019). Salah satu enzim yang berperan penting adalah transglutaminase (TGase), yang mampu meningkatkan tekstur, daya ikat air, maupun kemampuan pembentukan gel tanpa mengubah kualitas nutrisi produk yang kaya protein (Susanti *et al.*, 2025). Penelitian Fadhlurrohman *et al.* (2025) menunjukkan bahwa penambahan TGase pada berbagai jenis daging (sapi, ayam dan babi) dapat meningkatkan daya ikat air, menurunkan susut masak, dan memperbaiki kekenyalan produk akhir. Selain itu, penggunaan enzim papain kasar juga terbukti meningkatkan keempukan, daya ikat air, dan cita rasa pada daging kuda tua afkir. Keempukan tersebut terjadi karena aktivitas enzim proteolitik yang memecah jaringan pengikat dan endomisium yang menyelubungi serabut-serabut daging menjadi serabut amorf (Utami *et al.*, 2014). Dalam industri pangan lainnya, enzim protease pada adonan tepung mampu mempengaruhi mutu produk gorengan dengan meningkatkan rasa gurih dan kerenyahan akibat hidrolisis gluten menjadi fragmen berukuran lebih pendek (Burhan *et al.*, 2024). Dengan demikian, berbagai jenis enzim memiliki kontribusi penting dalam meningkatkan kualitas produk pangan melalui mekanisme biokimia yang spesifik dan efisien.

### **Bioteknologi dalam Industri Pangan Berkelanjutan**

Penerapan bioteknologi menjadi salah satu pilar strategis dalam pembangunan industri pangan berkelanjutan, terutama di tengah meningkatnya tuntutan terhadap pangan yang aman, bergizi, dan ramah lingkungan. Tantangan global seperti perubahan iklim, degradasi lahan, keterbatas air, maupun meningkatnya kesadaran konsumen terhadap

keamanan dan keberlanjutan pangan, menuntut adanya inovasi pada seluruh rantai produksi. Dalam konteks ini, bioteknologi menawarkan solusi strategis dengan menyediakan pendekatan ilmiah untuk meningkatkan efisiensi dan menciptakan produk pangan bernilai tambah tinggi (Winarno, 2018; Prasetyo *et al.*, 2022).

Selain itu, bioteknologi memungkinkan optimalisasi proses produksi pangan melalui pemanfaatan mikroorganisme, enzim, dan rekayasa genetika, yang mampu meningkatkan kualitas, kuantitas, serta keamanan produk (Suryani & Rahmawati, 2019). Inovasi seperti fermentasi presisi, kultur jaringan, biofortifikasi, dan pengembangan protein alternatif berbasis mikroba telah menunjukkan potensi besar dalam mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya konvensional yang semakin terbatas (FAO, 2021). Di Indonesia, pemanfaatan bioteknologi dalam industri pangan juga mulai diarahkan untuk meningkatkan nilai tambah komoditas lokal melalui pengembangan pangan fungsional, biokonversi limbah hasil pertanian dan perikanan, serta penguatan ketahanan pangan berbasis biodiversitas nasional (Nurhayati *et al.*, 2021). Pendekatan ini tidak hanya mendukung efisiensi proses produksi, tetapi juga memperkuat daya saing industri pangan domestik dalam menghadapi dinamika pasar global yang semakin kompetitif (Wibowo *et al.*, 2020; Kementerian Pertanian RI, 2020).

Melalui berbagai contoh tersebut, terlihat bahwa kontribusi bioteknologi tidak berhenti pada peningkatan hasil panen, tetapi mengalir hingga ke industri pangan, sehingga menciptakan sistem produksi yang lebih hemat energi, rendah emisi, dan minim limbah. Transformasi ini menjadi fondasi penting menuju ketahanan pangan jangka panjang.

### **Tantangan, Risiko, dan Regulasi Bioteknologi Pangan**

Meskipun memiliki potensi yang besar dalam menghasilkan produk pangan yang lebih efisien dan ramah lingkungan, pengembangan bioteknologi pangan tetap menghadapi berbagai tantangan dan risiko yang harus dikelola secara hati-hati. Salah satu isu utama adalah kekhawatiran tentang keamanan hayati, keamanan

pangan, potensi kontaminasi silang, serta dampaknya terhadap lingkungan, terutama kegiatan yang terkait rekayasa genetika (Ari *et al.*, 2024; Falk *et al.*, 2002; Lerner *et al.*, 2024; Mahdewi & Banjarani, 2020). Mikroorganisme hasil rekayasa genetik yang dilepas ke lingkungan berpotensi berinteraksi dengan mikroflora alami, sehingga dapat menyebabkan perubahan pada ekosistem mikroba. Keamanan produk pangan juga menjadi aspek krusial dalam pemanfaatan mikroorganisme rekayasa genetik, karena terdapat potensi risiko terkait kemungkinan munculnya toksisitas atau reaksi alergi terhadap konsumen. Kekhawatiran ini mendorong perlunya uji keamanan yang ketat dan pengawasan yang komprehensif untuk menilai potensi toksisitas maupun efek samping pada konsumen yang dapat ditimbulkan dari penggunaan mikroorganisme tersebut (Rustan *et al.*, 2025).

Selain risiko biologis tersebut, tantangan lain yang tidak kalah penting berkaitan dengan aspek regulasi dan kerangka hukum yang mengatur pemanfaatan bioteknologi pangan. Banyak negara, termasuk Indonesia, mensyaratkan prosedur penilaian risiko yang ketat melalui analisis keamanan hayati, uji toksisitas, maupun evaluasi dampak ekologi sebelum suatu produk dapat dipasarkan. Namun, implementasi regulasi ini seringkali menghadapi kendala, seperti keterbatasan kapasitas laboratorium, kurangnya harmonisasi standar antar instansi, serta rendahnya literasi bioteknologi di kalangan produsen dan masyarakat (BPOM, 2022; Kementeran RI, 2023). Selain itu, isu sosial-ekonomi juga muncul sebagai tantangan, termasuk kekhawatiran publik terhadap organisme hasil rekayasa genetika (GMO), resistensi terhadap penerimaan produk baru, dan potensi dominasi pasar oleh industri besar sehingga menghambat partisipasi UMKM. Oleh karena itu, penguatan regulasi, transparansi informasi, peningkatan kapasitas pengawasan, serta edukasi publik menjadi langkah kunci untuk memastikan bahwa pemanfaatan bioteknologi pangan berjalan aman, etis, dan berkelanjutan.

Aspek risiko sosial dan ekonomi dalam pemanfaatan bioteknologi pangan juga perlu mendapat perhatian serius. Salah satu isu yang sering disoroti adalah potensi dominasi pasar benih oleh perusahaan berskala

besar, yang dikhawatirkan dapat mengurangi keberagaman benih lokal dan melemahkan kemandirian petani (Shiva, 2016). Di Indonesia, risiko tersebut dapat memberikan dampak signifikan, terutama bagi petani kecil. Regulasi harus memberikan perlindungan yang memadai terhadap akses, kedaulatan benih, dan keberlanjutan varietas lokal. Oleh karena itu, integrasi kebijakan bioteknologi dengan kerangka perlindungan sumber daya genetik, sebagaimana diatur dalam UU No. 11/2013 tentang Konservasi Keanekaragaman Hayati, menjadi sangat penting agar pengembangan inovasi tetap berkeadilan dan tidak menimbulkan kerentanan sosial-ekonomi.

Dengan demikian, meskipun bioteknologi membuka peluang besar bagi ketahanan pangan dan industri berkelanjutan, keberhasilannya sangat bergantung pada regulasi yang adaptif, transparansi ilmiah, penguatan sistem pengawasan, dan sosialisasi publik. Pendekatan yang mengalir antara inovasi, industri, dan kebijakan inilah yang menentukan keberlanjutan implementasi teknologi dalam sistem pangan Indonesia.

# DAFTAR PUSTAKA

- Acquaah, G. (2012). *Principles of plant genetics and breeding* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Ardilla, Y. A., Anggreini, K. W., & Rahmani, T. P. (2022). Peran bakteri asam laktat indigen genus Lactobacillus pada fermentasi buah durian (*Durio zibethinus*) sebagai bahan pembuatan tempoyak. *Berkala Ilmiah Biologi*, 13(2), 42–52.
- Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49–58.
- Buchanan, J. W., Fletcher, D. L., & Stadelman, W. J. (2017). *Animal biotechnology*. Elsevier.
- Coelho, M. C., Malcata, F. X., & Silva, C. C. G. (2022). Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: From starter cultures to probiotic functions. *Foods*, 11(15).
- de Souza, P. M., Bittencourt, M. L., Caprara, C. C., de Freitas, M., Almeida, R. P. C., Silveira, D., & Fonseca, Y. M. (2019). Enzymes in food processing: A review. *Food Technology and Biotechnology*, 57(2), 307–323.
- Dwinanti, E. F., Nelina, I. R., & Prasetyo, F. H. (2025). Potensi bakteri asam laktat (BAL) untuk meningkatkan mutu produk pangan. *Jurnal Penelitian Biologi dan Terapannya*, 8(3), 263–278.
- FAO. (2021). *The state of food security and nutrition in the world*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Granato, D., Barba, F. J., Kovačević, D. B., Lorenzo, J. M., Cruz, A. G., & Putnik, P. (2018). Functional foods: Product development, technological trends, and health benefits. *Food Research International*, 103, 1–11.
- Hapsari, N., & Yuliani, S. (2019). Pengendalian hayati patogen pascapanen menggunakan mikroorganisme antagonis pada buah dan sayuran. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 10(2), 125–134.
- Hidayati, N., Sari, D. P., & Wulandari, R. (2020). Aplikasi bioteknologi modern dalam peningkatan kualitas pangan. *Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia*, 7(2), 145–154.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*.
- Irianto, G., & Susanti, S. (2020). Analisis kehilangan hasil pertanian dan strategi pengurangan food loss di Indonesia. *Jurnal Pangan*, 29(1), 45–56.
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2021). *Pedoman teknis budidaya ikan sistem bioflok*. Jakarta, Indonesia.
- Lathif, Y., Listyorini, D., & Suharti, S. (2018). Varietas padi lokal Jawa Timur tahan cekaman kekeringan berdasarkan gen DREB2A. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, 6(3), 45–52.
- Lestari, R., & Cahyani, T. A. (2021). Rekayasa genetik dan pemanfaatannya dalam industri pangan. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan Indonesia*, 12(1), 33–42.
- Madigan, M. T., et al. (2019). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Mubarak, A., Hidayati, N., & Utami, R. (2021). Aplikasi edible coating kitosan dan alginat untuk memperpanjang umur simpan buah tropis. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 32(2), 97–106.
- Nisak, R. R., & Purwestri, Y. A. (2020). Respons biokimiawi dan ekspresi gen OsSOS1, OsNHX1 dan OsHKT1;1 terhadap cekaman salinitas pada padi (*Oryza sativa* L. ‘Merah’) Kalimantan Selatan [Master’s thesis, Universitas Gadjah Mada].
- Prasetyo, B., Lestari, D., & Hasanah, T. (2022). Aplikasi bioteknologi dalam pengembangan varietas padi toleran salinitas di Indonesia. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 41(1), 1–10.
- Raj, T., Chandrasekhar, K., Kumar, A. N., & Kim, S.-H. (2022). Recent biotechnological trends in lactic acid bacterial fermentation for food processing industries. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 2(1), 14–40.
- Ratledge, C., & Kristiansen, B. (2020). *Basic biotechnology* (5th ed.). Cambridge University Press.
- Rodríguez, M., Núñez, F., & Córdoba, J. J. (2021). Biopreservation: An eco-friendly approach to food safety and shelf-life extension. *Current Opinion in Food Science*, 38, 54–60.

- Sari, W., Putri, D. A., & Lestari, H. (2020). Pemanfaatan enzim pektinase dan protease dalam peningkatan mutu produk hortikultura. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 15(1), 11–19.
- Sari, R., & Yuliana, N. (2021). Pemanfaatan marka molekuler dalam pemuliaan tanaman toleran cekaman abiotik. *Jurnal AgroBiogen*, 17(2), 85–94.
- Septriono, W. A., Indrian, F., Khairunnisa, S., & Gultom, E. R. (2023). Penggunaan mikroorganisme akuatik pada proses nitrifikasi di tambak udang (*Litopenaeus vannamei*). *MAIYAH*, 2(3), 233–239.
- Singh, R. P., & Singhal, R. S. (2020). Science and technology of food processing: Current advances and future prospects. *Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 2317–2330.
- Stanbury, P. F., Whitaker, A., & Hall, S. J. (2017). *Principles of fermentation technology* (3rd ed.). Elsevier.
- Steinkraus, K. H. (1997). Classification of fermented foods. *Food Control*, 8(5–6), 311–317.
- Suryaningrum, D., Prasetyo, A. F., & Lestari, R. (2022). Aplikasi probiotik lokal pada budidaya ikan air tawar berbasis bioflok. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 21(1), 45–56.
- Tamang, J. P., Cotter, P. D., Endo, A., Han, N. S., Kort, R., Liu, S. Q., ... & Hutkins, R. W. (2020). Fermented foods in a global age: Health benefits and future challenges. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 17(10), 620–632.
- Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967), 818–822.
- Walsh, G. (2018). *Biopharmaceuticals: Biochemistry and biotechnology* (3rd ed.). Wiley.
- Widiastuti, H., & Nuraini, S. (2023). Peran kultur jaringan dalam penyediaan bibit unggul tanaman hortikultura. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 14(1), 52–61.
- Winarno, F. G. (2018). Peran fermentasi dalam pengawetan pangan dan peningkatan nilai nutrisi. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, 6(3), 150–158.

- Xiang, H., Sun-Waterhouse, D., Waterhouse, G. I. N., Cui, C., & Ruan, Z. (2019). Fermentation-enabled wellness foods: A fresh perspective. *Food Science and Human Wellness*, 8(3), 203–243.
- Zhou, L., Fang, W., & Xu, X. (2020). Biotechnology in animal nutrition: Probiotics, enzymes, and microbial feed additives. *Animal Nutrition*, 6(4), 389–395.

## BAB 7

# Industri Energi: Pengembangan Energi Biofuel dan Energi dari Keanekaragaman Hayati

**Refer Iqbal Tawakkal**

Transisi energi didorong oleh kebutuhan mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil, menurunkan emisi gas rumah kaca, dan meningkatkan keamanan energi seiring permintaan yang meningkat. Banyak negara menetapkan target energi terbarukan dan kebijakan pengurangan emisi, dengan trilemma energi (keamanan, ekuitas, dan keberlanjutan) sebagai kerangka evaluasi. Perubahan iklim mempercepat alih teknologi ke sumber rendah karbon untuk memenuhi target iklim, mengurangi risiko ekonomi dan kerentanan harga bahan bakar fosil. Keanekaragaman hayati menawarkan *feedstock* dan solusi untuk bioenergi berkelanjutan (minyak nabati, lignoselulosa, biomassa lahan marginal, mikroalga, dll), yang dapat mendiversifikasi pasokan dan mengurangi konflik dengan pangan. Eksplorasi biodiversitas harus diatur dengan penilaian dampak ekologi, pemilihan *feedstock* nonkompetitif terhadap pangan, dan desain lanskap yang menjaga fungsi habitat agar tidak mempercepat kehilangan keanekaragaman (Wardhana & Marifatullah, 2020).

### **Konsep Bioenergi dan *Biofuel***

*Biofuel* dipandang sebagai solusi praktis untuk mendukung dekarbonisasi sektor energi, khususnya pada sektor transportasi. Secara umum, *biofuel* merujuk pada bahan bakar padat, cair, atau gas yang mengandung biomassa, atau pada cairan dan gas yang digunakan

sebagai bahan bakar transportasi yang berasal dari sumber hayati. Fungsi utama *biofuel* meliputi penggantian langsung bahan bakar fosil, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta peningkatan ketahanan energi melalui diversifikasi pasokan. Pengakuan terhadap peran *biofuel* dalam kebijakan energi nasional dan internasional semakin menguat sejalan dengan upaya menurunkan emisi dan mengurangi ketergantungan pada impor bahan bakar fosil (Sulasminingsih *et al.*, 2023).

### **Definisi Bioenergi dan *Biofuel***

Bioenergi merupakan salah satu sumber energi terbarukan dan salah satu bidang pengembangan utama. Bioenergi adalah energi yang dihasilkan dari biomassa yang berasal dari bahan hayati dan kotoran hewan. Secara konseptual, bioenergi menggabungkan dimensi ekologis dan teknis. Biomassa menyimpan energi matahari melalui fotosintesis dan melepaskan kembali energi tersebut ketika dikonversi, sehingga penggunaan bioenergi yang berkelanjutan mensyaratkan pengelolaan stok biomassa yang mempertahankan keseimbangan karbon dan fungsi ekosistem. Pendekatan ini menuntut pemahaman mendalam tentang *ketersediaan feedstock*, intensitas input (air, pupuk, dan lahan), dan efisiensi konversi teknologi, serta faktor-faktor yang menentukan apakah bioenergi benar-benar memberikan manfaat mitigasi iklim dibandingkan bahan bakar fosil (Chum, 2011).

*Biofuel* merupakan bahan bakar terbarukan yang menjanjikan. *Biofuel* dapat didefinisikan sebagai bahan bakar padat, cair, atau gas yang mengandung biomassa. Saat ini, *biofuel* diakui sebagai bahan penting untuk mengurangi emisi gas ke udara dan meningkatkan ketahanan energi masyarakat dunia (Sulasminingsih *et al.*, 2023). *Biofuel* adalah bahan bakar yang dihasilkan dari biomassa dan dirancang untuk menggantikan atau dicampurkan dengan bahan bakar fosil. Definisi operasionalnya harus mengaitkan asal biomassa, jalur konversi, dan kriteria keberlanjutan untuk menilai manfaat iklim dan sosial-ekonomi secara menyeluruh (McKendrey, 2002).

## **Keanekaragaman Hayati sebagai Sumber Daya Energi**

Keanekaragaman hayati merupakan fondasi penting bagi penyediaan sumber daya energi terbarukan, terutama dalam konteks biomassa dan *biofuel*. Konsep ini mengacu pada variasi genetik, spesies, dan ekosistem yang menyediakan beragam materi biologis yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi modern. Pemanfaatan keanekaragaman hayati dalam sektor energi menjadi semakin penting seiring meningkatnya tekanan global untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK). Keanekaragaman hayati menawarkan potensi sumber energi yang berkelanjutan karena sifatnya yang dapat diperbarui melalui siklus biologis (Tilman *et al.*, 2009).

Secara ekologis, biomassa dari keanekaragaman hayati memiliki karakteristik unik karena berasal dari berbagai organisme biologis, termasuk tanaman darat, mikroalga, bakteri, jamur, maupun limbah organik dari aktivitas pertanian dan perikanan. Jenis-jenis tanaman seperti jagung (*Zea mays*), tebu (*Saccharum officinarum*), kelapa sawit (*Elaeis guineensis*), jatropha (*Jatropha curcas*), maupun tanaman energi non-pangan seperti *misanthus* dan switchgrass telah dikenal sebagai sumber potensial bioenergi. Mikroalga, di sisi lain, memiliki keunggulan karena produktivitas lipidnya yang tinggi dan kemampuan tumbuh pada ruang terbatas, sehingga dinilai lebih efisien dibandingkan tanaman darat (Chisty, 2007).

## **Strategi Energi Berbasis Ekosistem dan Produk Hayati**

Strategi energi berbasis ekosistem dan produk hayati merupakan pendekatan transformatif dalam pembangunan energi terbarukan yang mengintegrasikan pemanfaatan sumber daya biologis dengan pengelolaan ekosistem secara berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada produksi energi, tetapi juga mempertimbangkan fungsi ekologis, keberlanjutan sumber daya, keanekaragaman hayati, serta tata kelola lanskap yang adaptif terhadap perubahan iklim. Dalam kerangka transisi energi global, strategi ini menjadi sangat relevan karena mampu menjawab tantangan multidimensional terkait

krisis energi, degradasi lingkungan, dan urgensi mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) (IPCC, 2022).

Konsep strategi energi berbasis ekosistem menekankan bahwa produksi energi harus didasarkan pada fungsi ekologis yang tidak merusak struktur dan komposisi habitat alami. Ekosistem seperti mangrove, padang lamun, rawa gambut, dan agroforestri bukan hanya menyediakan biomassa dan substrat biologis untuk energi, tetapi juga berfungsi sebagai penyimpan karbon alami (*carbon sinks*), pelindung pesisir, penyedia habitat fauna, serta regulator hidrologi (Murdiyarso *et al.*, 2015).

Produk hayati (*bio-based products*) yang menjadi bagian dari strategi ini meliputi *biofuel* (bioetanol, biodiesel, biogas, dan biohidrogen), biochar, biomaterial, hingga biopolimer yang semuanya bersumber dari biomassa. Pendekatan multi-produk ini sesuai dengan prinsip *biorefinery*. Prinsip ini menjelaskan bahwa biomassa diproses secara terpadu untuk menghasilkan energi dan produk bernilai tambah tinggi, sehingga meningkatkan efisiensi ekonomi serta mengurangi limbah (Cherubini, 2010). Dengan demikian, energi tidak lagi dipandang sebagai produk tunggal, tetapi sebagai bagian dari sistem produksi sirkular yang mendukung ekonomi rendah karbon.

Untuk memastikan keberlanjutan implementasi strategi energi berbasis ekosistem, diperlukan tata kelola lanskap yang berbasis ilmu ekologi dan konservasi. Salah satu pendekatan yang mulai banyak diterapkan adalah *integrated landscape management*, yaitu model pengelolaan wilayah yang mempertimbangkan multifungsi lahan untuk pertanian, konservasi, pemukiman, dan energi dalam satu kerangka spasial. Pendekatan ini menurunkan risiko konflik kepentingan antara produksi energi dan ketahanan pangan, sekaligus mencegah hilangnya biodiversitas akibat ekspansi monokultur tanaman energi (Sayer *et al.*, 2013).

### **Jenis-Jenis *Biofuel***

Pengembangan *biofuel* telah menjadi fokus strategis dalam diversifikasi sumber energi global, terutama sebagai alternatif terhadap bahan bakar fosil yang tidak terbarukan dan berkontribusi terhadap

emisi gas rumah kaca (Demirbas, 2017). *Biofuel* dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk, sumber biomassa, maupun proses biokonversinya. Secara umum, *biofuel* modern dikategorikan ke dalam tiga kelompok utama, yaitu bioetanol, biodiesel, dan biogas (Balat, 2011).

### ***Bioetanol***

Bioetanol diproduksi melalui fermentasi gula dari biomassa kaya karbohidrat (misalnya tebu, jagung, dan singkong) menggunakan mikroorganisme, kemudian dimurnikan dengan destilasi untuk mencapai kadar yang sesuai aplikasi energi. Dalam praktiknya, bioetanol umum digunakan sebagai campuran bensin (misalnya E10–E20) guna meningkatkan angka oktan dan menurunkan emisi tertentu, dengan implikasi teknis pada logistik, kualitas bahan baku, dan kompatibilitas mesin pembakaran dalam. Penjelasan mengenai sumber bahan baku dan jalur proses fermentasi dan destilasi menjadi penanda bahwa bioethanol sangat bergantung pada produktivitas pertanian dan infrastruktur pemrosesan biomassa.

Dari perspektif generasi teknologi, bioetanol “*first-generation*” (berbasis pati/gula) menghadapi isu *food-versus-fuel*, sementara “*second-generation*” yang memanfaatkan lignoselulosa (seperti jerami atau residu kehutanan) menuntut praproses de-lignifikasi dan hidrolisis enzimatik yang lebih kompleks. Pada skala sistem, bioetanol menghasilkan ko-produk (misalnya *distillers dried grains with solubles/DDGS*) yang relevan bagi pakan, namun tetap memerlukan evaluasi daur hidup (*life cycle assessment*) terhadap jejak karbon, penggunaan lahan, dan air. Implikasi kebijakan menyangkut insentif campuran bensin, standar mutu, dan pengembangan rantai pasok biomassa yang berkelanjutan.

Bioetanol merupakan bahan bakar cair berbasis alkohol ( $C_2H_5OH$ ) yang dihasilkan melalui fermentasi biomassa kaya karbohidrat, seperti tebu, jagung, singkong, dan lignoselulosa (Nigam & Singh, 2011). Proses pembentukan bioetanol melibatkan hidrolisis bahan baku menjadi monosakarida, yang diikuti fermentasi menggunakan mikroorganisme, terutama *Saccharomyces cerevisiae*. Bioetanol banyak digunakan sebagai bahan bakar campuran, misalnya

E10 (10% etanol dan 90% bensin) hingga E85 untuk kendaraan *flexible fuel*.

Selain sebagai energi terbarukan, bioetanol juga berfungsi meningkatkan angka oktan, sehingga dapat memperbaiki kualitas pembakaran mesin (Chum & Overend, 2001). Bagaimanapun, tantangan utama dalam produksi bioetanol adalah kompetisi dengan bahan pangan serta kebutuhan teknologi *pretreatment* (pra-perlakuan) untuk biomassa lignoselulosa yang masih memerlukan biaya tinggi.

### ***Biodiesel***

Biodiesel diproduksi dari minyak nabati (seperti sawit, kedelai, jarak pagar) atau lemak hewan melalui reaksi transesterifikasi dengan alkohol (umumnya metanol atau etanol) menggunakan katalis. Produk yang dihasilkan adalah *fatty acid alkyl esters* (FAME) yang kompatibel dengan mesin diesel. Biodiesel dikenal lebih rendah sulfur, bersifat *biodegradable*, dan dapat digunakan dalam berbagai kadar campuran (B20–B100) dengan penyesuaian pada properti aliran dingin dan stabilitas oksidatif. Kualitas dan keberlanjutan biodiesel ditentukan oleh jenis bahan baku, efisiensi proses, dan pengelolaan ko-produk (gliserol), serta tata kelola penggunaan lahan untuk mencegah deforestasi dan kebocoran karbon tidak langsung (*Indirect Land Use Change/ILUC*).

### ***Biogas***

Biogas dihasilkan dari pencernaan anaerobik limbah organik (kotoran ternak, residu pertanian, dan/atau sampah organik) yang memproduksi campuran gas yang didominasi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), untuk aplikasi memasak, pembangkitan listrik, atau bahan bakar kendaraan setelah pemurnian menjadi biometana. Berbeda dengan bioetanol dan biodiesel yang berbasis bahan baku primer, biogas berorientasi pada pengolahan limbah dan penyerapan emisi metana, sehingga memiliki manfaat ganda: lingkungan dan energi. Kinerja biogas bergantung pada komposisi substrat, desain *digester*, suhu operasi (mesofilik/termofilik), dan proses *upgrading*

(penghilangan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, dan/atau uap air) untuk mencapai kualitas bahan bakar yang konsisten.

### **Generasi *Biofuel***

Pengelompokan generasi *biofuel* menyediakan kerangka konseptual untuk menilai potensi teknis, dampak lingkungan, dan implikasi sosial-ekonomi dari jalur produksi bioenergi. Generasi *biofuel* tidak hanya membedakan *feedstock*, tetapi juga kompleksitas proses konversi dan konsekuensi sistemik terhadap penggunaan lahan, emisi, dan ketahanan pangan. *Biofuel* diklasifikasikan ke dalam beberapa generasi berdasarkan sumber biomassa, teknologi produksi, kompetisi dengan pangan, dan dampak lingkungan. Pembagian ini menunjukkan perkembangan teknologi bioenergi dari tahap konvensional hingga tahap maju berbasis rekayasa biologi dan ekologi industri (Cavelius *et al.*, 2023).

Perkembangan *biofuel* sebagai sumber energi alternatif tidak hanya terkait pada diversifikasi bahan bakar, tetapi juga pada evolusi pendekatan teknologi dan pemanfaatan biomassa yang lebih berkelanjutan. Konsep generasi *biofuel* muncul sebagai klasifikasi berdasarkan jenis bahan baku, teknologi produksi, serta dampak sosial-lingkungan yang dihasilkan (Sims *et al.*, 2010). Secara umum, *biofuel* dikategorikan ke dalam empat generasi, masing-masing mencerminkan peningkatan inovasi dan efisiensi dalam rantai produksi energi berbasis biomassa (Karp & Richter, 2011).

#### ***Bioenergi Biofuel Generasi Pertama: Sumber Bahan Pangan***

*Biofuel* generasi pertama merujuk pada jalur produksi bahan bakar cair dan padat yang menggunakan tanaman pangan atau minyak nabati sebagai bahan baku utama, seperti etanol dari tebu dan jagung serta biodiesel dari minyak sawit atau kedelai (Tabel 7.1). Teknologi produksi pada tahap ini relatif matang dan telah diadopsi secara komersial di banyak negara, sehingga memberikan kontribusi nyata terhadap diversifikasi pasokan energi dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil dalam jangka pendek (Sims *et al.*, 2008).

Secara agronomi dan ekonomi, *biofuel* generasi pertama memiliki keunggulan operasional: infrastruktur pengolahan (pabrik gula dan kilang minyak) dan pasar komoditas yang sudah ada mempermudah integrasi ke rantai pasok energi. Bagaimanapun, penggunaan komoditas pangan menimbulkan isu *food versus fuel* yang kompleks. Peningkatan permintaan untuk *feedstock biofuel* dapat mendorong alih guna lahan, volatilitas harga pangan, serta tekanan terhadap sumber daya air dan input agrikultur lainnya. Oleh karena itu, analisis dampak sosial-ekonomi menjadi prasyarat dalam perencanaan skala nasional.

Dari perspektif lingkungan, manfaat pengurangan emisi *biofuel* generasi pertama tidak otomatis terwujud tanpa penilaian siklus hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) yang komprehensif. Emisi terkait perubahan penggunaan lahan langsung maupun tidak langsung (*direct and indirect land-use change, ILUC*), input pupuk dan energi pada tahap produksi, serta efisiensi konversi biomassa ke bahan bakar harus diperhitungkan untuk menilai keuntungan iklim yang sesungguhnya. Kasus-kasus empiris menunjukkan bahwa beberapa jalur produksi dapat memberikan pengurangan emisi substansial, sementara jalur lain terutama yang melibatkan konversi hutan atau lahan gambut justru meningkatkan emisi bersih.

**Tabel 7.1. Perbandingan Bahan Baku *Biofuel* Generasi Pertama**

Bahan Baku	Jenis <i>Biofuel</i>	Keunggulan	Tantangan & Dampak Utama
Jagung	Bioetanol	Teknologi produksi mapan, hasil pati tinggi	Kompetisi langsung dengan pangan, tinggi input air & pupuk
Tebu	Bioetanol	Efisiensi gula tinggi, PFCE relatif lebih baik	Memerlukan lahan luas, dampak sosial-ekologi di lokasi perkebunan
Minyak Sawit	Biodiesel	Produktivitas minyak/hektar sangat tinggi	Penyebab utama deforestasi, hilangnya keanekaragaman hayati
Kedelai	Biodiesel	Protein biji dapat untuk pakan	Kompetisi dengan pangan & minyak makan, perlu lahan luas

### ***Biofuel Generasi Kedua: Biomassa Lignoselulosa***

Generasi kedua berfokus pada biomassa lignoselulosa (jerami, residu pertanian, dan kayu) yang memerlukan praproses kimia atau enzimatik untuk melepaskan gula *fermentable*. Meskipun menawarkan pengurangan konflik lahan, jalur ini menuntut investasi teknologi tinggi dan analisis siklus hidup yang cermat untuk memastikan manfaat emisi bersih (Dharani *et al.*, 2024).

*Biofuel* generasi kedua dikembangkan sebagai solusi terhadap keterbatasan generasi pertama, dengan memanfaatkan biomassa non-pangan seperti lignoselulosa dari limbah pertanian, limbah kehutanan, *bagasse*, jerami padi, dan rumput energi seperti *switchgrass* dan *miscanthus* (Sanchez & Cardona, 2008). Teknologi utama meliputi *pretreatment* biomassa, hidrolisis enzimatis, fermentasi lanjutan, dan gasifikasi biomassa untuk menghasilkan bioetanol, bio-oil, atau *synthetic diesel*. Teknologi pra-perlakuan seperti *steam explosion*, *acid hydrolysis*, dan proses enzimatik merupakan langkah kritis karena struktur lignoselulosa yang kompleks dan resisten terhadap degradasi biokimia (Chandel *et al.*, 2019).

*Biofuel* generasi kedua dikembangkan sebagai solusi terhadap berbagai keterbatasan *biofuel* generasi pertama yang mengandalkan bahan baku pangan seperti jagung, tebu, dan minyak nabati. Pada generasi kedua ini, bahan baku utama yang dimanfaatkan adalah biomassa lignoselulosa, yakni material organik non-pangan yang berasal dari limbah pertanian, limbah kehutanan, tanaman energi *non-edible*, dan biomassa yang dapat tumbuh di lahan marginal (Sarkar *et al.*, 2012). Biomassa lignoselulosa memiliki potensi besar untuk menyediakan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan karena ketersediaannya melimpah, tidak bersaing dengan kebutuhan pangan, serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan emisi gas rumah kaca (Klein-Marcuschamer *et al.*, 2012). Namun demikian, struktur kompleks biomassa lignoselulosa yang tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin menjadi tantangan teknis utama dalam proses konversinya. Ketiga komponen tersebut terikat secara erat dalam matriks dinding sel tanaman sehingga bersifat resisten terhadap degradasi biologis. Lignin

khususnya memberikan kekuatan struktural tetapi menjadi penghalang besar terhadap akses enzim selama proses hidrolisis (Mohan *et al.*, 2006). Untuk mengatasi hambatan tersebut, teknologi pra-perlakuan (*pretreatment*) diperlukan guna membuka struktur lignin dan meningkatkan ketersediaan selulosa. Pra-perlakuan dapat dilakukan melalui metode fisik, kimia, fisikokimia, atau biologis, dan keberhasilan tahap ini sangat menentukan efisiensi konversi selanjutnya (Alvira *et al.*, 2010).

### ***Biofuel Generasi Ketiga: Mikroalga dan Bioteknologi Alga***

*Biofuel* generasi ketiga muncul sebagai respons terhadap berbagai keterbatasan *biofuel* generasi pertama dan kedua, khususnya terkait persaingan lahan, kebutuhan air, serta keterbatasan produktivitas biomassa. Mikroalga, sebagai sumber utama *biofuel* generasi ketiga, menawarkan keunggulan biologis dan ekologis yang jauh melampaui biomassa darat. Mikroalga mampu menghasilkan lipid dalam proporsi yang tinggi bahkan mencapai lebih dari 50% berat kering (tergantung spesies dan kondisi kultur). Oleh karena itu, mikroalga menjadi kandidat ideal untuk produksi biodiesel, bioetanol, biohidrogen, dan biogas (Chisty, 2007). Selain itu, mikroalga memiliki laju pertumbuhan yang sangat cepat, dapat dibudidayakan sepanjang tahun, dan dapat memanfaatkan lahan non-produktif, termasuk perairan asin, limbah cair industri, dan fotobioreaktor tertutup. Dikarenakan faktor-faktor tersebut, mikroalga tidak bersaing dengan kebutuhan pangan maupun penggunaan lahan pertanian (Brennan & Owende, 2010).

Generasi ketiga memperkenalkan mikroalga dan mikroorganisme lain sebagai sumber lipid atau karbohidrat untuk produksi biodiesel dan bioetanol. Alga menawarkan densitas biomassa yang tinggi dan kemampuan tumbuh pada lahan marginal atau air limbah, sehingga berpotensi mengurangi tekanan terhadap lahan pertanian. Bagaimanapun, tantangan yang ada seperti skala, biaya kultivasi, dan ekstraksi masih signifikan (Cavelius *et al.*, 2023). *Biofuel* yang dapat dihasilkan oleh generasi ketiga meliputi biodiesel, bioetanol, biogas, dan biojet fuel. Selain itu, alga dapat menyerap CO<sub>2</sub> dari industri

sehingga berpotensi sebagai teknologi mitigasi perubahan iklim (Lam & Lee, 2012).

### ***Biofuel Generasi Keempat: Biologi Sintetik, GMO, dan Carbon-Negative Fuel***

*Biofuel* generasi keempat merepresentasikan fase paling maju dalam teknologi bioenergi, dengan pendekatan berbasis rekayasa genetika, biologi sintetik, mikroorganisme rekayasa (*engineered microbes*), dan penggunaan penangkapan serta penyimpanan karbon (*Carbon capture storage/CCS*) untuk menciptakan sistem energi bersifat *carbon-negative* (Alalwan *et al.*, 2019). Selain itu, generasi ini juga melibatkan penyimpanan karbon dengan tujuan menghasilkan *biofuel* yang lebih efisien dan menurunkan emisi bersih. Pendekatan ini membuka peluang untuk *negative emissions* bila dikombinasikan dengan penangkapan karbon bioenergi (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage/BECCS*). Bagaimanapun, penggunaannya juga menimbulkan pertanyaan regulasi dan risiko *biosafety* (Cavelius *et al.*, 2023).

Selain itu, dengan memanfaatkan pendekatan seperti *metabolic engineering*, *genome editing* menggunakan CRISPR-Cas, dan *pathway rewiring*, para peneliti mampu mengembangkan organisme yang memproduksi langsung molekul energi seperti isobutanol, farnesane, isoprenoid, hingga bensin biologis yang sifat kimianya kompatibel dengan infrastruktur energi modern (Steen *et al.*, 2010).

### ***Sumber Keanekaragaman Hayati untuk Biofuel***

Keanekaragaman hayati (biodiversitas) tidak hanya menjadi penopang sistem ekologi bumi, tetapi juga merupakan gudang senyawa dan material mentah yang sangat kaya untuk produksi *biofuel*. Sumber daya hayati ini mencakup spektrum yang luas, mulai dari tumbuhan tingkat tinggi hingga mikroorganisme, masing-masing dengan keunikan metabolisme dan komposisi biokimianya. Pemanfaatan keanekaragaman hayati secara berkelanjutan dan bijaksana merupakan kunci untuk mengembangkan lini *biofuel* generasi mendatang yang tidak hanya efisien, tetapi juga minim kompetisi dengan pasokan pangan dan lahan. Bab ini akan menjelaskan berbagai sumber

keanekaragaman hayati, mengklasifikasikan berdasarkan generasi *biofuel* dan jenis organisme, serta menjelaskan potensi pengembangannya dalam konteks ekonomi bio (*bioeconomy*).

### ***Tanaman Pangan dan Non-Pangan sebagai Sumber Energi***

Pemanfaatan biomassa tanaman sebagai sumber energi terbarukan telah menjadi salah satu pendekatan strategis dalam transisi menuju sistem energi rendah karbon. Tanaman pangan dan non-pangan memiliki karakteristik biofisik, komposisi biokimia, dan potensi energi yang berbeda, sehingga pemilihan jenis tanaman sangat menentukan efisiensi dan keberlanjutan produksi *biofuel*. Secara umum, tanaman pangan digunakan terutama dalam produksi *biofuel* generasi pertama melalui konversi pati dan gula menjadi bioetanol maupun minyak nabati menjadi biodiesel. Sementara itu, tanaman non-pangan lebih banyak diarahkan untuk produksi *biofuel* generasi kedua dan ketiga karena kandungan lignoselulosa yang tinggi dan minimnya kompetisi dengan kebutuhan pangan (Demirbas, 2011).

Tanaman pangan seperti tebu (*Saccharum officinarum*), jagung (*Zea mays*), gandum, dan singkong (*Manihot esculenta*) telah menjadi bahan baku utama dalam produksi bioetanol. Biomassa tebu, misalnya, menyediakan sukrosa dalam kadar tinggi yang dapat difermentasi secara langsung. Sifat ini menjadikan biomassa tebu sebagai salah satu komoditas paling efisien dalam produksi etanol (Goldemberg, 2008). Dengan produktivitas biomassa yang tinggi dan efisiensi konversi yang mencapai 90%, tebu telah menjadi model bioenergi berbasis tanaman pangan di negara tropis. Namun demikian, penggunaan tanaman pangan sebagai bahan baku *biofuel* sering dikritik karena menimbulkan kompetisi dengan penggunaan untuk kebutuhan pangan manusia dan ternak, meningkatkan harga pangan, serta mendorong ekspansi lahan pertanian yang dapat menyebabkan deforestasi dan degradasi ekosistem (Searchinger *et al.*, 2008).

Sebaliknya, tanaman non-pangan menawarkan potensi biomassa yang besar tanpa menimbulkan konflik langsung dengan ketahanan pangan. Contoh utama adalah *Jatropha curcas*, *Pongamia pinnata*,

*Calophyllum inophyllum*, rumput energi seperti *Miscanthus × giganteus*, serta tanaman lignoselulosa berumur pendek seperti *Acacia* dan *Eucalyptus*. Tanaman non-pangan umumnya memiliki toleransi stres yang tinggi terhadap kondisi marginal seperti tanah kering, salin, atau miskin nutrisi, sehingga dapat dibudidayakan di lahan terdegradasi yang sebelumnya tidak produktif bagi pertanian pangan (Achten *et al.*, 2008).

### **Tanaman Penghasil Minyak Industri**

Pemanfaatan tanaman sebagai sumber minyak industri telah menjadi pilar penting dalam pengembangan bioenergi dan bioindustri global. Minyak industri dari tanaman tidak hanya digunakan untuk produksi biodiesel, tetapi juga menjadi sumber bahan baku bagi pelumas berbahan dasar alam (*bio-based*), surfaktan, resin, plastik *biodegradable*, hingga bahan kimia platform dalam biorefineri. Berbeda dengan minyak pangan yang umumnya digunakan untuk konsumsi rumah tangga dan industri makanan, tanaman penghasil minyak industri dipilih berdasarkan karakteristik kimia unik yang menghasilkan minyak dengan stabilitas oksidatif tinggi, kandungan asam lemak tertentu, serta kompatibilitas terhadap berbagai proses kimiawi dan bioteknologi. Karena sifatnya yang non-pangan, tanaman ini juga mengurangi kompetisi dengan kebutuhan pangan dan lebih sejalan dengan prinsip keberlanjutan (Gunstone, 2011).

Tanaman lain dengan nilai industri tinggi adalah tanaman jarak atau *Ricinus communis*. Sumber utama minyak jarak memiliki kandungan asam risinoleat lebih dari 85%. Asam risinoleat merupakan senyawa penting dalam industri kimia karena memberikan sifat hidrofilik sekaligus lipofilik, sehingga menjadikannya bahan baku untuk nylon, plastik teknik, pelumas aviasi, cat, tinta, surfaktan, dan aditif bahan bakar (Mutlu & Meier, 2010).

Selain tanaman berkayu, beberapa spesies tahunan seperti *Camelina sativa* dan *Crambe abyssinica* menjadi kandidat unggul di daerah beriklim sedang. *Camelina sativa* memiliki siklus hidup singkat, toleran terhadap tanah miskin nutrisi, dan menghasilkan minyak dengan kandungan asam lemak tak jenuh ganda yang tinggi. Karakteristik

tersebut menjadikannya ideal sebagai bahan baku biodiesel, biojet fuel, dan bahan kimia berbasis oleokimia (Berti *et al.*, 2016). Sementara itu, *Crambe abyssinica* dikenal dengan kandungan asam erusat (22:1 n-9) yang dapat digunakan untuk memproduksi pelumas, plastik ramah lingkungan, dan komponen industri berat. Kekayaan kimia dari tanaman-tanaman ini memperluas portofolio tanaman energi dan memperkuat basis bioindustri di masa depan.

### ***Rumput Energi dan Tanaman Cepat Tumbuh***

Rumput energi dan tanaman cepat tumbuh merupakan salah satu pilar utama dalam pengembangan bioenergi modern karena kemampuannya menghasilkan biomassa dalam jumlah besar, toleransi lingkungan yang tinggi, serta efisiensi konversi energi yang optimal. Kelompok tanaman ini mencakup spesies seperti *Miscanthus x giganteus*, *Pennisetum purpureum* (rumput gajah), *Panicum virgatum* (switchgrass), *Arundo donax*, serta beberapa spesies bambu yang memiliki laju pertumbuhan ekstrem. Karakteristik pertumbuhan yang cepat, kemampuan berfotosintesis dengan efisiensi tinggi (terutama spesies berjulur fotosintesis C4), dan kebutuhan input agronomis yang relatif rendah, menjadikan tanaman ini sebagai kandidat utama dalam produksi *biofuel* generasi kedua dan sistem biorefineri yang terintegrasi (Heaton *et al.*, 2008).

Rumput energi umumnya memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi. Komponen penyusunnya terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang menjadikannya ideal sebagai bahan baku untuk bioetanol selulosa, bio-oil melalui pirolisis, biogas melalui fermentasi anaerob, serta biokarbon melalui karbonisasi biomassa. *Miscanthus x giganteus*, misalnya, dikenal sebagai salah satu tanaman C4 paling efisien dengan produktivitas lebih dari 30 ton biomassa kering per hektar per tahun pada kondisi optimal. Selain itu, tanaman ini memiliki kebutuhan nitrogen yang rendah, toleran terhadap suhu dingin, serta dapat tumbuh dengan minimal gangguan vegetasi, sehingga berkontribusi terhadap penyerapan karbon dalam jangka panjang (Clifton-Brown *et al.*, 2017). Potensi *Miscanthus* sebagai tanaman energi tidak hanya terbatas pada konversi *biofuel*, tetapi juga

sebagai bahan baku *pulp*, bahan komposit, isolasi bangunan, serta bahan baku karbon aktif.

Sementara itu, *Panicum virgatum* atau *switchgrass* yang berasal dari Amerika Utara menjadi salah satu tanaman percontohan dalam program *bioenergy* AS karena produktivitas biomassa yang tinggi, kedalaman akar mencapai lebih dari 3 meter, serta ketahanannya terhadap kekeringan. Sistem perakaran *switchgrass* memungkinkan penyerapan karbon tanah yang signifikan, menjadikannya sebagai tanaman yang berpotensi berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan cadangan karbon organik tanah (Anderson-Teixeira *et al.*, 2009). Keunggulan ekologis ini membuat *switchgrass* tidak hanya berperan sebagai sumber energi, tetapi juga sebagai elemen rehabilitasi tanah dan konservasi lahan marginal.

Dalam konteks keberlanjutan, rumput energi dan tanaman cepat tumbuh menawarkan beberapa keuntungan, seperti tidak bersaing dengan pangan, dapat tumbuh pada lahan marginal, memiliki input agronomis rendah, serta mampu meningkatkan kualitas tanah melalui sistem perakarannya. Namun demikian, terdapat pula potensi risiko ekologis, seperti invasivitas pada beberapa spesies (*Arundo donax* dan *Miscanthus sinensis*), perubahan biodiversitas lokal, serta kebutuhan air yang tinggi pada tahap awal pertumbuhan. Oleh sebab itu, kebijakan pengelolaan yang berbasis prinsip ekologi lanskap harus diterapkan untuk memastikan pengembangan rumput energi tidak berdampak negatif terhadap lingkungan, terutama pada wilayah dengan sensitivitas ekologis tinggi (Raghu *et al.*, 2006).

### ***Biomassa Laut: Rumput Laut, Mikroalga, dan Cyanobacteria***

Biomassa laut merupakan salah satu sumber daya hayati yang memiliki potensi besar dalam pengembangan bioenergi global. Hal ini dikarenakan ketersediaannya yang melimpah, tingkat produktivitas primer yang tinggi, serta keunggulan ekologis dibandingkan biomassa terestrial. Berbeda dengan biomassa daratan yang sering bersaing dengan kebutuhan pangan dan lahan pertanian, biomassa laut dapat dibudidayakan pada ruang samudra yang luas tanpa menimbulkan tekanan terhadap ekosistem terestrial. Kelompok biomassa laut

mencakup makroalga (rumput laut), mikroalga laut, fitoplankton, serta residu organisme laut lainnya, yang dapat dikonversi menjadi *biofuel*, biogas, biohidrogen, maupun bahan kimia platform dalam industri biorefineri.

### ***Mikrobiota dan Fungi dalam Biokonversi Energi***

Mikrobiota dan fungi memainkan peran sentral dalam transformasi biomassa menjadi energi melalui berbagai jalur biokonversi. Prosesnya dilakukan dengan cara memanfaatkan kemampuan metabolismik, enzimatik, dan fisiologis yang tidak dimiliki oleh organisme tingkat tinggi. Biokonversi energi berbasis mikroorganisme telah menjadi pilar utama dalam produksi *biofuel* generasi kedua hingga keempat, terutama karena kapasitasnya dalam mendegradasi lignoselulosa, memfermentasi gula, menghasilkan lipid, serta mensintesis molekul energi tinggi seperti hidrogen dan metana (Singh *et al.*, 2011). Keanekaragaman metabolismik mikroorganisme memungkinkan pemanfaatan berbagai substrat limbah biomassa, termasuk residu pertanian, limbah industri, dan biomassa organik kompleks, sehingga mendukung prinsip bioekonomi sirkular.

Peran bakteri dalam biokonversi energi sangat luas, terutama dalam fermentasi dan proses anaerobik yang menghasilkan bioetanol, biobutanol, biogas, dan hidrogen. Bakteri seperti *Clostridium acetobutylicum* dikenal sebagai produsen utama butanol melalui fermentasi ABE (Acetone-Butanol-Ethanol). Kapasitasnya dalam memfermentasi gula C5 dan C6 dari hidrolisat lignoselulosa menjadikan genus *Clostridium* relevan untuk produksi *biofuel* generasi kedua (Dürre, 2007). Selain itu, bakteri metanogen seperti *Methanobacterium* dan *Methanosarcina* berfungsi dalam tahapan akhir digestasi anaerob. Bakteri tersebut mengonversi asam asetat dan H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> menjadi metana melalui jalur asetoklastik dan hidrogenotrofik (Thauer *et al.*, 2008). Keberadaan bakteri fermentatif lain seperti *Enterobacter*, *Escherichia coli* hasil rekayasa, serta *Zymomonas mobilis* juga memperluas spektrum substrat dan jalur fermentasi untuk produksi bioenergi.

Fungi, khususnya kapang lignoselulolitik seperti *Trichoderma reesei*, *Aspergillus niger*, dan *Phanerochaete chrysosporium*, berperan dalam tahap kritis *pretreatment* biologis dan hidrolisis enzimatik biomassa lignoselulosa. Fungi ini menghasilkan selulase, hemiselulase, dan ligninase dalam jumlah tinggi. Fungsi ini menjadikannya agen penting dalam pemecahan struktur lignoselulosa yang resisten. *Trichoderma reesei* merupakan sumber enzim selulase komersial yang paling utama dan banyak digunakan dalam industri bioetanol lignoselulosa (Cherry & Fidantsef, 2003). Sementara itu, *Phanerochaete chrysosporium*, fungi pelapuk putih, dikenal mampu mendegradasi lignin secara efisien melalui enzim lignin peroksidase dan mangan peroksidase, yang membuka struktur kompleks lignin sehingga meningkatkan ketersediaan selulosa untuk fermentasi.

Interaksi sinergis antara bakteri dan fungi dalam sistem biokonversi juga menjadi strategi penting dalam meningkatkan efisiensi produksi bioenergi. Konsorsium mikroba, seperti kombinasi bakteri fermentatif dan fungi degrader lignin, mampu mempercepat hidrolisis lignoselulosa dan meningkatkan hasil fermentasi. Konsep *consolidated bioprocessing* (CBP), yang menggabungkan hidrolisis dan fermentasi dalam satu tahap, menjadi relevan ketika mikroorganisme direkayasa untuk memiliki kemampuan multienzimatik, yaitu menghidrolisis substrat lignoselulosa sekaligus memfermentasinya menjadi etanol atau butanol (Lynd *et al.*, 2005). Pendekatan integratif ini mengurangi kebutuhan enzim komersial dan menurunkan biaya produksi *biofuel* dalam skala industri.

### ***Limbah Organik dan Agroindustri sebagai Biomassa Energi***

Limbah organik dan residu agroindustri merupakan salah satu sumber biomassa energi yang paling potensial dalam konteks bioekonomi dan transisi energi berkelanjutan. Biomassa ini tidak hanya tersedia dalam jumlah besar, tetapi juga memberikan solusi atas permasalahan lingkungan yang timbul akibat akumulasi limbah dari sektor pertanian, peternakan, perkebunan, dan industri pengolahan pangan. Dalam pendekatan bioenergi modern, limbah organik dipandang sebagai sumber daya strategis yang dapat dikonversi

menjadi energi terbarukan melalui proses biokimia (seperti fermentasi, digestasi anaerob, dan produksi biogas) maupun proses termokimia (seperti pirolisis dan gasifikasi) (Demirbas, 2011). Pemanfaatan limbah organik sebagai sumber energi sejalan dengan konsep *circular bioeconomy*, yang menjelaskan mengenai aliran bahan biologi yang dimanfaatkan kembali melalui teknologi ramah lingkungan dan menghasilkan nilai tambah.

Secara ekologis, pemanfaatan limbah agroindustri untuk bioenergi memberikan kontribusi positif dalam mitigasi perubahan iklim dan pengurangan polusi lingkungan. Pembakaran terbuka residu pertanian, yang umum terjadi di negara berkembang, menyebabkan emisi partikulat, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>2</sub> yang tinggi. Konversi limbah menjadi bioenergi berguna untuk menghindari dampak negatif tersebut sekaligus meningkatkan nilai ekonomi residu pertanian. Selain itu, teknologi seperti *anaerobic digestion* mampu menurunkan emisi metana dari limbah organik terbuka, yang secara alami akan dihasilkan melalui dekomposisi tanpa pengelolaan.

### **Model Produksi dan Sistem Energi Berbasis Keanekaragaman Hayati**

Model produksi dan sistem energi berbasis keanekaragaman hayati merupakan pendekatan yang mengintegrasikan sumber daya biologis, ekologi, dan teknologi energi terbarukan untuk membangun sistem energi yang berkelanjutan, resilien, dan rendah emisi. Pendekatan ini menempatkan keanekaragaman hayati sebagai fondasi utama bagi penyediaan biomassa, produktivitas ekosistem, maupun stabilitas jangka panjang dari pasokan energi. Konsep ini berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan global untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca, serta meningkatkan adaptasi terhadap perubahan iklim (IPCC, 2022). Pengembangan model energi berbasis hayati tidak hanya mencakup produksi *biofuel*, tetapi juga bioenergi padat, biogas, biohidrogen, *bio-lubricant*, dan senyawa *bio-based* yang mendukung diversifikasi energi dalam bioekonomi modern.

## **Feedstock Management: Panen, Kultivasi, dan Pengolahan Biomassa**

Manajemen *feedstock* merupakan elemen fundamental dalam rantai pasok bioenergi karena menentukan stabilitas produksi, efisiensi konversi, dan keberlanjutan sistem energi berbasis biomassa. *Feedstock* yang dapat berupa tanaman energi, residu pertanian, limbah kehutanan, rumput energi, hingga biomassa akuatik memerlukan strategi panen, kultivasi, dan pengolahan awal yang terintegrasi untuk menjamin kualitas dan kontinuitas suplai. Dalam konteks bioenergi modern, *feedstock* management tidak hanya berfokus pada produksi biomassa dalam jumlah besar, tetapi juga pada optimalisasi kandungan biopolimer (selulosa, hemiselulosa, lignin, lipid, atau pati), efisiensi pengolahan, serta minimisasi dampak lingkungan dari kegiatan budidaya dan pemanenan (Slade & Bauen, 2013; Lamers *et al.*, 2015).

### ***Kultivasi Biomassa: Optimalisasi Produksi Berkelaanjutan***

Kultivasi tanaman energi harus mempertimbangkan karakter fisiologis tanaman, ketersediaan lahan, input nutrisi, kebutuhan air, dan interaksi ekologi. Tanaman kayu cepat tumbuh (misalnya *Acacia*, *Eucalyptus*), rumput energi (*Miscanthus x giganteus*, *Panicum virgatum*), dan tanaman bertepung (misalnya singkong atau jagung) memiliki strategi agronomi berbeda. Studi menunjukkan bahwa *Miscanthus* mampu menghasilkan produktivitas biomassa tinggi (hingga 25–40 ton berat kering/ha/tahun) dengan input nutrisi rendah dan kemampuan adaptasi ekologis yang luas (Clifton-Brown *et al.*, 2017). Sementara itu, alga memerlukan sistem kultivasi berbeda, seperti *raceway pond*, fotobioreaktor, atau sistem heterotrofik, yang masing-masing dengan tantangan teknis dan kebutuhan energi yang spesifik (Wijffels & Barbosa, 2010).

### ***Panen dan Logistik Biomassa***

Tahap panen menentukan kualitas biomassa sebelum memasuki proses konversi. Waktu panen sangat berpengaruh pada kadar air, kandungan lignoselulosa, dan stabilitas penyimpanan. Pada tanaman lignoselulosik seperti tebu atau rumput energi, waktu panen pada fase

maturasi menentukan kandungan serat dan rasio selulosa-lignin yang optimal untuk proses sakarifikasi enzimatis maupun konversi termokimia. Sementara itu, biomassa alga memiliki siklus panen jauh lebih cepat, umumnya dalam hitungan hari atau minggu, dan bergantung pada akumulasi lipid atau karbohidrat dalam sel.

### ***Pengolahan Awal (Pre-processing): Meningkatkan Efisiensi Konversi***

*Pre-processing* menjadi sangat penting untuk biomassa lignoselulosa yang memiliki struktur kompleks. Lignin bertindak sebagai penghambat dalam proses hidrolisis enzimatis. Oleh karena itu, *pretreatment* kimia, fisika, atau biologi sering diperlukan sebelum tahap konversi, tergantung pada jenis *biofuel* yang akan dihasilkan.

### ***Integrasi feedstock Management dalam Sistem Bioenergi***

Manajemen *feedstock* modern menekankan integrasi dari hulu ke hilir, mulai dari produksi biomassa, panen, penyimpanan, pengolahan awal, hingga distribusi ke fasilitas konversi. Konsep ini merupakan bagian dari *biomass supply chain management*, yang menggabungkan pemodelan logistik, bioekonomi, dan prinsip keberlanjutan untuk memastikan ketahanan suplai. Integrasi tersebut juga berhubungan dengan teknologi digital seperti penggunaan sensor IoT untuk monitoring kelembaban biomassa, pemetaan lahan berbasis GIS, hingga otomasi panen dan transportasi.

### ***Life Cycle Assessment (LCA) Biofuel***

*Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan metodologi analitis yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan dari suatu produk, proses, atau layanan sepanjang seluruh tahapan siklus hidupnya, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga pemrosesan akhir (*cradle-to-grave*) atau hingga gerbang pabrik (*cradle-to-gate*). Dalam konteks *biofuel*, LCA menjadi instrumen ilmiah kunci yang digunakan untuk mengevaluasi keberlanjutan bioenergi secara kuantitatif berdasarkan indikator energi, emisi gas rumah kaca (GRK), penggunaan lahan, kualitas air, serta dampak ekologi jangka panjang. Evaluasi LCA

diperlukan untuk memastikan bahwa *biofuel* benar-benar menawarkan manfaat lingkungan yang signifikan dibandingkan bahan bakar fosil, sekaligus meminimalisasi konsekuensi tidak langsung seperti alih fungsi lahan atau peningkatan tekanan ekologis (Cherubini & Strømman, 2011; ISO 14040:2006).

### **Sistem Biogas Komunitas dan Skala Industri**

Sistem biogas merupakan salah satu teknologi bioenergi yang memainkan peran penting dalam strategi transisi menuju energi berkelanjutan, terutama di negara-negara agraris dan kawasan pedesaan dengan ketersediaan biomassa organik yang melimpah. Biogas dihasilkan melalui proses degradasi anaerobik oleh konsorsium mikroorganisme yang mengubah bahan organik menjadi campuran gas, terutama metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Implementasi biogas dapat dilakukan pada berbagai skala, mulai dari sistem komunitas kecil hingga fasilitas industri berskala besar. Perbedaan kapasitas, teknologi, jenis *feedstock*, dan tujuan operasional memengaruhi efisiensi produksi, stabilitas proses, dan manfaat sosial-ekonomi yang dapat diperoleh (Angelidaki *et al.*, 2018; Abbasi *et al.*, 2012).

Sistem biogas komunitas (*community-scale biogas system*) merujuk pada instalasi biogas berkapasitas kecil hingga menengah yang biasanya dikelola oleh kelompok masyarakat, koperasi desa, atau usaha kecil berbasis lingkungan. Teknologi ini umumnya memanfaatkan limbah organik lokal seperti kotoran ternak, residu dapur, jerami padi, limbah pasar, dan lumpur dari instalasi pengolahan air limbah domestik. Keunggulan utama sistem komunitas terletak pada kesederhanaan desain dan adaptabilitasnya terhadap konteks lokal. *Digester* tipe kubah tetap (*fixed-dome*), *floating-drum*, dan *plug-flow reactor* adalah beberapa konfigurasi yang umum digunakan karena konstruksinya relatif murah dan mudah dikelola (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

Sistem biogas industri merupakan fasilitas berkapasitas besar yang dirancang untuk mengolah volume biomassa yang sangat besar, termasuk limbah industri makanan, residu pertanian, limbah

peternakan intensif, serta fraksi organik dari sampah kota (OFMSW). Sistem ini biasanya dilengkapi dengan teknologi kendali proses otomatis, *pretreatment* canggih (seperti *steam explosion*, sonikasi, atau hidrolisis enzimatik), serta reaktor berteknologi tinggi seperti *continuously stirred tank reactor* (CSTR), *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB), dan *anaerobic membrane bioreactor* (AnMBR) (Holm-Nielsen *et al.*, 2009).

### ***Integrated Farming System (IFS) untuk Energi dan Pangan***

*Integrated Farming System* (IFS) atau sistem pertanian terpadu merupakan suatu pendekatan produksi yang mengintegrasikan berbagai komponen biologis pertanian, peternakan, perikanan, kehutanan, dan energi hayati ke dalam satu kesatuan sistem yang saling terhubung dan saling mendukung. Konsep ini berkembang sebagai respons terhadap kebutuhan global untuk sistem produksi yang tidak hanya meningkatkan hasil pangan, tetapi juga mampu menyediakan sumber energi terbarukan, mengurangi limbah, dan meningkatkan efisiensi ekologi secara keseluruhan (Altieri & Nicholls, 2017; Singh *et al.*, 2023). Sistem pertanian terpadu memaksimalkan pemanfaatan keanekaragaman hayati dan aliran biomassa, sehingga menghasilkan produktivitas ganda yang berkelanjutan.

### ***Teknologi Waste-to-Energy (WtE) dan Ekonomi Sirkular***

*Waste-to-Energy* (WtE) merupakan salah satu pilar penting dalam transformasi sistem pengelolaan limbah menuju model ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan ulang sumber daya dan pengurangan limbah secara signifikan. Teknologi ini memanfaatkan bahan buangan organik maupun anorganik sebagai *feedstock* untuk produksi energi dalam bentuk listrik, panas, biogas, *biofuel*, maupun produk turunan bernilai tambah seperti biochar dan *digestate*. Dalam kerangka ekonomi sirkular, WtE memosisikan limbah bukan sebagai akhir dari rantai konsumsi, melainkan sebagai bahan baku baru dalam siklus produksi energi dan material, sehingga meningkatkan efisiensi sumber daya dan menurunkan dampak lingkungan (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Secara teknis, WtE mencakup berbagai pendekatan konversi termokimia, biokimia, dan fisikokimia. Teknologi termokimia seperti insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis mengonversi limbah menjadi energi melalui proses pembakaran atau pemanasan tanpa oksigen. Insinerasi merupakan metode paling luas digunakan, terutama di negara dengan densitas urban tinggi. Hal ini dikarenakan kemampuannya dalam mengurangi volume limbah hingga 90%, sekaligus menghasilkan energi panas dan listrik (Cheng & Hu, 2010). Gasifikasi dan pirolisis, meskipun membutuhkan teknologi yang lebih canggih dan pengendalian emisi yang ketat, menawarkan fleksibilitas produk berupa *syngas*, *bio-oil*, dan *biochar* yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi industri dan pertanian. *Biochar*, misalnya, memiliki potensi signifikan sebagai amandemen tanah, bahan penyerap polutan, hingga media untuk aplikasi bioteknologis.

Di sisi lain, teknologi biokonversi yang melibatkan proses *anaerobic digestion* (AD) memanfaatkan limbah organik seperti sampah makanan, limbah agroindustri, sludge domestik, dan kotoran ternak untuk menghasilkan biogas. Biogas yang kaya metana dapat dimurnikan menjadi biometana untuk kebutuhan transportasi atau dikonversi menjadi listrik melalui generator. Proses AD memberikan keuntungan tambahan berupa *digestate* yang berfungsi sebagai pupuk organik berkualitas tinggi, sehingga mendukung siklus nutrien dan pertanian berkelanjutan (Meyer *et al.*, 2018). Pendekatan ini menjadikan WtE sekaligus sebagai teknologi pengelolaan limbah dan produksi energi terbarukan dengan nilai ganda.

Pengembangan WtE tidak dapat dilepaskan dari prinsip-prinsip ekonomi sirkular. Model ini menekankan pada desain sistem industri yang meminimalkan pemborosan, memperpanjang usia material, serta memastikan bahwa setiap output proses industri kembali memasuki rantai produksi sebagai input. Dalam konteks ini, limbah organik dapat dimanfaatkan sebagai sumber biomassa untuk *biofuel*, sedangkan limbah plastik dapat ditingkatkan nilainya melalui pirolisis menjadi minyak sintetis. Pendekatan “*closing the loop*” ini menciptakan sistem industri yang lebih resilien terhadap fluktuasi sumber daya, sekaligus

menurunkan ketergantungan pada bahan bakar fosil (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2011). *Biogas energy* (Vol. 2). Springer.
- Achten, W. M., Verchot, L., Franken, Y. J., Mathijs, E., Singh, V. P., Aerts, R., & Muys, B. (2008). Jatropha bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1063–1084.
- Aguirre-Fierro, A., Pino, M. S., Zanuso, E., Londoño-Hernández, L., Nájera, A., Torres, A. Y., ... Ruiz, H. A. (2019). Biochemical and thermochemical platforms for bioproducts and biofuels in terms of biorefinery. In *Advances in food bioproducts and bioprocessing technologies* (pp. 145–192). CRC Press.
- Alalwan, H. A., Alminshid, A. H., & Aljaafari, H. A. (2019). Promising evolution of biofuel generations: Subject review. *Renewable Energy Focus*, 28, 127–139.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). *Agroecology: A transdisciplinary, participatory and action-oriented approach*. CRC Press.
- Alvira, P., Tomas-Pejo, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851–4861.
- Anderson-Teixeira, K. J., Davis, S. C., Masters, M. D., & Delucia, E. H. (2009). Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *GCB Bioenergy*, 1(1), 75–96.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougiás, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466.
- Aro, E. M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. *Ambio*, 45(Suppl 1), 24–31.

- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093.
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 858–875.
- Berti, M., Gesch, R., Eynck, C., Anderson, J., & Cermak, S. (2016). Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Industrial Crops and Products*, 94, 690–710.
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae: A review of technologies for production, processing, and extraction of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577.
- Brown, R. C., & Brown, T. R. (2014). *Biorenewable resources: Engineering new products from agriculture*. Wiley.
- Cavelius, P., Engelhart-Straub, S., Mehlmer, N., Lercher, J., Awad, D., & Brück, T. (2023). The potential of biofuels from first to fourth generation. *PLOS Biology*, 21(3), e3002063.
- Chandel, A. K., Albarelli, J. Q., Santos, D. T., Chundawat, S. P., Puri, M., & Meireles, M. A. A. (2019). Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(4), 994–1014.
- Chen, W. H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847–866.
- Cheng, H., & Hu, Y. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*, 101(11), 3816–3824.

- Cherry, J. R., & Fidantsef, A. L. (2003). Directed evolution of industrial enzymes: An update. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(4), 438–443.
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421.
- Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102(2), 437–451.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae: Biotechnology advances. *Journal of Bioenergy Research*, 25, 294.
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., ... Pingoud, K. (2011). Bioenergy. In *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge University Press.
- Chum, H. L., & Overend, R. P. (2001). Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, 71(1–3), 187–195.
- Clifton-Brown, J., Hastings, A., Mos, M., McCalmont, J. P., Ashman, C., Awty-Carroll, D., ... Flavell, R. (2017). Progress in upscaling Miscanthus biomass production for the European bio-economy with seed-based hybrids. *GCB Bioenergy*, 9(1), 6–17.
- Dharani, L., Umapriya, R., Arunkumar, N., Gokila, M., & Sakthi Shankar, R. (2024). Generations of biofuel. In *Emerging sustainable technologies for biofuel production* (pp. 15–42). Springer Nature Switzerland.
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2239–2249.
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2738–2749.
- Demirbas, A., & Demirbas, M. F. (2010). *Algae energy: Algae as a new source of biodiesel*. Springer.

- Demirbas, A. (2011). Competitive liquid biofuels from biomass. *Applied Energy*, 88(1), 17–28.
- Dürre, P. (2007). Biobutanol: An attractive biofuel. *Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology*, 2(12), 1525–1534.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation Publishing.
- FAO of the United Nations. (2021). *The state of food and agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. FAO.
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235–1238.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, 1(1), 6.
- Gunstone, F. (Ed.). (2011). *Vegetable oils in food technology: Composition, properties and uses*. Wiley.
- Hallenbeck, P. C., & Benemann, J. R. (2002). Biological hydrogen production: Fundamentals and limiting processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(11–12), 1185–1193.
- Heaton, E. A., Dohleman, F. G., & Long, S. P. (2008). Meeting US biofuel goals with less land: The potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*, 14(9), 2000–2014.
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2022: Mitigation of climate change (Working Group III*

contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge University Press.

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.

Karp, A., & Richter, G. M. (2011). Meeting the challenge of food and energy security. *Journal of Experimental Botany*, 62(10), 3263–3271.

Karthikeyan, O. P., & Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bioconversion processes: A review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12(3), 257–284.

Klein-Marcuschamer, D., Oleskowicz-Popiel, P., Simmons, B. A., & Blanch, H. W. (2012). The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(4), 1083–1087.

Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 364–373.

Lam, M. K., & Lee, K. T. (2012). Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, 30(3), 673–690.

Lamers, P., Junginger, M., Hamelinck, C., & Faaij, A. (2012). Developments in international solid biofuel trade: An analysis of volumes, policies, and market factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3176–3199.

Lee, S. J., Lee, S. J., & Lee, D. W. (2013). Design and development of synthetic microbial platform cells for bioenergy. *Frontiers in Microbiology*, 4, 92.

Liu, Y., & Nielsen, J. (2019). Recent trends in metabolic engineering of microbial chemical factories. *Current Opinion in Biotechnology*, 60, 188–197.

- Lynd, L. R., Van Zyl, W. H., McBride, J. E., & Laser, M. (2005). Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: An update. *Current Opinion in Biotechnology*, 16(5), 577–583.
- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P. K. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, 100036.
- Martinez, A. T., Speranza, M., Ruiz-Dueñas, F. J., Ferreira, P., Camarero, S., Guillén, F., ... & del Río Andrade, J. C. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: Microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(5), 489–508.\*
- Meyer, A. K. P., Ehimen, E. A., & Holm-Nielsen, J. B. (2018). Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 111, 154–164.
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., & Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673–686.
- Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., Manuri, S., Krisnawati, H., Taberima, S., & Kurnianto, S. (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089–1092.
- Mutlu, H., & Meier, M. A. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(1), 10–30.

- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52–68.
- Raghu, S., Anderson, R. C., Daehler, C. C., Davis, A. S., Wiedenmann, R. N., Simberloff, D., & Mack, R. N. (2006). Adding biofuels to the invasive species fire? *Science*, 313(5794), 1742.
- Sanchez, O. J., & Cardona, C. A. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 99(13), 5270–5295.
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27.
- Sayer, J., Sunderland, T., Ghazoul, J., Pfund, J. L., Sheil, D., Meijaard, E., Venter, M., Boedhijartono, A. G., Day, M., Garcia, C., van Oosten, C., & Buck, L. E. (2013). Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(21), 8349–8356.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., & Yu, T.-H. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238–1240.
- Sims, R., Taylor, M., Saddler, J., & Mabee, W. (2008). *From 1st- to 2nd-generation biofuel technologies*. International Energy Agency (IEA) and Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*, 101(6), 1570–1580.

- Singh, A., Olsen, S. I., & Nigam, P. S. (2011). A viable technology to generate third-generation biofuel. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(11), 1349–1353.
- Singh, P. K., & Dubey, A. (2023). Integrated farming system. In *Textbook of resource conservation practices* (pp. 99–113).
- Slade, R., & Bauen, A. (2013). Microalgae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, 53, 29–38.
- Sorda, G., Banse, M., & Kemfert, C. (2010). An overview of biofuel policies across the world. *Energy Policy*, 38(11), 6977–6988.
- Steen, E. J., Kang, Y., Bokinsky, G., Hu, Z., Schirmer, A., McClure, A., ... & Keasling, J. D. (2010). Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass. *Nature*, 463(7280), 559–562.
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1–11.
- Sulasminingsih, S., Hafiz, F., Sari, K., & Yuninda, S. (2023). Penggunaan biomassa sebagai energi alternatif pembangkit listrik di wilayah pedesaan. *Journal of Optimization System and Ergonomics Implementation*, 1(1), 42–51.
- Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1621–1651.
- Thauer, R. K., Kaster, A. K., Seedorf, H., Buckel, W., & Hedderich, R. (2008). Methanogenic archaea: Ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews Microbiology*, 6(8), 579–591.
- Tilman, D., Socolow, R., Foley, J. A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., Pacala, S., Reilly, J., Searchinger, T., Somerville, C., & Williams, R. (2009). Beneficial biofuels: The food, energy, and environment trilemma. *Science*, 325(5938), 270–271.

- Wardhana, A. R., & Marifatullah, W. H. (2020). Transisi Indonesia menuju energi terbarukan. *Tashwirul Afkar*, 38(2).
- Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2010). An outlook on microalgal biofuels. *Science*, 329(5993), 796–799.
- Williams, C. L., Dahiya, A., & Porter, P. (2015). Introduction to bioenergy. In A. Dahiya (Ed.), *Bioenergy* (pp. 5–36). Academic Press.

# BAB 8

## Industri Lingkungan I: Bioremediasi dalam Industri

**Naufal Hafidh Mahdi Sujarwo Putra**

Sektor industri yang saat ini berkembang pesat seringkali mengakibatkan dampak negatif terhadap lingkungan. Pencemaran udara, tanah, dan air menjadi perhatian seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap isu-isu lingkungan. Tuntutan masyarakat dan regulasi yang semakin ketat mewajibkan penerapan teknologi ramah lingkungan maupun prinsip berkelanjutan. Salah satu solusi dalam menghadapi tantangan tersebut melalui penerapan *bioremediasi*. Proses yang memanfaatkan organisme hidup, seperti mikroorganisme dan tumbuhan, untuk mengurangi atau menghilangkan polutan dari lingkungan. Bioremediasi menjadi alternatif yang menarik dibandingkan metode pengolahan limbah konvensional yang seringkali mahal dan menghasilkan limbah berbahaya lainnya. *Chapter* ini akan membahas tentang aplikasi bioremediasi dalam sektor industri, dengan fokus pada sejarah dan perkembangan bioremediasi, prinsip dasar bioremediasi, teknik-teknik bioremediasi, faktor-faktor yang memengaruhi penggunaan teknologi bioremediasi, keunggulan, kekurangan, serta tantangan implementasi bioremediasi di industri.

### 8.1 Sejarah dan Perkembangan Bioremediasi

Sejarah bioremediasi dimulai sekitar tahun 1960-an, ketika George M. Robinson, seorang insinyur minyak, mulai melakukan eksperimen dengan mikroba. Toples yang berisi polutan minyak dimasukkan dengan mikroba. Hasil pengamatan menemukan jenis bakteri tertentu dapat memecah polutan. Laporan percobaan tersebut disampaikan

kepada komunitas ilmiah, sehingga dengan cepat bioremediasi digunakan untuk mengurangi dan menghilangkan polutan minyak (*Spill Tech Environmental*, 2024).

Bioremediasi terdiri dari dua kata, yaitu “*bios*” yang berarti kehidupan atau organisasi hidup dan “*remediate*” berarti menyelesaikan masalah. Bioremediasi menggunakan prinsip organisme hidup dalam menyelesaikan permasalahan lingkungan (Sardrood & Goltapeh, 2015; Suresh *et al.*, 2003). Bioremediasi dalam praktiknya menggunakan organisme biologis (seperti bakteri, jamur, dan tumbuhan) untuk menghilangkan atau mengubah polutan menjadi tidak berbahaya dengan cara yang efektif dan ramah lingkungan.

Penelitian bioremediasi sebagian besar telah mempelajari proses bakteri dalam berbagai aplikasi penggunaan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa menggunakan lebih dari satu organisme hidup dalam bioremediasi dapat meningkatkan efisiensi dan hasil. Aplikasi dari penemuan ini memungkinkan lebih banyak variasi mikroba pendegradasi polutan (Bala *et al.*, 2022; Kour *et al.*, 2021; Krzmarzick *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2021).

Perkembangan industri yang semakin pesat harus diiringi dengan kebutuhan pengolahan limbah yang benar. Penelitian tentang teknologi ramah lingkungan dan berkelanjutan semakin penting untuk mengatasi tantangan pengolahan limbah, khususnya limbah cair (Vuković Domanovic *et al.*, 2025). Bioremediasi adalah metode ramah lingkungan untuk menghilangkan kontaminan dari ekosistem sekitar. Perkembangan teknologi bioremediasi menyebabkan metode ini semakin masif digunakan karena efektif dan terjangkau (Vuković Domanovic *et al.*, 2025; Fidiastuti *et al.*, 2019).

## 8.2 Prinsip Bioremediasi

Bioremediasi melibatkan organisme biologi, seperti mikroorganisme (jamur, bakteri, dan alga) atau tumbuhan. Prinsip utama dengan mendegradasi dan mengubah polutan organik dan anorganik berbahaya di lingkungan menjadi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , biomassa mikroorganisme, maupun metabolit yang lebih tidak beracun (Dhir, 2017; Tyagi & Kumar, 2021). Bioremediasi bergantung pada

kemampuan organisme biologis dan enzim untuk menghancurkan, menyerap, dan mengubah kontaminan berbahaya menjadi zat yang kurang berbahaya (Arregui *et al.*, 2019; Ayilara & Babalola, 2023).

Mekanisme utama dalam remediasi mikrobial, melibatkan mikroorganisme tertentu, termasuk bakteri, jamur, dan alga, yang digunakan untuk memecah atau mengikat polutan. Remediasi mikrobial telah diakui sebagai metode yang sangat baik untuk menangani polusi pestisida dan logam berat. Hal ini dikarenakan mikroorganisme ini dapat beradaptasi dan berkembang biak di lingkungan yang terkontaminasi, sehingga dapat mendegradasi zat beracun dengan cepat (Ayilara & Babalola 2023; Tarfeen *et al.* 2022). Kemajuan dalam genetika mikroba memungkinkan pembuatan strain mikroba yang dimaksudkan untuk detoksifikasi. Produk ini menghasilkan bioremediasi yang lebih cepat dan lebih efektif (Arregui *et al.* 2019; Sikdar *et al.*, 2022).

Bioremediasi lainnya menggunakan tumbuhan dengan prinsip fitoremediasi untuk menyerap, menstabilkan, dan mendekomposisi kontaminan lingkungan. Metode ini sangat bermanfaat dalam remediasi tanah dan badan air yang terkontaminasi oleh polutan organik yang berkelanjutan (Sahoo, 2024). Penggunaan sistem tanaman dapat meningkatkan struktur tanah dan memberikan pendekatan berkelanjutan untuk mengelola kontaminan (Ayilara & Babalola, 2023; Sahoo, 2024).

Bioremediasi yang sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular adalah memulihkan produk berguna dari limbah industri, sehingga meningkatkan efisiensi sumber daya sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari proses industri. Contohnya-seperti konsep *biorefinery* mendorong pemulihan *biofuel* dengan mengubah limbah menjadi sumber energi (Aryanfar *et al.*, 2024). Pendekatan beragam yang terdiri dari aktivitas mikroba, kemampuan tumbuhan, dan proses enzimatik mendorong praktik lingkungan berkelanjutan yang dapat membantu kesehatan masyarakat dan keseimbangan ekologi.

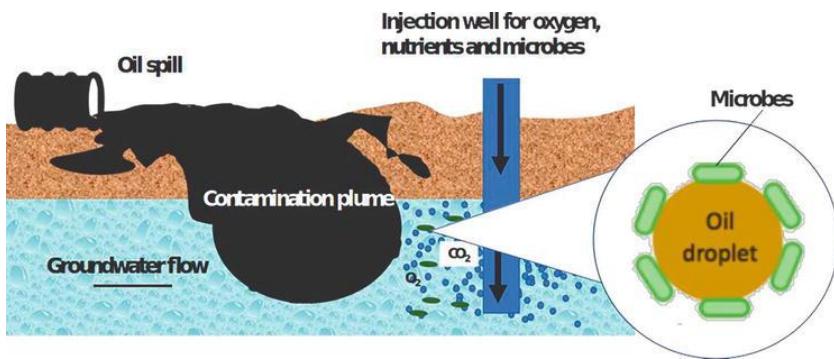
### 8.3 Jenis-jenis Bioremediasi

Proses bioremediasi secara umum dibagi menjadi dua kategori, yaitu bioremediasi *in situ* dan *ex situ*. Penggolongan ini berdasarkan asal tempat dan mekanisme penglikatan polutan dari situs yang terkontaminasi (Tyagi & Kumar, 2021). Bioremediasi *in-situ* melalui pengolahan bahan yang tercemar di lokasi aslinya. Metode ini dapat mengolah material terkontaminasi bervolume besar secara bersamaan dengan biaya rendah serta meminimalkan gangguan terhadap lingkungan sekitar (Azubuike *et al.*, 2016; Márquez *et al.*, 2021). Bioremediasi *ex-situ* melibatkan penggalian bahan terkontaminasi dan pengolahan bahan diluar situs kontaminasi. Teknik ini dilakukan melalui proses yang terkendali sehingga dapat meningkatkan hasil proses bioremediasi (Angelucci & Tomei, 2016; Silva *et al.*, 2020).

Teknik-teknik bioremediasi *in-situ* sebagai berikut:

1. ***Biostimulation***, dilakukan dengan cara penambahan nutrisi untuk mendorong populasi mikroba asli yang memiliki kemampuan untuk menghancurkan zat berbahaya (Atuchin||⊥ *et al.*, 2023; Azubuike *et al.*, 2016). Teknik ini dapat sangat efektif dalam mengelola komunitas mikroorganisme yang sangat besar di lokasi tertentu, namun karena kekurangan nutrisi, komunitas mikroorganisme tersebut tidak cukup aktif (Tribedi *et al.*, 2018). Teknik ini efektif untuk polutan organik seperti hidrokarbon minyak bumi dan berbagai pelarut industri (Cai *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2024).
2. ***Bioaugmentation***, metode yang memasukkan strain mikroba tertentu ke dalam lingkungan yang terkontaminasi untuk degradasi polutan tertentu. Teknik ini berbeda dengan biostimulasi, yang bergantung pada mikroorganisme yang sudah ada. Bioaugmentasi juga dapat melibatkan strain mikroba yang dimodifikasi secara genetik atau alami yang memiliki kemampuan baik dalam melawan kontaminan tertentu (Singal & Kaur, 2023). Metode ini dapat berguna dalam kasus dimana populasi mikroba tidak mencukupi atau ketika polutan tertentu tetap ada dan tidak dapat dihilangkan oleh komunitas mikroba asli (Bala *et al.*, 2022; Quesnel *et al.*, 2015)

3. **Phytoremediation**, tumbuhan dimanfaatkan untuk menyerap, menumpuk, maupun mendetoksifikasi polutan dari tanah dan air. Fitoremediasi dapat terjadi melalui berbagai mekanisme, seperti fitodegradasi (polutan dipecah oleh enzim tanaman), fitoekstraksi (logam berat diserap ke dalam jaringan tanaman), dan fitostabilisasi (polutan ditahan di zona akar sehingga mencegah kontaminan menyebar ke lingkungan sekitar melalui erosi atau pencucian tanah) (Thompson *et al.*, 2024; Yap *et al.*, 2021). Fitoremediasi biasanya terkait dengan polutan organik dan logam. Namun, penelitian yang sedang berlangsung berusaha mengoptimalkan fitoremediasi untuk rentang polutan yang lebih luas, termasuk air tanah (Xie *et al.*, 2024; Yap *et al.*, 2021).
4. **Mycoremediation**, cabang khusus dari bioremediasi yang memanfaatkan jamur untuk mendegradasi polutan, terutama logam berat dan senyawa organik (Ghosh *et al.*, 2023; Vaksmaa *et al.*, 2023). Jamur dapat mengolah berbagai zat berbahaya, termasuk bahan kimia industri dan obat-obatan. Hal ini disebabkan oleh aktivitas sistem enzim unik yang memungkinkan mereka memecah senyawa kompleks (Ghosh *et al.*, 2023; Ikechi-Nwogu & Akpan, 2022). Miselium jamur terbukti efektif dapat meningkatkan dekomposisi polutan di berbagai lingkungan (El-Gendi *et al.*, 2021; Ghosh *et al.*, 2023).
5. **Bioventing**, teknik ini digunakan dengan menambahkan udara atau oksigen ke zona tak jenuh tanah terkontaminasi, serta mendorong degradasi aerobik polutan organik oleh komunitas mikroba asli (Azubuike *et al.*, 2016; Mehboob *et al.*, 2025).
6. **Biosparging**, metode ini menggunakan prinsip injeksi udara seperti *bioventing*. Namun, metode ini menargetkan zona jenuh dengan menyuntikkan udara di bawah permukaan air tanah (**Gambar 8.1**). Hal tersebut meningkatkan konsentrasi oksigen dalam air tanah dan mendorong degradasi biologis senyawa organik volatil dan polutan organik lainnya (Ajiboye *et al.*, 2020; Chatterjee *et al.*, 2024).



Sumber: (Daghio *et al.*, 2017; Ossai *et al.*, 2022)

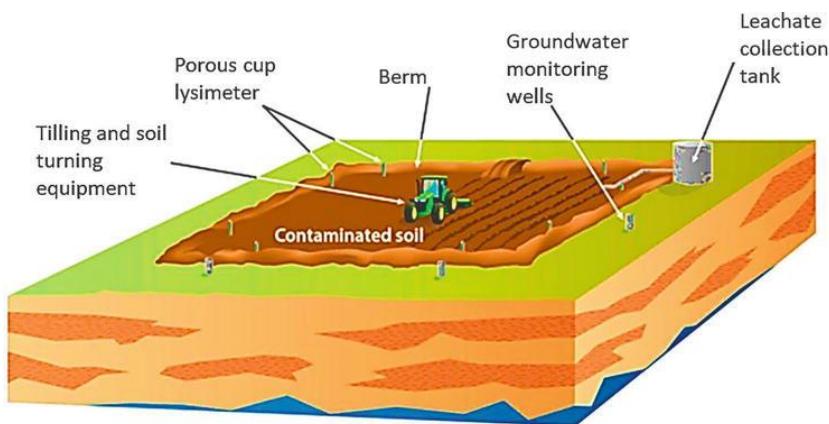
**Gambar 8.1 Biosparging untuk tanah yang terkontaminasi hidrokarbon minyak bumi**

7. **Bioslurping**, teknik ini menggabungkan *bioventing* dan pengaplikasian vakum untuk menghilangkan kontaminan. Vakum diterapkan pada sumur, yang secara bersamaan mengekstraksi air tanah terkontaminasi dan meningkatkan aliran udara ke area tersebut, sehingga mendukung proses bioremediasi aerobik. *Bioslurping* membantu dalam ekstraksi kontaminan dan mengurangi risiko pencemaran air tanah lebih lanjut melalui ekstraksi uap (Samborska-Goik & Pogrzeba, 2024; Torres-Farradá *et al.*, 2024).

Teknik-teknik bioremediasi *ex-situ* sebagai berikut:

1. **Biopiles**, teknik ini mengolah tanah yang terkontaminasi dengan aerasi, kelembaban, dan penambahan nutrisi secara terpisah. Kondisi terkendali ini meningkatkan populasi mikroba, yang mendorong degradasi kontaminan organik seperti hidrokarbon minyak bumi (Bala *et al.*, 2022; Balseiro-Romero *et al.*, 2019). *Biopiles* memiliki kemampuan untuk memaksimalkan oksigen, yang merupakan komponen penting dari proses biodegradasi aerobik (Perez-Vazquez *et al.*, 2024).

2. **Landfarming**, tanah yang terkontaminasi disebar di atas permukaan lapang yang telah disiapkan dan kemudian digemburkan secara berkala untuk meningkatkan aerasi dan aktivitas mikroba (**Gambar 8.2**). Pertumbuhan mikroba dijaga dan dikembangkan dengan menambahkan nutrisi. Teknik ini sering digunakan untuk kontaminasi hidrokarbon dan membutuhkan pengelolaan yang cermat untuk memastikan keefektifan dan meminimalkan lindi (Bala *et al.*, 2022; Yap *et al.*, 2021).

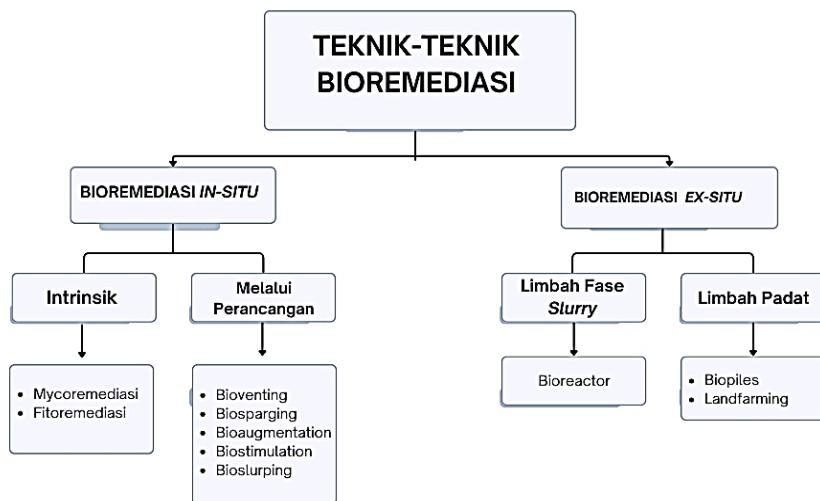


Sumber: (NSW EPA, 2014; Ossai *et al.*, 2022)

**Gambar 8.2. Landfarming untuk bioremediasi tanah yang terkontaminasi**

3. **Slurry Phase Bioreactors**, sistem ini digunakan untuk mengolah konsentrasi kontaminan yang tinggi dalam medium cair. Tanah yang tercemar dicampur dengan air, sehingga membentuk *slurry* yang kemudian diproses dengan biokatalis atau mikroorganisme yang berfungsi untuk menghancurkan polutan tertentu. Suhu, aerasi, dan pengadukan dapat dikontrol melalui bioreaktor sehingga dapat meningkatkan tingkat degradasi polutan organik secara signifikan (Balseiro-Romero *et al.*, 2019).

Secara lebih mudah, pengelompokan teknik bioremediasi digambarkan melalui diagram berikut ini (Gambar 8.3)



Sumber: Adaptasi Tyagi & Kumar, 2021

**Gambar 8.3 Teknik-teknik Bioremediasi**

#### 8.4 Aplikasi Bioremediasi dalam Industri

Beberapa teknik pemanfaatan bioremediasi dalam mendegradasi limbah industri sebagai berikut (**Tabel 8.1**)

**Tabel 8.1 Jenis, Asal, dan Teknik Bioremediasi Limbah Industri**

No	Jenis Limbah Industri	Asal Limbah Industri	Teknik Bioremediasi	Sumber Referensi
1	<i>Polychlorinated Biphenyls (PCBs)</i>	Pabrik pembangkit listrik dan peralatan listrik	<i>Soil scrubbing, bioreactors, landfarming</i>	(Tyagi & Kumar, 2021)
2	Polutan Minyak Bumi ( <i>Poly-aromatic Hydrocarbons</i> )	Aktivitas Industri Minyak dan Gas	<i>Biostimulation, Bioaugmentation, Biopiling, Bioventing, Biosparging, Bioslurping, dan Phytoremediation</i>	(Amini et al., 2024; Tyagi & Kumar, 2021)
3	Limbah Cair Industri Susu	Industri Susu	Pemanfaatan mikroba asli susu <i>Biostimulation, Bioaugmentation</i>	(Cardoso et al., 2022)

4	Logam Berat (Pb, Co, Cd, As, Ni, Hg, Zn, Cr, dan Cu)	Aktivitas Pertambangan, Industri, Pertanian, Tempat Pembuangan Sampah	<i>Mycoremediation, Soil scrubbing, biosparging, bioslurping, phytoremediation</i>	(Akram <i>et al.</i> , 2023; Tyagi & Kumar, 2021)
5	Pestisida ( <i>Carbo-furan, atrazin, diazinon, paration, 2,4-D, karbaril, dan glifosat</i>	Pertanian, tempat pembuangan sampah, dan industri pestisida	<i>Landfarming, soil scrubbing, bioreactors, bioslurping, dan phytoremediation</i>	(Tyagi & Kumar., 2021)
6	Pelarut klorinasi ( <i>Trichloroe thylene dan perchloroet hylene</i> )	Pabrik kimia, industri laundry	<i>Landfarming, phytoremediation</i>	(Tyagi & Kumar, 2021)

Pemilihan teknik bioremediasi, baik *in-situ* maupun *ex-situ*, didasarkan pada berbagai faktor seperti tujuan bioremediasi, jenis polutan, kondisi lingkungan, dan sumber daya ekonomi. Oleh karena itu, keunggulan dan keterbatasan teknik tersebut dipengaruhi oleh faktor-faktor tersebut. Penentuan strategi bioremediasi yang paling efektif harus melalui penilaian yang menyeluruh. Metode *ex-situ* umumnya menyediakan lingkungan remediasi lebih terkontrol, sehingga dapat mempercepat tujuan bioremediasi, meskipun memerlukan biaya lebih tinggi karena pengaplikasian diluar situs (Azubuike *et al.*, 2016; Patel *et al.*, 2020). Sebaliknya, metode *in-situ* lebih murah, tetapi memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai hasil yang diinginkan karena dipengaruhi oleh kondisi lokasi serta komunitas mikroba yang ada.(Paul *et al.* 2021; Perez-Vazquez *et al.*, 2024).

## 8.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Penggunaan Teknologi Bioremediasi

Salah satu faktor penting yang memengaruhi penggunaan teknologi bioremediasi dalam pengolahan limbah cair adalah sifat

polutan organik. Resistensi mikropolutan organik tertentu dapat mencegah proses biodegradasi. Struktur aromatik kompleks atau adanya klorin sering menunjukkan resistensi proses biodegradasi oleh strain mikroba (Grandclément *et al.*, 2017). Akibatnya diperlukan teknologi pengolahan khusus senyawa-senyawa tersebut.

Parameter operasional seperti pH, suhu, dan waktu retensi padatan dalam reaktor biologis juga sangat penting dalam perkembangan dan aktivitas metabolisme mikroba. Parameter yang tidak sesuai menghambat fungsi enzim yang berakibat kepada degradasi bahan organik yang lambat (B. *et al.*, 2024). Waktu retensi padatan juga memainkan peran penting dalam meningkatkan degradasi bahan organik (Hu *et al.*, 2018). Oleh karena itu, menjaga parameter operasional tetap optimal dapat meningkatkan efektivitas kinerja sistem.

Desain dan konfigurasi mesin pengolahan dalam metode bioremediasi merupakan komponen penting lainnya yang memengaruhi keberhasilan proses. Integrasi sistem dan konsep dasar bioremediasi perlu diperhatikan. Selain itu, konsumsi energi dan kelayakan sistem operasi perlu dicermati agar operasional mesin dapat bekerja secara optimal (Krzemiński *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2021).

Sistem bioremediasi limbah cair mempunyai syarat khusus dalam pengolahan. Perubahan beban organik dan senyawa beracun yang berlebihan dapat menghambat aktivitas mikroba dan mengurangi proses degradasi limbah (Sabliy *et al.*, 2019). Selain itu, adanya isu-isu baru seperti Transfer Gen Resistensi Antibiotik melalui sistem limbah cair telah menimbulkan kekhawatiran tentang dampak penggunaan teknologi bioremediasi konvensional. Evaluasi dan peningkatan proses biologis yang optimal sangat ditekankan untuk mengurangi dampak lingkungan lain (Honda *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023).

Banyak faktor yang saling berkaitan dalam memengaruhi bioremediasi pengolahan limbah, khususnya limbah cair. Jenis polutan, parameter operasional, desain teknologi, dan masalah lingkungan lain yang muncul merupakan faktor-faktor yang berperan dalam efektivitas dan efisiensi keberhasilan pengolahan limbah. Penelitian berkelanjutan

di bidang bioremediasi diperlukan untuk menghasilkan strategi pengelolaan limbah yang efisien dan berkelanjutan.

## **8.6 Keunggulan, Kelemahan, dan Tantangan Bioremediasi dalam Industri**

- Keunggulan**

Apabila dibandingkan dengan metode remediasi konvensional seperti metode kimia atau fisik, yang menimbulkan biaya pengolahan yang tinggi dan dapat menghasilkan produk sampingan yang berbahaya, bioremediasi sangat hemat biaya (Borchert *et al.*, 2021). Bioremediasi lebih ramah lingkungan dan mampu memulihkan fungsi ekologi (Sagar, 2025). Agen remediasi seperti mikroorganisme memiliki pertumbuhan yang cepat dan kemampuan degradasi polutan yang efektif, sehingga memungkinkan remediasi yang lebih cepat (Ayilara & Babalola, 2023). Bioremediasi dapat menargetkan berbagai jenis kontaminan, seperti hidrokarbon, pestisida, logam berat, dan limbah industri, sehingga mampu menangani berbagai jenis polutan (Karnwal *et al.*, 2024; Sozina & Danilov, 2023).

- Kelemahan**

Bioremediasi memungkinkan munculnya polutan sekunder yang dapat membuat proses pemulihan lingkungan lebih sulit (Rahman & Seraj, 2018). Metode bioremediasi seperti fitoremediasi seringkali dibatasi oleh laju pertumbuhan tanaman dan kurang efektif jika dibandingkan dengan solusi menggunakan mikroba dalam mendegradasi polutan secara cepat (Ayilara & Babalola, 2023). Praktik bioremediasi juga memerlukan sumber daya manusia yang terlatih dan memerlukan pendekatan teknis yang mahal. Akibatnya, penggunaannya dibatasi pada skala industri tertentu (Saha *et al.*, 2021).

- Tantangan**

Tantangan bioremediasi untuk digunakan secara luas dalam konteks industri berkaitan dengan penerapan dari kondisi

laboratorium ke aplikasi lapangan yang luas. Kondisi lingkungan juga penting untuk dipahami dalam penggunaan mikroba atau tumbuhan yang efektif (Liu, 2025). pH tanah, suhu, dan kelembaban dapat memengaruhi pilihan agen mikroba, yang mungkin sulit dikendalikan di lapangan (Thoppil & Zein, 2021). Selain itu, integrasi bioremediasi dengan teknologi lain, seperti nano-bioremediasi atau remediasi elektrokinetik, memberikan peluang penguatan sekaligus kompleksitas dalam penerapannya, yang dapat menimbulkan bias (Ehis-Eriakha *et al.*, 2022).

Tantangan ekologis bioremediasi berupa persaingan antara mikroba asli dengan mikroba introduksi. Keberhasilan pendekatan bioremediasi seringkali bergantung pada mikroba introduksi (Bodor *et al.*, 2020). Selain itu, beberapa pemilihan strain mikroba yang digunakan biasanya belum melalui uji di lingkungan alami sehingga tidak dapat diketahui efisiensi dalam mendegradasi polutan target (Nnaji *et al.*, 2022; Rawat *et al.*, 2022).

Tantangan berupa teknis pengelolaan kompleksitas polutan, batasan ekonomi, regulasi pengelolaan, dan interaksi dengan lingkungan perlu diperhatikan lebih lanjut. Kerja sama yang menggabungkan penelitian ilmiah, kemajuan teknologi, dan kerangka kebijakan yang mendukung praktik bioremediasi di industri harus terus dikembangkan. Kebutuhan pengolahan limbah yang tepat akibat dari perkembangan industri yang semakin masif menjadikan bioremediasi sebagai salah satu pengelolaan yang solutif.

# DAFTAR PUSTAKA

- Ajiboye, T. O., Kuvarega, A. T., & Onwudiwe, D. C. (2020). Recent Strategies for Environmental Remediation of Organochlorine Pesticides. *Applied Sciences*, 10(18), 6286. <https://doi.org/10.3390/app10186286>
- Akram, M. B., Khan, I., Rehman, M. U., Sarwar, A., Ullah, N., Rahman, S. U., Aziz, T., Alharbi, M., Alshammari, A., & Alasmari, A. F. (2023). Mycoremediation of Heavy Metals Contaminated Soil by Using Indigenous Metallo-tolerant Fungi. *Polish Journal of Chemical Technology*, 25(3), 1–13. <https://doi.org/10.2478/pjct-2023-0019>
- Amini, F., Giyahchi, M., & Moghimi, H. (2024). *Bioremediation of Petroleum Contamination by Microorganisms: Role of Microbial Communities and Applications*. 136–170. <https://doi.org/10.1039/bk9781837673131-00136>
- Angelucci, D. M., & Tomei, M. C. (2016). Ex Situ Bioremediation of Chlorophenol Contaminated Soil: Comparison of Slurry and Solid-phase Bioreactors With the Two-step Polymer Extraction-bioregeneration Process. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(6), 1577–1584. <https://doi.org/10.1002/jctb.4882>
- Arregui, L., Ayala, M., Gómez-Gil, X., Gutiérrez-Soto, G., Hernández-Luna, C. E., Santos, M. H. de los, Levin, L., Rojo-Domínguez, A., Romero-Martínez, D., Saparrat, M. C. N., Trujillo-Roldán, M. A., & Valdez-Cruz, N. A. (2019). Laccases: Structure, Function, and Potential Application in Water Bioremediation. *Microbial Cell Factories*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1248-0>
- Aryanfar, Y., Castellanos, H. G., Hammoodi, K. A., Farifteh, M., Keçebaş, A., Ghasemlou, S. M., Mammadova, A., Yengejeh, E. A., & Neghabi, Z. H. (2024). Cleaner and Sustainable Circular Economy Approaches for Bio-based Product Recovery From Industrial Effluents in a Biorefinery. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43(6). <https://doi.org/10.1002/ep.14483>
- Atuchin||Л, V. V., Asyakina, L., Serazetdinova, Y., Frolova, A., Velichkovich, N., & Prosekov, A. (2023). Microorganisms for

- Bioremediation of Soils Contaminated With Heavy Metals. *Microorganisms*, 11(4), 864. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040864>
- Ayilara, M. S., & Babalola, O. O. (2023). Bioremediation of Environmental Wastes: The Role of Microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, 5. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>
- Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation Techniques—classification Based on Site of Application: Principles, Advantages, Limitations and Prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(11). <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>
- B., S. K., Singh, N., Bhushan, Y. B., Chandra, P. K., Ali, H. A., Singh, S., & Kumar, S. R. S. (2024). Dry Weather Adaptations in Wastewater Treatment: Innovative Control Strategies for Effective Organic and Nitrogen Elimination. *E3s Web of Conferences*, 552, 1121. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201121>
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment. *Toxics*, 10(8), 484. <https://doi.org/10.3390/toxics10080484>
- Balseiro-Romero, M., Monterroso, C., Kidd, P., Lú-Chau, T. A., Gkorezis, P., Vangronsveld, J., & Giner-Casares, J. J. (2019). Modelling the Ex Situ Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil in a Slurry Bioreactor Using a Hydrocarbon-Degrading Inoculant. *Journal of Environmental Management*, 246, 840–848. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.034>
- Bodor, A., Bounedjoum, N., Vincze, G., Kis, Á. E., Laczi, K., Bende, G., Szilágyi, Á., Kovács, T., Perei, K., & Rákely, G. (2020). Challenges of Unculturable Bacteria: Environmental Perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09522-4>
- Borchert, E., Hammerschmidt, K., Hentschel, U., & Deines, P. (2021). Enhancing Microbial Pollutant Degradation by Integrating Eco-Evolutionary Principles With Environmental Biotechnology.

- Trends in Microbiology*, 29(10), 908–918.  
<https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.03.002>
- Cai, P., Zhuo, N., Liu, Y., He, Z., Shi, J., & Niu, M. (2020). Diagnosing Bioremediation of Crude Oil-Contaminated Soil and Related Geochemical Processes at the Field Scale Through Microbial Community and Functional Genes. *Annals of Microbiology*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01580-x>
- Cardoso, N. L. L., Silva, F. F., Moura-Silva, A. K., Ribeiro, J. A. T., Valinhas, R. V. e., Penido, W. D., Souza, I. B. S. de, Silva, J. A. d., Granjeiro, P. A., Magalhães, J. T. d., & Gonçalves, D. B. (2022). Bioremediation of Dairy Wastewater Using Bacteria: A Panoramic Review. *Research Society and Development*, 11(7), e30311729830. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29830>
- Chatterjee, B., Baruah, S., Chatterjee, D., Dey, S., & Mitra, A. K. (2024). Holistic Management of Wastewater Pollution Through Biological Treatment: A Sustainable Future. *Clean - Soil Air Water*, 52(12). <https://doi.org/10.1002/clen.202400059>
- Daghio, M., Aulenta, F., Vaiopoulou, E., Franzetti, A., Head, I. M., Arends, J. B. A., Sherry, A., Su, A., Bestetti, G., & Rabaey, K. (2017). Electrobioremediation of oil spills. *Water Research*, 114, 351–370. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.030>
- Dhir, B. (2017). *Bioremediation Technologies for the Removal of Pollutants*. In: Kumar, R., Sharma, A., Ahluwalia, S. (eds) *Advances in Environmental Biotechnology*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2_5)
- Ehis-Eriakha, C. B., Akemu, S. E., Otumala, S. O., & Ajuzieogu, C. A. (2022). *Biotechnological Potentials of Microbe Assisted Eco-Recovery of Crude Oil Impacted Environment*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98808>
- El-Gendi, H., Saleh, A. K., Badierah, R., Redwan, E. M., El-Maradny, Y. A., & El-Fakharany, E. M. (2021). A Comprehensive Insight Into Fungal Enzymes: Structure, Classification, and Their Role in Mankind's Challenges. *Journal of Fungi*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.3390/jof8010023>
- Fang, X., Zhang, M., Zheng, P., Wang, H., Wang, K., Lv, J., & Shi, F. (2024). Biochar-Bacteria-Plant Combined Potential for Remediation of Oil-Contaminated Soil. *Frontiers in*

- Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1343366>
- Fidiastuti, H.R., Prabowo, C.A., Lathifah, A.S., Amin, M., & Utomo, Y. (2019). *Bioremediasi Limbah Industri: Pemanfaatan mikroba dalam pengolahan limbah industri*. Penerbit Forind: Malang.
- Ghosh, S., Rusyn, I., Dmytruk, O. V., Dmytruk, K. V., Onyeaka, H., Gryzenhout, M., & Gafforov, Y. (2023). Filamentous Fungi for Sustainable Remediation of Pharmaceutical Compounds, Heavy Metal and Oil Hydrocarbons. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1106973>
- Grandclément, C., Seyssiecq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N., & Doumenq, P. (2017). From the Conventional Biological Wastewater Treatment to Hybrid Processes, the Evaluation of Organic Micropollutant Removal: A Review. *Water Research*, 111, 297–317. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.005>
- Honda, R., Matsuura, N., Hara-Yamamura, H., Sorn, S., Morinaga, Y., Than, V. H., Sabar, M. A., Masakke, Y., Asakura, S., & Watanabe, T. (2022). *Transition of Antimicrobial Resistome in Wastewater Treatment Plants: Impact of Process Configuration, Geographical Location and Season*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2011499/v1>
- Hu, H., Liao, K., Shi, Y., Ding, L., Zhang, Y., & Ren, H. (2018). Effect of Solids Retention Time on Effluent Dissolved Organic Nitrogen in the Activated Sludge Process: Studies on Bioavailability, Fluorescent Components, and Molecular Characteristics. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3449–3455. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05309>
- Ikechi-Nwogu, G. C., & Akpan, D. (2022). Mycoremediation Potential of Edible Mushroom (*Lentinus Squarrosulus* Mont) for Reduction of Physicochemical Properties and Microbial Load of Landfill Leachate Obtained From Choba Dumpsite, Rivers State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 26(12), 2101–2106. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i12.26>
- Karnwal, A., Martolia, S., Dohroo, A., Al-Tawaha, A. R., & Malik, T. (2024). Exploring Bioremediation Strategies for Heavy Metals and POPs Pollution: The Role of Microbes, Plants, and Nanotechnology. *Frontiers in Environmental Science*, 12.

- <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1397850>
- Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Singh, M., Joshi, D., Singh, J., Suyal, D. C., Kumar, A., Rajput, V. D., Yadav, A. N., Singh, K., & Singh, J. (2021). *Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges*.
- Krzemiński, P., Leverette, L., Malamis, S., & Katsou, E. (2017). Membrane Bioreactors – A Review on Recent Developments in Energy Reduction, Fouling Control, Novel Configurations, LCA and Market Prospects. *Journal of Membrane Science*, 527, 207–227. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.010>
- Krzmarzick, M. J., Taylor, D. K., Fu, X., & Mccutchan, A. L. (2018). *Review Article Diversity and Niche of Archaea in Bioremediation*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3194108>
- Li, X., Hu, J., Wang, C., & Ge, W. (2023). The Effect of Antibiotics on Consortium Structure in Effluent and Sludge From a Municipal Wastewater Treatment Plant. *E3s Web of Conferences*, 441, 2013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344102013>
- Liu, R. (2025). Research Progress on Bioremediation Technologies for Heavy Metal Contaminated Soils. *Highlights in Science Engineering and Technology*, 153, 415–423. <https://doi.org/10.54097/mgcqfj14>
- Márquez, A., Freytes-Boggio, E., Cárdenas-Izaguirre, S., Maldonado, J., Pérez, E. G., Pérez, S., & Buroz, E. (2021). An Approach to Remediation of a Tropical Aquifer Contaminated With Hydrocarbons. *Environmental Quality Management*, 31(4), 357–390. <https://doi.org/10.1002/tqem.21820>
- Mehboob, M., Rehman, A., Naz, I., Shuja, M. N., Farooq, A. S., & Khattak, B. (2025). Bioremediation Potential of Indigenous Bacterial Isolates for Treating Petroleum Hydrocarbons-Induced Environmental Pollution. *Acs Omega*, 10(3), 2501–2516. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06434>
- Nnaji, P. T., Morse, H. R., Adukuwu, E., & Chidugu-Ogborigbo, R. U. (2022). Sponge–Microbial Symbiosis and Marine Extremozymes: Current Issues and Prospects. *Sustainability*, 14(12), 6984. <https://doi.org/10.3390/su14126984>
- NSW EPA. (2014). *Best Practice Note: Landfarming*. State of New

- State Wales and Environmental Protection Authority: Sydney New South Wales
- Ossai, I. C., Hamid, F. S., & Hassan, A. (2022). *Biological Treatments for Petroleum Hydrocarbon Pollutants: The Eco-Friendly Technologies*. Book Chapter: Hazardous Waste Management. DOI: 10.5772/intechopen.10205
- Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K., Desai, C., & Madamwar, D. (2020). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>
- Paul, O., Jasu, A., Lahiri, D., Nag, M., & Ray, R. R. (2021). In Situ and Ex Situ Bioremediation of Heavy Metals: The Present Scenario. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 29(4), 454–469. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2021.15447>
- Perez-Vazquez, A., Barciela, P., & Prieto, M. A. (2024). In Situ and Ex Situ Bioremediation of Different Persistent Soil Pollutants as Agroecology Tool. *Processes*, 12(10), 2223. <https://doi.org/10.3390/pr12102223>
- Quesnel, D. M., Oldenburg, T. B. P., Larter, S., Gieg, L. M., & Chua, G. (2015). Biostimulation of Oil Sands Process-Affected Water With Phosphate Yields Removal of Sulfur-Containing Organics and Detoxification. *Environmental Science & Technology*, 49(21), 13012–13020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01391>
- Rahman, T., & Seraj, M. F. (2018). Available Approaches of Remediation and Stabilisation of Metal Contamination in Soil: A Review. *American Journal of Plant Sciences*, 09(10), 2033–2052. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.910148>
- Rawat, D., Sharma, U., Poria, P., Finlan, A., Parker, B., Sharma, R. S., & Mishra, V. (2022). Iron-Dependent Mutualism Between Chlorella Sorokiniana and Ralstonia Pickettii Forms the Basis for a Sustainable Bioremediation System. *Isme Communications*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s43705-022-00161-0>
- Sabliy, L., Kuzminskiy, Y., Жукова, B., Kozar, M., & Sobczuk, H. (2019). New Approaches in Biological Wastewater Treatment Aimed at Removal of Organic Matter and Nutrients. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26(2), 331–343.

<https://doi.org/10.1515/eces-2019-0023>

- Sagar, K. (2025). Advanced Approaches for Bioremediation of Emerging Pollutants: Development of a Sustainable and Green Environment. *Environment Conservation Journal*, 26(3), 1001–1021. <https://doi.org/10.36953/ecj.32483067>
- Saha, L., Tiwari, J., Bauddh, K., & Ma, Y. (2021). Recent Developments in Microbe–Plant-Based Bioremediation for Tackling Heavy Metal-Polluted Soils. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.731723>
- Sahoo, M. (2024). Exploring the Role of Plants in Bio-Remediation: Harnessing Nature’s Clean-Up Agents. *International Journal of Multidisciplinary Approach Research and Science*, 2(02), 726–732. <https://doi.org/10.59653/ijmars.v2i02.676>
- Samborska-Goik, K., & Pogrzeba, M. (2024). A Critical Review of the Modelling Tools for the Reactive Transport of Organic Contaminants. *Applied Sciences*, 14(9), 3675. <https://doi.org/10.3390/app14093675>
- Sardrood, B. P., & Goltepah, E. M. (2015). *Chapter 1 An Introduction to Bioremediation Chapter 1 An Introduction to Bioremediation*. January 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33811-3>
- Sharma, P., Kumar, A., & Kim, S. (2021). Environmental Technology & Innovation Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101826. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101826>
- Shi, Y., Wang, Z., Du, X., Gong, B., Jegatheesan, V., & Haq, I. U. (2021). Recent Advances in the Prediction of Fouling in Membrane Bioreactors. *Membranes*, 11(6), 381. <https://doi.org/10.3390/membranes11060381>
- Sikdar, D., Kanungo, I., & Das, D. (2022). *Microbial Enzymes: A Summary Focusing on Biotechnology Prospective for Combating Industrial Pollutants*. 70–76. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-020-6\\_8](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-020-6_8)
- Silva, I. G. S. da, Almeida, F. C. G., Silva, N. M. P. da R. e, Casazza, A. A., Converti, A., & Sarubbo, L. A. (2020). Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends. *Energies*, 13(18), 4664. <https://doi.org/10.3390/en13184664>

- Singal, N., & Kaur, S. (2023). Bioremediation: Sustainable Approach for Pollution Control. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 20(4), 1–18. <https://doi.org/10.9734/ajee/2023/v20i4444>
- Sozina, I., & Danilov, A. (2023). Microbiological Remediation of Oil-Contaminated Soils. *Journal of Mining Institute*, 260, 297–312. <https://doi.org/10.31897/pmi.2023.8>
- Spill Tech Environmental. (2024). *History of Bioremediation*. Accessed in <https://spilltech.ie/history-of-bioremediation/#:~:text=It%20may%20come%20as%20a,of%20oil%2C%20fuel%20and%20pollutants> on 17 November 2025.
- Suresh, V. M., Kumaran, T. V., Sasikumar, C. S., & Papinazath, T. (2003). *ENVIRONMENTAL MANAGEMENT: - BIOREMEDIATION OF POLLUTED ENVIRONMENT*. 465–469.
- Tarfeen, N., Nisa, K. U., Hamid, B., Bashir, Z., Yatoo, A. M., Dar, M. A., Mohiddin, F. A., Amin, Z., Ahmad, R. A., & Sayyed, R. Z. (2022). Microbial Remediation: A Promising Tool for Reclamation of Contaminated Sites With Special Emphasis on Heavy Metal and Pesticide Pollution: A Review. *Processes*, 10(7), 1358. <https://doi.org/10.3390/pr10071358>
- Thompson, R. M., George, D. L., & Montero-Calasanz, M. d. C. (2024). Actinorhizal Plants And Frankiaceae: The Overlooked Future of Phytoremediation. *Environmental Microbiology Reports*, 16(6). <https://doi.org/10.1111/1758-2229.70033>
- Thoppil, Y., & Zein, S. H. S. (2021). Techno-Economic Analysis and Feasibility of Industrial-Scale Biodiesel Production From Spent Coffee Grounds. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127113>
- Torres-Farradá, G., Thijs, S., Rineau, F., Guerra, G., & Vangronsveld, J. (2024). White Rot Fungi as Tools for the Bioremediation of Xenobiotics: A Review. *Journal of Fungi*, 10(3), 167. <https://doi.org/10.3390/jof10030167>
- Tyagi, B., & Kumar, N. (2021). Chapter 1. Bioremediation: principles and applications in environmental management. In *Bioremediation for Environmental Sustainability* (Issue March 2020). INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00001-8>

- Vaksmaa, A., Guerrero-Cruz, S., Ghosh, P., Zeghal, E., Hernando-Morales, V., & Niemann, H. (2023). Role of Fungi in Bioremediation of Emerging Pollutants. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1070905>
- Vuković Domanovac, M.; Volf, M.; Šabić Runjavec, M.; Terzić, I. (2025). Sustainable and Advanced Strategies for Bioremediation of Highly Contaminated Wastewater. *Processes*, 13, 2250. <https://doi.org/10.3390/pr13072250>
- Xie, M., Zhang, X., Jing, Y., Du, X., Zhang, Z., & Tan, C. (2024). Review on Research and Application of Enhanced in-Situ Bioremediation Agents for Organic Pollution Remediation in Groundwater. *Water*, 16(3), 456. <https://doi.org/10.3390/w16030456>
- Yap, H. S., Zakaria, N. N., Zulkharnain, A., Sabri, S., Gómez-Fuentes, C., & Ahmad, S. A. (2021). Bibliometric Analysis of Hydrocarbon Bioremediation in Cold Regions and a Review on Enhanced Soil Bioremediation. *Biology*, 10(5), 354. <https://doi.org/10.3390/biology10050354>

# **BAB 9**

## **Industri Lingkungan II: Analisis Dampak Lingkungan dalam Biologi**

**Nur Islakhun Nisa'**

Tingkat pembangunan industri dan infrastruktur di dunia modern berkembang sangat pesat dan tak terhindarkan. Perkembangan mendorong pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup manusia, tetapi juga ada dampak konsekuensi terhadap lingkungan. Untuk menjaga keseimbangan antara pembangunan dan kelestarian ekosistem, dibutuhkan sebuah instrumen yang mampu mengevaluasi proses tersebut secara sistematis dan menyeluruh. Instrumen inilah yang dikenal sebagai Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL). Dengan demikian, AMDAL bukan sekadar persyaratan administratif, melainkan kajian ilmiah yang komprehensif dan konstruktif untuk memastikan bahwa setiap kegiatan pembangunan tetap berada dalam koridor keberlanjutan sejak sebelum dimulai.

Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) didefinisikan sebagai telaah terhadap pengaruh signifikan dan krusial dari suatu rencana usaha dan/atau kegiatan terhadap lingkungan hidup. Kajian ini merupakan prasyarat penting dalam proses pengambilan keputusan terkait perizinan dan pelaksanaan usaha atau kegiatan tersebut, sebagaimana termaktub dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 mengenai Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Secara fundamental, AMDAL berfungsi sebagai instrumen prediktif yang bertujuan untuk mengidentifikasi, memperkirakan, menilai, dan mengkomunikasikan konsekuensi potensial dari suatu proyek pembangunan terhadap mutu lingkungan,

sebelum proyek tersebut benar-benar diimplementasikan (Glasson, Therivel, & Chadwick, 2005). Meskipun kajian AMDAL mencakup perspektif multidisiplin yang luas, bidang biologi memegang peranan yang sangat sentral. Hal ini karena biologi menyediakan landasan dan metodologi untuk mengevaluasi dan mengukur berbagai komponen lingkungan yang hidup (biotik) yang mungkin terpengaruh oleh proyek yang direncanakan.

Pelaksanaan Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) memiliki nilai strategis yang sangat penting, terutama bagi sektor-sektor industri dengan potensi risiko tinggi, seperti pertambangan, minyak dan gas, serta pengolahan hasil hutan. Peran utama AMDAL dapat diringkas dalam tiga fungsi krusial. Pertama, sebagai penentu kelayakan lingkungan. AMDAL bertindak sebagai instrumen evaluasi untuk menilai kesesuaian lingkungan dari suatu rencana proyek. Proses ini menentukan apakah suatu kegiatan layak atau dapat diterima dari perspektif lingkungan. Apabila evaluasi ini ditiadakan, potensi kerusakan lingkungan, sosial, dan ekonomi di masa mendatang akan mengalami peningkatan yang signifikan (Gilpin, 1995). Kedua, instrumen mitigasi dan pencegahan dini. Fungsi AMDAL juga mencakup perannya sebagai sarana untuk mitigasi dan pencegahan dampak negatif. Melalui analisis ini, langkah-langkah penanggulangan dampak yang berpotensi timbul dapat dirumuskan sejak fase perencanaan awal, misalnya melalui penerapan standar baku mutu limbah yang ketat atau perancangan rekayasa teknis yang ramah lingkungan. Ketiga, landasan hukum dan akuntabilitas. Pada akhirnya, AMDAL memberikan kepastian hukum dan legitimasi bagi suatu kegiatan usaha. Dokumen ini menjadi dasar legal untuk penerbitan izin usaha dan menjamin bahwa akuntabilitas proyek terpenuhi terhadap seluruh regulasi lingkungan hidup yang berlaku.

Disiplin ilmu biologi memiliki peranan sentral dalam proses pengelolaan lingkungan. Kontribusi para ahli biologi dimulai dengan pelaksanaan survei awal dan penetapan garis dasar (*baseline*). Kegiatan ini bertujuan untuk memetakan kondisi fundamental suatu ekosistem pada tahap permulaan, yang kemudian berfungsi sebagai patokan untuk semua pengukuran dan evaluasi di masa mendatang. Biologi

menyediakan kerangka pemodelan yang esensial untuk memprediksi dampak lingkungan. Sebagai contoh, ilmu ini memungkinkan estimasi mengenai bagaimana aktivitas tertentu, seperti deforestasi skala besar atau kejadian tumpahan minyak tang akan memengaruhi rantai makanan dan fungsi ekosistem secara keseluruhan (Wathern, 1988). Berdasarkan hasil prediksi yang telah diidentifikasi, para ahli biologi kemudian merumuskan Rencana Pengelolaan Lingkungan (RKL). Perumusan ini mencakup perancangan dan implementasi program mitigasi dan restorasi yang efektif, misalnya melalui pembangunan jalur lintasan satwa liar atau pelaksanaan kegiatan transplantasi karang untuk memulihkan habitat yang rusak.

### **Komponen Lingkungan dalam Analisis Dampak**

Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) mewajibkan adanya evaluasi yang holistik (menyeluruh) terhadap sistem lingkungan yang ada.

Secara mendasar, sistem lingkungan ini terdiri dari dua jenis komponen yang saling berhubungan dan memengaruhi satu sama lain, yaitu:

1. Komponen Biotik: Merujuk pada seluruh unsur hidup (organisme).
2. Komponen Abiotik: Meliputi seluruh unsur non-hidup (fisik dan kimia).

Kunci utama untuk dapat memprediksi dampak yang ditimbulkan oleh suatu rencana pembangunan secara cermat adalah dengan menguasai pemahaman yang mendalam mengenai interaksi kompleks antar komponen-komponen lingkungan tersebut (Pinto, 2018).

#### ***Komponen Biotik***

Komponen biotik merujuk pada keseluruhan organisme hidup yang berada dalam suatu ekosistem dan merupakan entitas utama yang terdampak oleh fluktuasi atau perubahan lingkungan. Dalam lingkup kajian Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL), komponen ini diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok spesifik:

1. Flora (Tumbuhan): Kategori ini mencakup seluruh jenis vegetasi, mulai dari flora berukuran kecil hingga pepohonan besar. Perannya sangat penting sebagai produsen primer yang menjadi dasar rantai makanan, serta memiliki fungsi vital dalam menjaga siklus karbon dan memberikan perlindungan terhadap lapisan tanah.
2. Fauna (Hewan): Kelompok ini meliputi semua spesies hewan, baik yang merupakan subjek konservasi maupun yang memiliki nilai ekonomi tertentu. Fauna berperan penting sebagai konsumen dalam ekosistem dan bertindak sebagai agen penyebar benih.
3. Mikroorganisme: Meskipun berukuran mikroskopis—termasuk bakteri, jamur, dan mikroba lainnya—organisme ini memiliki peran yang fundamental sebagai dekomposer. Peran ini memastikan kelangsungan siklus nutrien dan secara langsung memengaruhi kesuburan tanah.

Selain meninjau keberadaan setiap kategori, AMDAL juga diwajibkan untuk menganalisis secara mendalam Interaksi Biotik yang rumit, seperti hubungan predasi (mangsa-pemangsa), kompetisi (perebutan sumber daya), dan simbiosis (hubungan mutualistik atau parasitisme). Hal ini krusial karena gangguan pada salah satu bentuk interaksi dapat memicu efek berantai (efek domino) yang berdampak pada seluruh jejaring kehidupan dalam ekosistem (Sodhi et al., 2011).

## **Komponen Abiotik**

Komponen abiotik merupakan elemen fisik dan kimia yang menjadi penentu utama dalam pembentukan lingkungan hidup. Faktor-faktor ini tidak hanya berfungsi sebagai penyedia sumber daya esensial, tetapi juga berperan dalam membatasi penyebaran dan perkembangan organisme hidup. Dalam kerangka Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL), fokus kajian wajib ditujukan pada beberapa aspek kritis komponen abiotik berikut:

1. Tanah (Lahan)

Evaluasi dilakukan terhadap karakteristik tanah, mencakup jenis, tingkat kesuburan, struktur, dan stabilitasnya. Dampak

yang ditimbulkan oleh suatu kegiatan terhadap lahan seringkali berujung pada permasalahan serius seperti erosi, sedimentasi, dan penurunan kualitas kesuburan pada lahan pertanian.

### 2. Air (Hidrologi)

Aspek hidrologi meliputi baik air permukaan (seperti sungai dan danau) maupun air tanah. Parameter yang harus diukur meliputi kuantitas (ketersediaan), kualitas (termasuk pH dan keberadaan zat kontaminan), serta pola hidrologi di wilayah studi.

### 3. Udara dan Kebisingan

Kajian difokuskan pada kualitas udara (misalnya, konsentrasi polutan dan Particulate Matter) serta tingkat kebisingan. Kedua faktor ini memiliki implikasi signifikan terhadap kesehatan populasi manusia maupun kelangsungan hidup biota.

### 4. Iklim

Parameter iklim yang dianalisis mencakup kondisi makro dan mikro, seperti curah hujan, suhu, kelembapan, dan kecepatan angin. Faktor-faktor iklim ini secara langsung memengaruhi pola vegetasi dan keberhasilan sektor pertanian di suatu wilayah.

### 5. Topografi (Bentuk Lahan)

Aspek bentuk lahan mengacu pada konfigurasi permukaan bumi (seperti tingkat kemiringan dan elevasi). Topografi memiliki peran penting dalam mengatur aliran air dan menentukan tingkat risiko bencana alam di lokasi proyek.

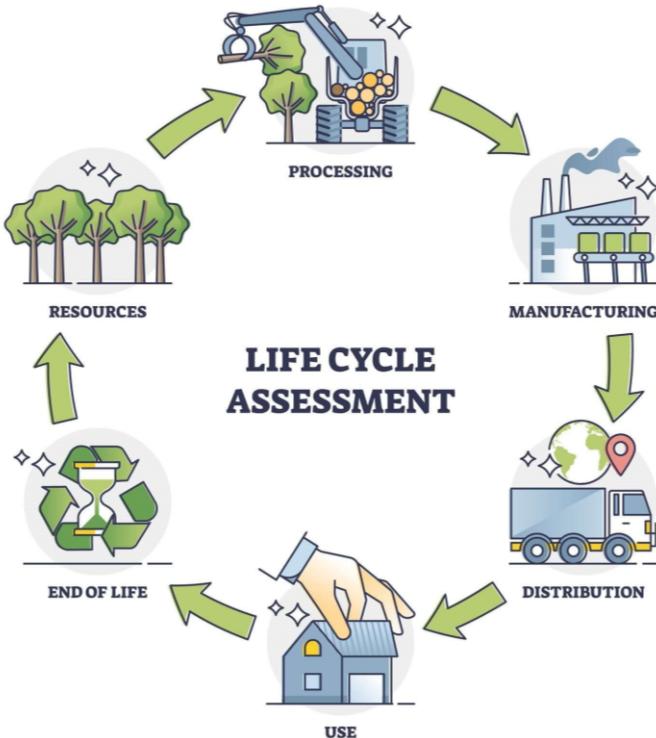
## **Hubungan Komponen Biotik Abiotik dalam Penentuan Dampak**

Kualitas suatu analisis dampak lingkungan ditentukan oleh pemahaman mendalam tentang hubungan timbal balik yang kompleks antara komponen biotik (makhluk hidup) dan abiotik (faktor fisik-kimia). Perubahan pada salah satu komponen ini akan secara pasti menimbulkan efek berantai pada komponen lainnya. Sebagai ilustrasi, pencemaran sumber daya air (komponen abiotik) akan berdampak langsung pada penurunan drastis populasi fauna akuatik seperti ikan (komponen biotik), sehingga mengganggu fungsi alami ekosistem

perairan. Sebaliknya, hilangnya flora (biotik) akibat praktik deforestasi akan mengakibatkan peningkatan risiko erosi dan sedimentasi tanah (abiotik), yang pada akhirnya akan memperburuk kualitas air. Penilaian dampak yang akurat harus memiliki kemampuan untuk menelusuri dan memetakan seluruh jalur interaksi ini. Tujuannya adalah untuk merumuskan strategi mitigasi yang benar-benar efektif, yang esensial untuk menjamin keberlanjutan ekosistem (Enriquez *et al.*, 2017).

### **Metode Identifikasi Dampak Biologis dalam Kajian AMDAL**

Akurasi dan validitas ilmiah dalam proses Penilaian Dampak Lingkungan (AMDAL), identifikasi dampak biologis wajib dilaksanakan dengan menggunakan serangkaian metode yang terstruktur dan teruji. Pendekatan untuk analisis ini sangat beragam, mulai dari metode kualitatif deskriptif yang mendalam, hingga penerapan pemodelan spasial dan kuantitatif yang sifatnya lebih kompleks. Ragam metodologi ini sangat penting untuk memastikan bahwa semua aspek ekosistem yang berpotensi terkena dampak telah diperhitungkan dan dievaluasi secara komprehensif.



Sumber: capecrystalbrands (2024)

**Gambar 9.1 Life Cycle Assessment (LCA)**

### Metode Deskriptif dan Strukturisasi Dampak

Langkah awal proses penentuan dampak biologis, digunakan serangkaian metode yang bersifat deskriptif dan terstruktur. Pendekatan-pendekatan ini berfungsi sebagai kerangka dasar yang esensial dalam menata dan mengelola volume informasi yang besar terkait lingkungan hidup. Tiga metode awal utama tersebut meliputi:

#### 1. Daftar Cek (*Checklist*)

Metode ini berupa daftar komprehensif yang memuat seluruh aktivitas proyek dan daftar komponen biologis lingkungan (seperti flora, fauna, dan berbagai jenis ekosistem) yang diperkirakan akan terpengaruh. Penggunaan daftar cek ini lazim dilakukan pada fase-fase awal studi (yaitu screening dan scoping) guna menjamin bahwa semua komponen biologis yang krusial telah teridentifikasi dan tidak ada yang terabaikan (Glasson, Therivel, & Chadwick, 2019).

## 2. Metode Matriks

Matriks digunakan sebagai alat untuk membuat korelasi antara aktivitas proyek yang spesifik dengan komponen biologis yang berpotensi terdampak. Matriks yang relatif sederhana (misalnya Matriks Leopold) memungkinkan penilai untuk memberikan penilaian atau skor kualitatif (positif atau negatif, serta tingkat besaran dampak) terhadap interaksi yang terjadi (Canter, 1996).

## 3. Diagram Jaringan Sebab Akibat (*Network Diagram*)

Metode ini berfungsi untuk memvisualisasikan hubungan sebab-akibat yang sifatnya kompleks dan berantai, yang dikenal sebagai dampak sekunder dan tersier. Sebagai ilustrasi, deforestasi (dampak utama) dapat memicu erosi, yang selanjutnya akan meningkatkan sedimentasi di badan sungai (dampak sekunder), dan pada akhirnya mengakibatkan kerusakan habitat bagi populasi ikan (dampak tersier biologis).

## Metode Kuantitatif dan Analisis Ilmiah

Pendekatan ini bertujuan untuk memprediksi magnitude atau besaran dampak yang terukur secara ilmiah, didukung oleh data yang valid. Beberapa metodologi utama yang digunakan dalam identifikasi dampak mendalam meliputi:

### 1. Penilaian Skala Dampak (*Skoring Dampak*)

Metode ini melibatkan pemberian nilai atau bobot numerik dan dilanjutkan dengan evaluasi matematis terhadap dampak-dampak biologis yang telah teridentifikasi sebelumnya. Proses ini sering kali mengintegrasikan data yang diperoleh dari lapangan dengan bobot yang merefleksikan kepentingan ekologis dari komponen yang terdampak, sehingga menghasilkan suatu nilai dampak total yang terukur (Ortolano, 1997).

### 2. Analisis Risiko Ekologis (*Ecological Risk Assessment - ERA*)

ERA adalah kerangka formal yang dipakai untuk mengevaluasi probabilitas dan konsekuensi yang ditimbulkan oleh paparan zat pencemar (seperti yang berasal dari limbah industri) terhadap berbagai tingkatan biologis—mulai dari organisme tunggal, populasi, hingga seluruh ekosistem. Pendekatan ini secara spesifik

berfokus pada prediksi dampak toksikologis terhadap biota (Suter, 2007).

### **3. Bioindikator dan Biomonitoring**

Teknik ini memanfaatkan organisme hidup (contohnya, lumut atau makroinvertebrata bentik yang ditemukan di perairan sungai) sebagai alat alami untuk mengukur atau memantau perubahan pada kualitas lingkungan. Data kuantitatif langsung mengenai integritas ekosistem yang mungkin sulit diperoleh hanya melalui analisis kimiawi yang dapat disimpulkan dari kehadiran, tingkat kelimpahan, atau kondisi kesehatan spesies-spesies indikator ini.

## **Metode Spasial dan Pemetaan Habitat**

Metode spasial memanfaatkan keunggulan teknologi geografis untuk tujuan visualisasi, analisis, dan peramalan dampak suatu kegiatan dari perspektif lokasi geografis. Dua penerapan utama metode ini adalah:

### **1. Analisis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Pemetaan Sumber Daya Biologis**

SIG (GIS) merupakan alat esensial dalam memproses data dari citra satelit dan survei lapangan. Penggunaan SIG memungkinkan terciptanya peta yang menunjukkan sebaran jenis vegetasi, luas area hutan, dan lokasi habitat vital. Dengan kemampuan overlay data, penilaian dampak dapat menempatkan rencana proyek di atas peta kawasan sensitif biologis untuk memprediksi kehilangan habitat dengan tingkat akurasi yang tinggi (Smit, 1995).

### **2. Penentuan Batas Spasial (*Boundary Mapping*) Dampak Habitat**

Metode ini berfokus pada penetapan batas-batas geografis atau zona pengaruh dari suatu proyek. Penentuan batas spasial membantu dalam mengestimasi luasan area yang diprediksi akan mengalami perubahan signifikan pada fungsi ekologisnya, termasuk potensi terjadinya fragmentasi habitat atau isolasi populasi satwa liar.

## ***Metode Eksperimental dan Survei Biologi Lapangan***

Identifikasi dampak biologis yang valid berdasarkan landasan utamanya adalah pengumpulan data dasar (*baseline*) di lapangan.

Proses ini dilaksanakan melalui serangkaian metode survei dan eksperimental yang terstruktur, meliputi:

### **1. Pengambilan Sampel Flora dan Fauna**

Kegiatan ini bertujuan untuk menetapkan keanekaragaman (spesies apa saja yang ada) dan kelimpahan (jumlah individu) spesies yang mendiami area studi. Penggunaan teknik statistika sangat umum dalam metode ini untuk menjamin bahwa sampel yang diambil benar-benar mewakili kondisi ekologis seluruh lokasi kajian.

### **2. Penggunaan Transek, Plot, dan Kuadrat**

Teknik ini merupakan prosedur baku dalam bidang ekologi yang dimanfaatkan untuk melakukan survei terhadap vegetasi (flora) dan komunitas invertebrata kecil. Sebagai contoh, penggunaan *plot* berfungsi untuk mengukur kerapatan pohon per satuan luas, sehingga menghasilkan data kuantitatif yang diperlukan untuk memperkirakan dampak potensial akibat deforestasi.

### **3. Teknik Penangkapan dan Penghitungan Satwa**

Metode ini melibatkan beragam prosedur spesifik. Contohnya, penggunaan *mist netting* untuk burung dan kelelawar, pemasangan *perangkap (trap)* untuk mamalia berukuran kecil, atau penerapan *pemindaian jalur (line transect)* untuk satwa berukuran besar. Data yang dihasilkan berupa estimasi kepadatan populasi yang sangat vital untuk mengevaluasi dampak yang mungkin ditimbulkan oleh hilangnya habitat terhadap kelangsungan hidup suatu spesies.

Integrasi dari keseluruhan pendekatan ini, yang mencakup aspek kualitatif, kuantitatif, dan spasial, memungkinkan tim AMDAL untuk menyajikan penilaian dampak biologis yang holistik dan akuntabel. Hal ini menjadi prasyarat utama dalam mendukung proses pengambilan keputusan menuju pembangunan yang berkelanjutan.

## **Pengambilan dan Analisis Data Biologi Lingkungan**

Penilaian dampak lingkungan yang akurat dan didukung oleh prinsip ilmiah sangat ditentukan oleh mutu proses pengambilan dan analisis data biologi lingkungan. Bagian ini merupakan elemen inti dari studi AMDAL, sebab berfungsi menyajikan bukti empiris mengenai kondisi ekosistem awal (baseline) serta proyeksi perubahan yang mungkin

timbul sebagai konsekuensi dari kegiatan proyek. Pelaksanaan proses ini memerlukan ketelitian metodologis dan pemahaman komprehensif di bidang ekologi dan biostatistik (Sutherland *et al.*, 2004). Teknik pengambilan sampel biologi lingkungan harus dilaksanakan secara sistematis guna menjamin bahwa data yang berhasil dihimpun benar-benar mewakili keadaan ekosistem di seluruh area kajian.

1. Inventarisasi keanekaragaman hayati yang bertujuan untuk mendokumentasikan secara rinci kekayaan spesies flora dan fauna yang ada di lokasi studi. Metodologi yang diaplikasikan cukup beragam, misalnya, penggunaan metode transek atau plot untuk vegetasi, serta metode garis transek dan pemasangan kamera jebak untuk fauna darat. Sementara itu, untuk ekosistem perairan, teknik yang digunakan mencakup penggunaan jaring plankton, *grab sampler* (untuk bentos), dan *electrofishing* (untuk ikan).
2. Pengukuran struktur komunitas untuk mencatat kehadiran spesies penting. Pengukuran ini berkaitan dengan cara spesies berinteraksi dan terdistribusi di suatu habitat. Analisis ini melibatkan penetapan parameter seperti kepadatan, dominansi, dan frekuensi spesies, yang memberikan indikasi mengenai stabilitas dan kesehatan suatu ekosistem (Kent & Coker, 2007).
3. Pengambilan sampel matriks lingkungan untuk parameter biologis fokus utama sampel tanah, air, dan udara biasanya adalah aspek kimia dan fisika, matriks-matriks ini juga diambil untuk mengevaluasi parameter biologis. Contohnya meliputi analisis mikroba, identifikasi keberadaan patogen (misalnya bakteri koliform), atau pelaksanaan uji biologi pada matriks tersebut guna mengetahui dampak pencemaran terhadap biota.

### **Regulasi dan Kebijakan Lingkungan**

Implementasi Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) terikat erat dengan kerangka regulasi dan kebijakan yang menjadi payung hukumnya. Di Indonesia, AMDAL didukung oleh landasan legal yang kokoh, yang secara spesifik dirancang untuk menjamin bahwa proses

pembangunan dapat berjalan selaras dengan kaidah perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. Kerangka regulasi ini berfungsi sebagai instrumen penegakan yang sangat penting, yang mewajibkan para pelaku usaha agar mengintegrasikan aspek-aspek ekologis dalam setiap fase perencanaan hingga operasional proyek mereka (Siregar, 2019).

### **Regulasi AMDAL di Indonesia**

Regulasi lingkungan hidup di Indonesia tersusun dalam suatu struktur hierarkis, mulai dari dasar konstitusional hingga aturan teknis pelaksana. Landasan hukum utama untuk pelaksanaan Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) adalah Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UUPPLH).

UUPPLH secara tegas mengamanatkan bahwa setiap aktivitas atau proyek usaha yang diprediksi akan menimbulkan dampak yang besar dan penting terhadap lingkungan, wajib memperoleh izin lingkungan yang prosesnya harus didahului oleh kajian AMDAL. Ketentuan teknis mengenai pelaksanaan mandat ini diatur lebih lanjut melalui Peraturan Pemerintah (PP) tentang AMDAL (saat ini termaktub dalam PP No. 22 Tahun 2021). Peraturan Pemerintah tersebut menjabarkan secara terperinci Kriteria Wajib AMDAL, termasuk kategori kegiatan yang berpotensi menghasilkan dampak signifikan terhadap lingkungan, seperti modifikasi bentang alam, eksplorasi sumber daya alam, dan kegiatan yang membawa risiko tinggi terhadap keselamatan dan kesehatan masyarakat umum.

Fungsi baku mutu lingkungan merupakan kerangka regulasi lingkungan yang juga menetapkan standar kualitas lingkungan atau yang dikenal sebagai baku mutu. Baku mutu didefinisikan sebagai batasan maksimum atau minimum bagi energi atau zat tertentu yang diperbolehkan berada dalam komponen lingkungan (seperti air, udara, atau limbah). Standar ini berperan sebagai pedoman teknis yang krusial dalam perancangan langkah mitigasi dan strategi pengelolaan lingkungan proyek. Apabila baku mutu ini dilanggar atau tidak terpenuhi, hal tersebut diinterpretasikan sebagai indikasi pelanggaran

yang menuntut adanya tindakan perbaikan (korektif) dan penegakan hukum (Widyarani *et al.*, 2022).

### **Peran Kelembagaan dan Keterlibatan Masyarakat**

Implementasi dan pengawasan Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) melibatkan koordinasi beberapa lembaga utama. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) memiliki fungsi inti, yaitu merumuskan kebijakan, memastikan kepatuhan regulasi, serta memberikan persetujuan akhir terhadap dokumen AMDAL dan izin lingkungan, khususnya untuk proyek-proyek berskala besar. Selain itu, lembaga-lembaga yang relevan di tingkat regional (daerah) turut memainkan peran signifikan, terutama dalam proses perizinan dan pengawasan kegiatan operasional sehari-hari.

Salah satu elemen penting dalam regulasi AMDAL kontemporer adalah Keterlibatan Masyarakat. Sejalan dengan prinsip-prinsip tata kelola lingkungan yang baik (*good environmental governance*), setiap komunitas yang berpotensi mengalami dampak yang baik secara langsung maupun tidak langsung—diberi hak untuk mengetahui, menyampaikan pandangan, dan berpartisipasi aktif dalam tahapan penilaian AMDAL.

Partisipasi yang secara legal dijamin oleh Undang-Undang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UUPPLH), memastikan bahwa isu-isu lokal dan kepentingan komunitas menjadi pertimbangan utama dalam proses pengambilan keputusan. Dengan demikian, legitimasi proyek ditingkatkan dan keberhasilan pelaksanaan program pengelolaan lingkungan pun menjadi lebih terjamin (UNEP, 2002).

# DAFTAR PUSTAKA

- Canter, L. W. (1996). *Environmental Impact Assessment* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Enríquez-de-Salamanca, Á., Díaz-Sierra, R., Martín-Aranda, R. M., & Santos, M. J. (2017). Environmental impacts of climate change adaptation. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, 87-96.
- Pinto, G. M. C., Pedroso, B., Moraes, J., Pilatti, L. A., & Picinin, C. T. (2018). Environmental management practices in industries of Brazil, Russia, India, China and South Africa (BRICS) from 2011 to 2015. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1251-1261.
- Smit, B., & Spaling, H. (1995). Methods for cumulative effects assessment. *Environmental impact assessment review*, 15(1), 81-106.
- Gilpin, A. (1995). *Environmental impact assessment: cutting edge for the 21st century*. Cambridge University Press.
- Glasson, J., & Therivel, R. (2013). Introduction to environmental impact assessment. Routledge.
- Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2019). *Introduction to Environmental Impact Assessment* (5th ed.). Routledge.
- Siregar, M. A., & Utomo, S. W. (2019, December). Environmental impact assessment as a regulation and equator principles as an initiative. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 399, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.
- Ortolano, L. (1997). Environmental regulation and impact assessment (p. 150). New York: Wiley.
- Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32397-32414.
- Sodhi, N. S., Brook, B. W., & Bradshaw, C. J. (2013). *Tropical conservation biology*. John Wiley & Sons.
- Suter II, G. W. (2016). Ecological risk assessment. CRC press.

- Sutherland, W. J., Pullin, A. S., Dolman, P. M., & Knight, T. M. (2004). The need for evidence-based conservation. *Trends in ecology & evolution*, 19(6), 305-308.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2009).
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2002). *Environmental Impact Assessment and Strategic Environmental Assessment: Towards an Integrated Approach*. UNEP.

# BAB 10

## Industri Material: Pemanfaatan Biomaterial

**Achmad Dadang Burhanuddin**

Dunia industri saat ini menghadapi tantangan ganda yang signifikan, yaitu ketergantungan pada sumber daya fosil yang terbatas dan akumulasi limbah plastik yang berdampak buruk terhadap ekosistem global. Tekanan lingkungan dan regulasi ini mendorong pergeseran paradigma dari model ekonomi linier (ambil-gunakan-buang) menuju ekonomi sirkular yang berkelanjutan. Dalam konteks ini, biomaterial muncul sebagai solusi strategis yang menawarkan alternatif material yang dapat diperbarui, dapat terbiodegradasi, dan seringkali bersifat biokompatibel. Pemanfaatan biomaterial tidak hanya bertujuan untuk mengurangi jejak karbon dan ketergantungan pada bahan baku tak terbarukan, tetapi juga membuka peluang ekonomi baru melalui pemanfaatan biomassa, termasuk limbah pertanian dan kehutanan, sebagai bahan baku industri. Transformasi ini menempatkan bioteknologi dan ilmu material pada posisi sentral dalam mendefinisikan masa depan sektor industri yang lebih hijau dan tangguh (Erfaras dan Putri, 2024).

Di bidang medis, biomaterial memainkan peran penting dalam pembuatan implan, sistem penghantaran obat, *scaffold tissue engineering*, hingga teknologi *bioprinting*. Penggunaan biomaterial alami seperti kolagen, kitosan, dan alginat menunjukkan kemampuan unggul dalam mempercepat penyembuhan dan mengurangi reaksi imunologis. Sementara itu, di sektor industri dan lingkungan, biomaterial telah menjadi solusi alternatif dalam mengurangi ketergantungan terhadap plastik berbasis petroleum melalui

pengembangan bioplastik, biokomposit, dan material yang dapat terdegradasi secara alami (Rosmainar *et al.*, 2024).

Sektor pertanian dan pangan juga mendapatkan manfaat dari penerapan biomaterial, misalnya melalui teknologi *edible coating*, kemasan *biodegradable*, dan sistem pelepasan nutrisi berbasis hidrogel. Semua inovasi ini menunjukkan bahwa integrasi ilmu biologi dalam pengembangan biomaterial tidak hanya berfokus pada aspek kesehatan, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan dan efisiensi industri. Menurut Geevarghese *et al.* (2022), pemanfaatan ilmu biologi dalam pengembangan biomaterial untuk sektor lingkungan semakin penting seiring meningkatnya tekanan ekologis akibat polusi, akumulasi limbah plastik, degradasi lahan, dan keterbatasan sumber daya alam. Biomaterial yang bersifat *biodegradable*, biokompatibel, dan berasal dari sumber terbarukan menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan material sintetis berbasis petroleum. Ilmu biologi menjadi fondasi utama dalam merancang, memproduksi, dan mengoptimalkan biomaterial untuk berbagai kebutuhan ekologis.

### **Definisi, Klasifikasi, dan Prinsip Desain Biomaterial**

Biomaterial adalah bahan dasar alami yang digunakan untuk pembuatan struktur yang lebih kompleks. Biomaterial biasanya dibuat dari metabolisme atau struktur makhluk hidup. Biomaterial biasa digunakan pada bidang kesehatan seperti implan ortopedik, graft pembuluh darah, dan semen tulang (Sukmana *et al.*, 2022). Dalam dunia kesehatan, biomaterial berfungsi sebagai bahan yang mampu beradaptasi dengan resiko minim ketika dimasukkan ke dalam tubuh manusia. Hal ini dikarenakan bahan dasar yang dibuat berasal dari makhluk hidup yang sudah di uji secara biologis, sehingga tidak menimbulkan efek samping ketika digunakan (Huzum *et al.*, 2021). Biomaterial juga dikenal sebagai bahan yang dicampurkan berdasarkan fungsi dan uji biologis dengan harapan tidak ada ketergantungan seratus persen dengan bahan material kimia/fisik. Menagadevi *et al.* (2026) menyatakan bahwa biomaterial adalah inovasi dari *bioengineering* yang didasarkan pada interaksi antara proses sistem biologi dan struktur biokompatibel. Biokompatibel menurut Huzum *et al.* (2021)

merupakan struktur material yang sifatnya minim risiko ketika digunakan.

Klasifikasi biomaterial terdiri dari dua kategori, yaitu *natural biomaterial* (biomaterial alami) dan *synthetic biomaterial* (biomaterial sintetis). Biomaterial alami merupakan material yang berasal dari makhluk hidup atau alam secara langsung tanpa modifikasi. Menurut Joyce *et al.* (2021) biomaterial alami adalah pemanfaatan unsur biologi yang kompatibel dan *biodegradable* dari bahan yang dihasilkan oleh tumbuhan ataupun hewan. Selain itu, biomaterial alami memiliki keunggulan, antara lain:

- Biokompatibel: sangat mudah diterima oleh tubuh.
- Minim toksik: minim potensi keracunan pada pengguna.
- *Biodegradable*: mudah terurai oleh alam.

Bagaimanapun, keunggulan tersebut harus melalui uji secara biologis dan tergantung pada kondisi lingkungan atau objek penggunaan. Adapun kekurangan dari biomaterial alami diantaranya:

- Memiliki mekanikal yang lemah, sehingga harus dicampur oleh bahan lain.
- perlu diperhatikan kualitas produksi yang sesuai, karena bahan alami hasil produknya tidak sama setiap saat.

Dalam dunia industri, biomaterial alami masih sedikit digunakan karena minimnya *supply chain* dengan kualitas produksi yang serupa. Oleh karena itu, beberapa industri menggunakan *synthetic biomaterial*. Biomaterial sintetik merupakan bahan dasar dari alam yang dimodifikasi oleh manusia seperti polimer, logam, keramik, dan komposit. Menurut Sukmana *et al.* (2022), biomaterial sintetis merupakan bahan material yang terdiri antara campuran alami dan kimia yang dibuat melalui proses modifikasi oleh manusia. Contohnya adalah pembuatan baut tulang yang terbuat dari *cobalt* dan krom. Kelebihan biomaterial sintetis adalah:

- Kualitasnya sama setiap produksinya.
- Sifat mekanikal yang tinggi atau bioaktif.

- Elastis dan mudah dibentuk.

Bagaimanapun, produksi yang massal dan tinggi oleh industri memiliki kelemahan seperti materialnya tidak biokompatibel, yang artinya tidak mudah diterima oleh tubuh, sehingga perlu penyesuaian. Selain itu, materialnya juga tidak *biodegradable*. Contohnya seperti plastik polimer yang akan terurai pada beberapa tahun. Biomaterial berdasarkan sumbernya dapat dibedakan sebagai berikut:

### ***Biomaterial dari Tumbuhan***

- **Pati:** dari jagung, kentang, singkong (tapioka). Diolah menjadi bioplastik seperti *Thermoplastic Starch* (TPS).
- **Selulosa:** penyusun utama dinding sel tumbuhan. Dapat diproses menjadi kertas, film kemasan (selofan), dan serat rayon.
- **Ligin:** perekat alami dalam tumbuhan. Berpotensi sebagai pengganti fenol dalam resin dan bahan penguat komposit.
- **Minyak Nabati:** dari kelapa sawit, jarak, kedelai. Dapat dipolimerisasi menjadi resin epoksi *bio-based* dan poliureana.

### ***Biomaterial dari Hewan***

- **Protein (kollagen, sutera, wol):** digunakan untuk benang jahit bedah, perancah (*scaffold*) tissue engineering, dan tekstil.
- **Kitin dan Kitosan:** dari cangkang krustasea (udang, kepiting). Aplikasinya meliputi pembungkus luka, koagulan, dan film kemasan antimikroba.

### ***Biomaterial dari Mikroorganisme***

- **Polyhydroxyalkanoates (PHA):** Polyester yang diproduksi oleh bakteri sebagai cadangan energi. Sifatnya mirip polipropilena dan sangat biodegradable.
- **Bacterial Cellulose:** memiliki kemurnian dan kekuatan tarik tinggi, digunakan untuk perawatan luka bakar dan bahan dasar speaker.

### ***Biomaterial berdasarkan jenis polimer***

- **Polimer Alami:** langsung diekstrak dari alam (pati, selulosa, dan protein).
- **Polimer Hasil Sintesis dari Monomer Alami:** PLA (Polylactic Acid) disintesis dari asam laktat yang berasal dari fermentasi gula.
- **Polimer Hasil Fermentasi Mikroba:** PHA diproduksi langsung oleh mikroba.

Selain klasifikasi biomaterial, terdapat prinsip dasar dari desain biomaterial pada Tabel 10.1 berikut:

**Tabel 10.1. Definisi dan desain biomaterial**

<b>Prinsip</b>	<b>Pengertian</b>	<b>Contoh</b>	<b>Referensi</b>
Biokompatibel	Tidak memiliki tingkat toksikitas dan mudah diterima oleh lingkungan/tubuh	Polikaprolakton (PCL) atau Kalsium Fosfat (Tidak toksik)	Nibras <i>et al.</i> (2023)
Biomekanikal	Dapat elastis dan cocok dengan target	Stainless stell	Chen <i>et al.</i> (2023)
Biodegradasi	Dapat mudah didegradasi	Fibrin dan kolagen	Geevarghese <i>et al.</i> (2022)
Bioaktivasi	Aktif dalam respon	extracellular matrix (ECM)	Blum <i>et al.</i> (2021)
Biostruktur	Struktur yang kuat dan mudah dibentuk	kolagen untuk perancah (scaffold)	Geevarghese <i>et al.</i> (2022)
Bioproses	Mudah digunakan dan di proses	<i>Biofertilizer</i> yang menggunakan bakteri	Velázquez-Herrera (2022)

### **Proses Produksi dan Pengolahan Biomaterial**

Transformasi biomassa menjadi produk biomaterial fungsional memerlukan pendekatan teknologi yang kompleks dan terintegrasi.

Proses-proses ini tidak hanya bertujuan untuk mengisolasi komponen *bio-based*, tetapi juga untuk merekayasa sifat-sifat material pada tingkat molekuler dan makrostruktural agar memenuhi persyaratan aplikasi spesifik. Perkembangan terkini dalam bidang ini ditandai dengan transisi dari metode konvensional yang intensif secara energi, menuju proses yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Pemahaman mendalam mengenai prinsip-prinsip kimia hijau, ekonomi sirkular, dan integrasi proses *biorefinery* menjadi kunci dalam mendesain rantai nilai biomaterial yang kompetitif dan berkelanjutan.

### **Proses Ekstraksi Biomaterial**

Ekstraksi atau pemurnian merupakan suatu proses untuk merubah suatu komponen kompleks menjadi lebih sederhana. Proses ini adalah salah satu langkah *pretreatment* dalam dunia industri material. Bahan alami yang menjadi dasar material memiliki komponen target yang harus dipisahkan. Salah satu contohnya dan pemurnian komponen pada metode Organosol sebagai alternatif yang sangat menjanjikan dalam *biorefinery* modern. Proses ini memanfaatkan pelarut organik seperti etanol dan asam format pada suhu *elevated* (160-220°C) untuk melarutkan lignin dan hemiselulosa secara selektif. Keunggulan utama teknologi ini terletak pada kemampuan *recovery* pelarut yang tinggi (hingga 95-99%) melalui distilasi. Prosesnya menghasilkan lignin dengan kemurnian dan reaktivitas tinggi yang siap untuk aplikasi bernilai tambah, serta *pulp* selulosa yang mempertahankan derajat polimerisasinya (Abdelaziz *et al.*, 2016).

Perkembangan paling mutakhir dalam bidang ini adalah integrasi proses biologis-enzimatis dengan *pretreatment* fisik-kimia. Kombinasi antara *pretreatment* telah terbukti seacra signifikan meningkatkan efisiensi delignifikasi dan mengurangi penggunaan bahan kimia keras (Baruah *et al.*, 2018). Contoh lainnya, untuk membuat kitosan (bahan untuk pembalut luka) dari cangkang udang, kita harus membuang mineral dan proteinnya terlebih dahulu. Hal ini dilakukan dengan merendam cangkang dalam asam dan basa. Ekstraksi biomaterial berperan penting untuk memisahkan komponen yang tidak digunakan pada bahan dasar. Setelah diekstraksi, komponen

biomaterial harus melalui proses pemurnian atau isolasi. Isolasi biomaterial merupakan proses pemisahan dan pemurnian komponen spesifik dari bahan baku biologis untuk mendapatkan material dengan kemurnian dan sifat yang diinginkan. Berbeda dengan ekstraksi yang lebih berfokus pada pengambilan material secara umum, isolasi menekankan pada pemurnian komponen target dari pengotor dan komponen lain yang tidak diinginkan.

### Proses Modifikasi kimia Biomaterial

Modifikasi kimia paska-ekstraksi dan isolasi tetap menjadi strategi kunci untuk meningkatkan biomaterial. Modifikasi kimia masih menekankan pada hal yang ramah lingkungan dan efisien. Salah satu strategi modifikasi kimia ini diantaranya adalah peningkatan sifat hidrofobisitas, kompatibilitas dengan matriks polimer lain, stabilitas termal, serta introduksi gugus fungsi baru untuk aplikasi spesifik. Tren penelitian terbaru bergerak menuju modifikasi kimia selektif yang mempertahankan struktur dasar biopolimer agar tetap kokoh dan ramah terhadap lingkungan. Contohnya *cellulose acetate* dan *cellulose propionate* yang dikatalis heterogen dan sistem pelarut yang dapat didaur ulang. Proses ini mengurangi generasi limbah dan mempermudah pemurnian produk (McKeown & Jones, 2020). Selain itu, modifikasi melalui oksidasi selektif menggunakan katalis telah menghasilkan material selulosa nano-fibril dan reaktivitas yang unggul untuk aplikasi biomedis dan komposit canggih.

Penerapan biologis utama dari modifikasi kimia biomaterial adalah untuk menciptakan antarmuka yang secara aktif berkomunikasi dengan sistem biologis, khususnya dalam merekayasa lingkungan mikro untuk regenerasi jaringan. Sebagai contoh, menurut Rahmitasari & Sularsih (2019), modifikasi permukaan *scaffold* titanium atau biokeramik dengan peptida bioaktif (seperti RGD) melalui perlakuan plasma dan *cross-linking* kimia, secara signifikan meningkatkan adhesi, penyebaran, dan diferensiasi sel osteoblast (pembentuk tulang). Dalam konteks biologis, modifikasi ini bukan sekadar perlakuan sel pasif, tetapi juga pemicu kaskade pensinyalan intraseluler yang mendorong ekspresi gen osteogenik (seperti Runx2 dan Osteocalcin),

sehingga mempercepat proses penyembuhan tulang. Dengan kata lain, modifikasi kimia mengubah biomaterial yang *inert* menjadi sinyal biologis yang dapat "dibaca" oleh sel-sel inang, sehingga memandu sel-sel tersebut untuk melakukan fungsi regeneratif yang spesifik di lokasi implan.

Pada bidang lain, modifikasi kimia memungkinkan pengendalian yang presisi terhadap respon imun dan pelepasan terapeutik. Fungsionalisasi permukaan dengan molekul imunomodulator seperti sitokin (contoh: TGF- $\beta$ ) atau peptida anti-inflamasi dapat mengarahkan respon imun bawaan ke arah yang diinginkan, mengurangi fibrosis (pembentukan jaringan parut) di sekitar implan, serta meningkatkan integrasi dengan jaringan sekitarnya. Lebih lanjut, dengan teknik seperti *click chemistry*, obat-obatan atau faktor pertumbuhan (contoh: BMP-2 untuk tulang atau VEGF untuk pembuluh darah) dapat dikonjugasikan secara kovalen ke dalam jaringan hidrogel (Jia *et al.*, 2016). Dari sudut pandang biologis, sistem ini meniru mekanisme pelepasan sinyal yang terjadi secara alami dalam matriks ekstraseluler. Sistem ini memberikan sinyal biologis yang berkelanjutan dan terkontrol secara temporal untuk mempromosikan angiogenesis.

### **Polimerisasi dan Sintetis Biomaterial**

Dalam sistem biologi, proses polimerasi merupakan fondasi sentral bagi kehidupan, yang ditandai dengan spesifitas dan regulasi enzimatik yang tinggi. DNA polimerase dan ribosom secara efisien mengkatalisis pembentukan polimer kompleks (DNA, RNA, protein) dari monomer yang tepat, yang bertanggung jawab memastikan integritas informasi genetik dan fungsi seluler. Prinsip-prinsip fundamental ini seperti katalisis enzimatis, *self-assembly*, dan respons terhadap stimulus seluler menjadi cetak biru tak ternilai untuk rekayasa material maju (Mose *et al.*, 2025).

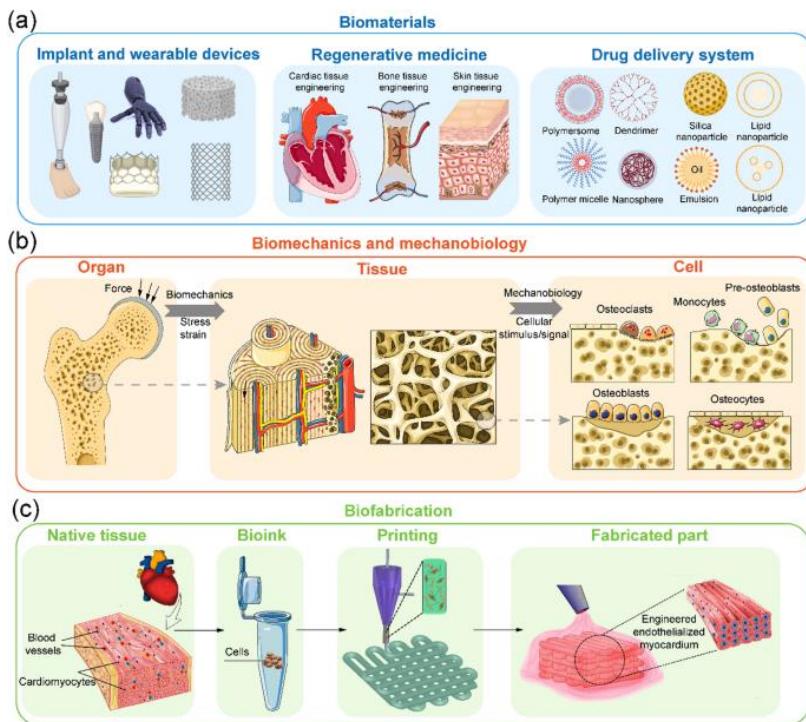
Berdasarkan prinsip biologi tersebut, sintesis biomaterial modern meniru elemen-elemen kunci polimerasi alami. Material seperti hidrogel peptida, polimer *smart*, dan kerangka kerja *tissue engineering* dirancang untuk merespons stimulus fisiologis (seperti pH

atau enzim spesifik) untuk melakukan *self-assembly* atau melepaskan muatan terapeutik secara terkendali. Pendekatan bioinspirasi ini memungkinkan fabrikasi material yang sangat biokompatibel dan dapat berinteraksi secara dinamis dengan lingkungan biologis, sehingga memperluas cakupan aplikasi medis dalam *drug delivery* dan regenerasi jaringan. Adapun contoh lain di antaranya adalah dalam Produksi Polylactic Acid (PLA) sebagai salah satu aplikasi dari proses polimerasi yang memiliki sifat non toksik. Inovasi terkini juga mencakup *solid-state polymerization* seperti komponen otomotif dan elektronik (Taib *et al.*, 2023). Pada dunia mikrobia, strain mikroba yang direkayasa secara genetika, seperti *Pseudomonas putida* dan *Cupriavidus necator*, sekarang dapat memproduksi PHA dengan *yield* dan produktivitas yang jauh lebih tinggi, serta komposisi monomer yang spesifik (Kourmentza *et al.*, 2017). Tren yang sangat penting adalah utilisasi limbah agro-industri (seperti minyak goreng bekas, molase, dan gula hasil hidrolisis limbah lignoselulosa) sebagai substrat karbon murah, yang secara signifikan menurunkan biaya produksi dan meningkatkan sustainability profile PHA.

### Proses Implementasi Produk Biomaterial

Tahapan terakhir adalah aplikasi implementasi dari proses biomaterial. Aplikasi biomaterial yang paling transformatif adalah dalam rekayasa jaringan dan pengobatan regeneratif. Di sini, biomaterial tidak hanya bertindak sebagai perancah struktural pasif, tetapi sebagai template bioaktif yang memandu regenerasi jaringan. Misalnya, *scaffold* yang terbuat dari hidroksiapatit dan kolagen dapat mensimulasi lingkungan tulang dan dapat diisi dengan sel punca mesenkimal dan faktor pertumbuhan untuk mendorong pembentukan tulang baru. Demikian pula, hidrogel yang dapat diinjeksi dan merespons stimulus digunakan untuk mengisi kekurangan pada jaringan lunak seperti kartilago. Implementasi ini memanfaatkan prinsip-prinsip biologi perkembangan. Biomaterial memberikan sinyal fisik dan kimia yang diperlukan untuk memicu proses regenerasi intrinsik tubuh, sehingga mengubah konsep "penyembuhan" menjadi "regenerasi" (Gambar 1).

Produksi biomaterial secara 3D telah merevolusi prototipe dan produksi komponen dari biomaterial. Teknik seperti *fused deposition modeling* (FDM) untuk filament PLA dan PHA, *stereolithography* (SLA) menggunakan resin acrylated epoxidized soybean oil, dan *selective laser sintering* (SLS) untuk bubuk polyamide memungkinkan fabrikasi struktur yang sangat kompleks dan terpersonalisasi (Ngo *et al.*, 2018). Teknik pembentukan konvensional tetap menjadi pilar penting dalam produksi biomaterial skala besar di bioindustri. Metode seperti elektrospinning untuk membuat membran berserat nano (*nanofiber*), sol-gel *processing* untuk keramik bioaktif, dan *freeze-drying* untuk membuat *scaffold* berpori adalah beberapa contohnya. Teknik-teknik ini seringkali lebih mudah untuk *di-scale up*, lebih hemat biaya untuk volume produksi yang besar, serta mampu menghasilkan biomaterial dengan sifat mekanik dan arsitektur mikro yang unggul. Dalam industri, metode seperti ini digunakan untuk memproduksi massal pembalut luka, matriks untuk *drug delivery*, dan *scaffold* tulang, yang kemudian dapat dipotong dan disesuaikan dengan kebutuhan klinis, menjembatani kesenjangan antara penelitian laboratorium dan ketersediaan produk komersial (Gambar 10.1).



Sumber: Wu *et al.*, 2024

**Gambar 10.1. Aplikasi Biologi pada Industri Biomaterial. Keterangan: (a) biomaterial, (b) biomekanik dan mekanobiologi, dan (c) biofibrikasi**

### Aplikasi Biomaterial di Berbagai Sektor Industri

Biomaterial telah merevolusi sektor medis dan kedokteran gigi, bergerak jauh melampaui aplikasi tradisional untuk implan tulang dan sendi. Di bidang *tissue engineering*, material seperti hidrogel, *scaffold* biokompatibel, dan matriks ekstraseluler yang dimodifikasi kini digunakan untuk menumbuhkan jaringan lunak, kulit, dan bahkan organ seperti hati mini (organoid) dalam penelitian. Dalam kedokteran gigi, keramik canggih seperti zirconia yang diperkuat serta komposit resin yang terus ditingkatkan menjadi standar baru untuk mahkota, jembatan, dan restorasi lainnya karena daya tahannya dan estetika yang menyerupai gigi asli. Perkembangan terbesar terletak pada sistem *drug delivery* yang ditargetkan. Nanopartikel polimer *biodegradable* berfungsi sebagai "kendaraan pintar" untuk melepaskan obat secara

spesifik ke sel kanker, sehingga meminimalkan efek samping sistemik dan meningkatkan kemanjuran pengobatan (Opara *et al.*, 2024).

Di luar dunia medis, aplikasi biomaterial merambah sektor industri lainnya. Perkembangan ini didorong oleh tuntutan global akan keberlanjutan. Dalam industri kemasan, bioplastik seperti poliasam laktat (PLA) dan polihidroksialcanoat (PHA) yang berasal dari sumber terbarukan (seperti pati jagung atau limbah pertanian) semakin menggantikan plastik konvensional berbahan bakar fosil untuk mengurangi polusi plastik dan jejak karbon. Sektor energi juga memanfaatkan biomaterial, misalnya dalam pengembangan biobaterai dan sel *biofuel* yang menggunakan enzim atau bakteri untuk menghasilkan listrik dari materi organik. Selain itu, di bidang pertanian, *film mulching biodegradable* mulai digunakan untuk menggantikan plastik polietilen tradisional, yang tidak hanya mengendalikan gulma dan menjaga kelembaban, tetapi juga terurai di tanah setelah panen. Hal ini berguna dalam mencegah akumulasi residu plastik yang merusak ekosistem (Nanda *et al.*, 2024).

### ***Industri Kemasan***

Industri kemasan adalah pasar terbesar untuk biomaterial. Industri kemasan merancang agar menghasilkan produk yang ramah lingkungan yang aplikasinya meliputi:

- Kantong belanja *biodegradable* seperti bioplastik berbasis pati (seperti pati jagung, tapioka, atau singkong) atau campuran PLA dan PBAT.
- *Foam* pengganti *styrofoam* dari pati jagung untuk bungkus.
- Film kemasan transparan dari PLA atau selofan untuk bungkus makanan.
- Botol minuman dari PLA atau PET *bio-based*.

### ***Industri Medis dan Kesehatan***

Biomaterial memainkan peran kritis dalam industri medis dan kesehatan karena sifatnya yang *biocompatible* dan *biodegradable*. Pemanfaatannya antara lain:

- **Tissue Engineering:** Perancah (*scaffold*) dari kolagen, kitosan, atau PHA untuk menumbuhkan jaringan tulang atau kulit baru.
- **Pengobatan Luka:** Hidrogel dan film dari kitosan dan alginat (dari rumput laut) yang mempercepat penyembuhan.
- **Sistem Pengiriman Obat (Drug Delivery):** Nanopartikel dari polimer *biodegradable* (seperti PLA) digunakan sebagai "kendaraan" untuk mengantarkan obat ke sel target secara terkendali.

### ***Industri Otomotif***

Pengurangan berat kendaraan untuk efisiensi bahan bakar mendorong penggunaan biomaterial. Contoh penerapannya antara lain:

- Panel pintu dan trim interior dari komposit serat rami/henep dengan matriks PLA atau polipropilena *bio-based*.
- Jok kursi dari busa poliureana berbasis minyak kedelai.
- Komponen *under-the-hood* yang ringan dari komposit serat alam.

### ***Industri Tekstil***

Industri tekstil menghasilkan produk yang dihasilkan dari alam agar mudah didaur ulang, seperti contohnya:

- Serat rayon/*viscose* yang berasal dari selulosa kayu.
- Kain *lyocell/tencel* yang diproduksi dengan proses daur ulang pelarut yang ramah lingkungan.
- Tekstil pintar dengan lapisan kitosan untuk sifat antimikroba.

### ***Industri Konstruksi***

Industri konstruksi membuat bahan yang ramah lingkungan dan memanfaatkan limbah yang ada disekitar. Ada beberapa produk yang biasa digunakan di antaranya adalah:

- Biokomposit serat kayu-plastik (WPC) untuk *decking*, pagar, dan furnitur luar ruangan.
- Paving blok dari bahan campuran plastik dan serat.
- Insulasi dari serat alam seperti wol domba atau selulosa daur ulang.

- Bahan perekat dan pelapis berbasis lignin atau tanin.

## Keunggulan dan Tantangan

Biomaterial menawarkan sejumlah keunggulan strategis yang mendorong adopsinya di berbagai industri, terutama kemasan. Keunggulan utama terletak pada aspek berkelanjutan, dengan bahan baku utamanya berasal dari biomassa yang dapat diperbarui (seperti tanaman, alga, atau limbah pertanian), sehingga secara signifikan mengurangi ketergantungan pada minyak bumi dan sumber daya fosil yang terbatas, yang sejalan dengan prinsip ekonomi sirkuler (Nanda *et al.*, 2022). Dari segi ramah lingkungan, siklus hidup biomaterial umumnya memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan bahan sintetisnya. Selain itu, material yang bersifat *biodegradable* dan kompos dapat terurai di lingkungan yang sesuai dalam waktu yang lebih singkat, sehingga secara proaktif mengurangi beban polusi mikroplastik dan sampah yang menumpuk di tempat pembuangan akhir (TPA) (Walker & Rothman, 2020). Keunggulan ini langsung berkontribusi pada pengurangan limbah dengan mengatasi akar permasalahan sampah plastik konvensional yang persisten. Lebih dari itu, biomaterial sering kali memiliki fungsionalitas unik yang tidak dimiliki material sintetis, seperti biokompatibilitas yang memungkinkan integrasi dengan jaringan hidup dalam aplikasi medis, atau sifat antimikroba alami dari senyawa seperti kitosan yang dapat memperpanjang umur simpan makanan dalam kemasan aktif (Versino *et al.*, 2023). Beberapa poin keunggulan biomaterial:

- **Berkelanjutan:** Mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil.
- **Ramah Lingkungan:** Mengurangi jejak karbon dan dapat terurai di alam (untuk yang *biodegradable*).
- **Mengurangi Limbah:** Mengatasi masalah sampah plastik konvensional.
- **Fungsionalitas Unik:** Sifat seperti *biocompatibility* dan antimikroba tidak dimiliki banyak material sintetis.

Meskipun menjanjikan, adopsi biomaterial secara luas masih menghadapi beberapa tantangan signifikan. Tantangan yang paling sering dikemukakan adalah biaya produksi yang masih lebih tinggi daripada plastik konvensional, karena teknologi dan ekonomi skala untuk bioplastik seperti PLA dan PHA belum dapat menyaingi industri petrokimia yang sudah matang (Rosenboom *et al.*, 2022). Dari segi teknis, kinerja terbatas masih menjadi kendala seperti banyak biomaterial, seperti plastik berbasis pati (TPS), memiliki sifat mekanik (seperti kekuatan dan fleksibilitas), serta ketahanan panas yang lebih rendah, yang membatasi aplikasinya untuk beban tertentu. Tantangan strategis lainnya adalah kompetisi sumber daya lahan. Budidaya tanaman untuk bahan baku biomaterial dapat bersaing dengan produksi pangan, memicu perdebatan "pangan vs. bahan baku". Lebih lanjut, infrastruktur daur ulang yang belum memadai menjadi penghambat utama. Fasilitas pengomposan industri yang diperlukan untuk mengurai biomaterial *biodegradable* secara optimal belum tersedia secara merata, sehingga berisiko mencemari aliran daur ulang konvensional jika tidak dikelola dengan benar (Nanda *et al.*, 2022). Terakhir, umur simpan (*shelf life*) biomaterial itu sendiri dapat menjadi masalah, karena beberapa jenis rentan terhadap degradasi, terutama dalam kondisi penyimpanan yang lembap dan hangat, yang dapat menurunkan integritas produk bahkan sebelum digunakan.

### **Prospek Masa Depan Bioindustri Material**

Masa depan industri biomaterial dipandang sangat cerah, didorong oleh tekanan global untuk mencapai keberlanjutan dan inovasi teknologi yang bergerak cepat. Untuk mengatasi tantangan saat ini dan membuka potensi penuhnya, penelitian dan pengembangan terkini difokuskan pada beberapa bidang strategis yang saling melengkapi. Arah ini tidak hanya bertujuan untuk menciptakan material yang setara dengan plastik konvensional, tetapi untuk melampauiinya dengan

menciptakan sistem material yang cerdas, efisien, dan terintegrasi penuh dengan ekonomi sirkular. Berikut adalah fokus utama pengembangan biomaterial ke depan:

- **Material Generasi Berikutnya**

Fokusnya adalah pada rekayasa material untuk menciptakan biomaterial dengan kinerja tinggi (*high-performance*). Hal ini termasuk mengembangkan bioplastik baru seperti PEF (*Polyethylene Furanoate*) yang memiliki sifat *barrier* terhadap gas dan panas. Sifatnya lebih unggul daripada PET, serta menciptakan biokomposit dan *nanocomposites* dengan penguat serat alam atau nanopartikel untuk mencapai kekuatan dan ketahanan yang dapat menyaingi material rekayasa konvensional seperti logam ringan tertentu.

- **Pemanfaatan Limbah Biomassa (*Waste Biomass Utilization*)**

Untuk mengatasi isu kompetisi pangan vs. bahan baku, paradigma bergeser ke penggunaan sumber bahan baku non-pangan. Penelitian intensif dilakukan pada pemanfaatan *lignoselulosa* dari limbah pertanian dan industri seperti sekam padi, tebu, dan limbah kayu. Teknologi *biorefinery* dikembangkan untuk memecah limbah ini menjadi gula dan senyawa platform yang kemudian dapat difermentasi menjadi berbagai biopolimer, menciptakan nilai tambah dari limbah, serta mengurangi biaya bahan baku.

- **Rekayasa Genetik dan Biologi Sintetis**

Pendekatan ini bertujuan untuk "memprogram" ulang organisme seperti tanaman atau mikroba untuk menjadi pabrik biologi yang lebih efisien. Misalnya, dengan merekayasa genetika tanaman untuk menghasilkan pati atau selulosa dengan struktur dan kemurnian yang lebih baik, atau menggunakan mikroba yang dimodifikasi untuk secara langsung memproduksi polimer target (seperti PHA) dari limbah dengan *yield* dan laju produksi yang lebih tinggi, sehingga menurunkan biaya produksi secara signifikan.

- **Integrasi Penuh dengan Ekonomi Sirkular**

Masa depan biomaterial terletak pada desain sistem dari hulu ke hilir. Konsepnya meluas tidak hanya sekadar dapat terurai (*end-of-life*), tetapi juga ke arah model produk biomaterial yang dirancang untuk dapat diperbaiki, digunakan ulang, dan didaur ulang secara mekanis

atau kimia menjadi produk bernilai tinggi baru. Skema *take-back* dan sistem deposit akan diintegrasikan untuk memastikan material tetap dalam siklus dan meminimalkan kebocoran ke lingkungan.

- **Fungsionalitas Cerdas dan Canggih**

Penelitian juga mengarah pada pemberian kemampuan cerdas pada biomaterial. Contohnya termasuk kemasan "aktif" yang dapat mendeteksi dan melaporkan pembusukan makanan melalui sensor terintegrasi, atau biomaterial untuk *drug delivery* yang dapat melepaskan obat sebagai respons terhadap rangsangan spesifik dalam tubuh (*stimuli-responsive*). Teknologi ini membuka pasar dan aplikasi baru yang tidak dapat diisi oleh material konvensional.

# DAFTAR PUSTAKA

- Abdelaziz, O. Y., Brink, D. P., Prothmann, J., Ravi, K., Sun, M., García-Hidalgo, J., & Hulteberg, C. P. (2016). Biological valorization of low molecular weight lignin. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1318–1346. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.001>
- Baruah, J., Nath, B. K., Sharma, R., Kumar, S., Deka, R. C., Baruah, D. C., & Kalita, E. (2018). Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products. *Frontiers in Energy Research*, 6, 141. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141>
- Blum, C., Taskin, M. B., Shan, J., Schilling, T., Schlegelmilch, K., Teßmar, J., & Groll, J. (2021). Appreciating the first line of the human innate immune defense: A strategy to model and alleviate the neutrophil elastase-mediated attack toward bioactivated biomaterials. *Small*, 17(13), 2007551. <https://doi.org/10.1002/smll.202007551>
- Chen, S., Wang, Q., Yang, H., & Yang, K. (2023). High-nitrogen nickel-free stainless steel: An attractive material with potential for biomedical application. *Steel Research International*, 94(10), 2200355. <https://doi.org/10.1002/srin.202200355>
- Erfarris, F. N., & Putri, L. A. A. E. (2024). Studi experimental natural blend crete: Pemanfaatan bio-waste produksi gula sebagai alternatif penerapan material ekologis. *Proceedings of Life and Applied Sciences*, 3(1).
- Geevarghese, R., Sajjadi, S. S., Hudecki, A., Sajjadi, S., Jalal, N. R., Madrakian, T., Ahmadi, M., Włodarczyk-Biegun, M. K., Ghavami, S., Likus, W., Siemianowicz, K., & Łos, M. J. (2022). Biodegradable and non-biodegradable biomaterials and their effect on cell differentiation. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 16185. <https://doi.org/10.3390/ijms232416185>
- Huzum, B., Puha, B., Necoara, R. M., Gheorghevici, S., Puha, G., Filip, A., & Alexa, O. (2021). Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices: An overview.

- Experimental and Therapeutic Medicine*, 22(5), 1315.  
<https://doi.org/10.3892/etm.2021.10507>
- Jia, J., Coyle, R. C., Richards, D. J., Berry, C. L., Barrs, R. W., Biggs, J., & Mei, Y. (2016). Development of peptide-functionalized synthetic hydrogel microarrays for stem cell and tissue engineering applications. *Acta Biomaterialia*, 45, 110–120.  
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.08.028>
- Joyce, K., Fabra, G. T., Bozkurt, Y., & Pandit, A. (2021). Bioactive potential of natural biomaterials: Identification, retention, and assessment of biological properties. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 6(1), 122. <https://doi.org/10.1038/s41392-021-00527-4>
- Kourmentza, C., Plácido, J., Venetsaneas, N., Burniol-Figols, A., Varrone, C., Gavala, H. N., & Reis, M. A. M. (2017). Recent advances and challenges towards sustainable polyhydroxyalkanoate (PHA) production. *Bioengineering*, 4(2), 55. <https://doi.org/10.3390/bioengineering4020055>
- McKeown, P., & Jones, M. D. (2020). The chemical recycling of PLA: A review. *Sustainable Chemistry*, 1(1), 1–22.  
<https://doi.org/10.3390/suschem1010001>
- Menagadevi, M., Nirmala, M., Thiagarajan, D., & Somasundram, D. (2026). Biomaterials and their applications. *Biomedical Materials & Devices*, 4(1), 46–61.
- Mose, W., Suryani, E. M., Panjaitan, R., Si, A. S., Sofiana, M. S. J., Sari, A. I., & Ramanda, G. D. (2025). *Biologi molekuler*. Mega Press Nusantara.
- Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 379–395. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01287-4>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications, and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

- Nibras, A. L. N., Susanti, A., Ramadhan, H. N. F., Kamilah, V. L., & Ningrum, E. O. (2023). Modifikasi coating pada permukaan implan Ti-6Al-4V ELI berbasis kombinasi hidroksiapatit cangkang rajungan dan polycaprolactone. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"* (pp. 6–1).
- Opara, A., Canning, P., Alwan, A., & Opara, E. C. (2024). Challenges and perspectives for future considerations in the bioengineering of a bioartificial pancreas. *Annals of Biomedical Engineering*, 52(7), 1795–1803. <https://doi.org/10.1007/s10439-024-03478-2>
- Rahmitasari, F., & Sularsih, S. (2019). Agen crosslink dalam pembuatan biomimetic scaffold sebagai material rekayasa jaringan tulang. *Jurnal Material Kedokteran Gigi*, 8(2), 65–71.
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117–137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Rosmainar, L., Tukan, D. N., & Deviyanti, M. (2021). Perbandingan plastik dari material-material bioplastik. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 3(1), 19–28.
- Sukmana, I., Risano, A. Y. E., Wicaksono, M. A., & Saputra, R. A. (2022). Perkembangan dan aplikasi biomaterial dalam bidang kedokteran modern: A review. *Insologi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(5), 635–646.
- Taib, N. A. A. B., Rahman, M. R., Huda, D., & Kuok, K. K. (2023). A review on poly(lactic acid) (PLA) as a biodegradable polymer. *Polymer Bulletin*, 80(2), 1179–1213. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04015-0>
- Velázquez-Herrera, F. D., Lobo-Sánchez, M., Carranza-Cuautle, G. M., Sampieri, Á., del Rocío Bustillos-Cristales, M., & Fetter, G. (2022). Novel bio-fertilizer based on nitrogen-fixing bacterium immobilized in a hydrotalcite/alginate composite material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 32220–32226. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18471-4>
- Versino, F., Ortega, F., Monroy, Y., Rivero, S., López, O. V., & García, M. A. (2023). Sustainable and bio-based food packaging: A review

- on past and current design innovations. *Foods*, 12(5), 1057.  
<https://doi.org/10.3390/foods12051057>
- Walker, S., & Rothman, R. (2020). Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastics: A review. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121158.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>
- Wu, C., Xu, Y., Fang, J., & Li, Q. (2024). Machine learning in biomaterials, biomechanics/mechanobiology, and biofabrication: State of the art and perspective. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(7), 3699–3765.  
<https://doi.org/10.1007/s11831-023-09929-7>

# BAB 11

## Industri Pertanian: Perlindungan Tanaman dalam Biologi

**Titanio Auditya Pribadi**

Indonesia merupakan salah satu negara dengan sentral agrarian di Asia Tenggara. Rata-rata produksi industri pertanian Indonesia pada tahun 2013 mencapai 190,08 Juta ton, yang diikuti negara-negara ASEAN lainnya seperti Malaysia, Thailand, Vietnam, Filipina, Kamboja, dan Laos (Puska PDN, 2013). Sektor pertanian di Indonesia merupakan pusat perhatian khusus dalam pembangunan ekonomi nasional, khususnya yang berhubungan dengan pengelolaan dan pemanfaatan hasil strategis yang menyangkut komoditas pangan (Isbah dan Iyan, 2016).

Sektor pertanian memiliki permasalahan yang kompleks di era perkembangan populasi, seperti perubahan iklim (Zhao *et al.*, 2023), degradasi kualitas tanah (Mahmood *et al.*, 2024), serta degradasi lahan pertanian (Siebrecht, 2020). Hal ini, dapat menyebabkan terpengaruhinya produktivitas tanaman pertanian pada tiap tahunnya. Selain itu, kerusakan pada lahan pertanian mengakibatkan sektor pertanian melemah, sehingga terjadinya perubahan pengelolaan dari sektor pertanian berganti pada permukiman penduduk.

Pada era digitalisasi saat ini, sektor pertanian mengalami perkembangan yang signifikan dalam pengelolaan lahan pertanian dari teknologi drone sebagai pengobatan hingga penanaman, terdapat juga *smart farming* dalam mengkombinasikan pengelolaan berbasis internet dan data (Rachmawati, 2020). Selain itu, terdapat juga inovasi bioteknologi dalam meningkatkan varietas tanaman yang unggul dan tahan iklim (Hutami *et al.*, 2006).

Pemanfaatan *smart farming* dan teknologi pertanian memanfaatkan beragam obat atau pupuk pertanian yang berbahan baku kimiawi yang mengakibatkan kerusakan pada lahan dan pemuliaan tanaman yang kurang efektif dalam implementasinya. Bioteknologi hadir dalam teknologi pertanian dalam meningkatkan kualitas tanaman dan sistem pertanian yang berkelanjutan. Salah satu bioteknologi yang dimanfaatkan dalam pertanian adalah pembuatan pupuk organik. Komposisi pembuatan pupuk organik sangatlah sederhana seperti kompos hewan ternak, penambahan tetes tebu (*molase*) dan penambahan bakteri *starter* dalam proses fermentasi pembuatan pupuk organik di antaranya *Actinoplanes*, *Agrobacterium*, *Alcaligens*, *Amorphosporangium*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Cellulomonas*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Gluconacetobacter*, *Microbacterium*, *Micromonospora*, *Pseudomonas*, *Rhizobia*, *Serratia*, *Streptomyces*, dan *Xanthomonas* (Sriwahyuni & Parmila, 2019). Penambahan bakteri dalam pembuatan pupuk organik yang bertujuan untuk menambahkan unsur makro dan mikro tanah, sehingga meningkatkan C-Organik tanah yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman (Sari *et al.*, 2023).

## **Dasar-Dasar Biologi Tanaman dalam Industri Pertanian**

### ***Struktur dan Fungsi Organ Tanaman***

Struktur dan fungsi organ tanaman merupakan dasar penting dalam memahami pertumbuhan, perkembangan, dan adaptasi tanaman terhadap lingkungannya (Ramdhini *et al.*, 2021). Struktur dan organ tanaman memiliki bentuk dan morfologi yang sama, namun memiliki perbedaan dalam bentuk bunga, akar, maupun daun. Hal ini dipengaruhi oleh faktor genetik dan lingkungan.

Akar berfungsi sebagai penyerap air dan unsur hara, sedangkan batang mendistribusikan hasil fotosintesis serta menopang bagian tanaman lain. Akar terdiri dari 2 jenis, yaitu akar tunggang dan akar serabut. Akar tunggang sering ditemui pada jenis tanaman berkayu, sedangkan akar serabut banyak ditemui pada tanaman *agriculture* (Hasan *et al.*, 2023).

Batang berfungsi sebagai penopang utama tubuh tanaman sekaligus jalur transportasi bagi air, mineral, dan hasil fotosintesis. Melalui jaringan xilem, batang mengalirkan air dan unsur hara dari akar ke daun, sementara melalui floem batang mengedarkan hasil fotosintesis dari daun ke seluruh bagian tanaman (Muttaqin, 2023).

Daun berfungsi sebagai pusat terjadinya fotosintesis pada tumbuhan. Fotosintesis adalah proses biokimia yang dilakukan oleh tumbuhan hijau, alga, dan beberapa bakteri untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa (Song & Banyo, 2011). Jenis daun pada tanaman terdapat beberapa jenis, di antaranya: daun tunggal dan daun majemuk. a) Daun Tunggal memiliki satu helai daun pada setiap tangkainya, b) Daun Majemuk merupakan daun yang memiliki anak daun yang terhubung pada satu tangkai.

Biji berfungsi sebagai calon individu baru yang akan tumbuh menjadi tanaman dewasa. Di dalam biji terdapat embrio yang dilengkapi dengan cadangan makanan untuk mendukung proses perkecambahan hingga tanaman muda mampu berfotosintesis sendiri. Jenis biji pada tanaman dibagi menjadi dua, yaitu monokotil (biji yang hanya memiliki satu kotiledon biji) dan dikotil (biji yang memiliki 2 kotiledon pada satu kesatuan bijinya) (Muttaqin, 2023).

### ***Sistem Pertahanan Alami Tanaman***

Ekologi pertanian terdapat predator atau hama terhadap tanaman yang senantiasa berdampingan dari dekade ke dekade selanjutnya. Tanaman dan hama membentuk pertahanan diri masing-masing dengan tujuan bertahan hidup pada sebuah ekosistem. Mekanisme pertahanan tanaman terdapat 2 pertahanan, yaitu pertahanan secara langsung (*direct defense*) dan tidak langsung (*indirect defense*) (Rashid War, *et al.* 2012).

Pertahanan langsung pada tanaman merupakan mekanisme perlindungan yang dilakukan tanaman secara langsung untuk mengurangi atau mencegah kerusakan yang dihasilkan dari serangga herbivora maupun patogen. Bentuk pertahanan tanaman

yang secara langsung berupa morfologi atau struktur fisik seperti duri, rambut (*trikoma*), dan jaringan yang mengeras sehingga menyulitkan serangga untuk makan (Rashid War, *et al.* 2012).

Selain morfologi dan struktur tanaman, pertahanan selanjutnya dari tanaman secara langsung yaitu menghasilkan senyawa kimia sebagai pertahanan dari tanaman. Jenis senyawa yang dihasilkan dari tanaman diantaranya: *tanin*, *alkaloid*, *fenolik*, dan *terpenoid* (Rashid War, *et al.* 2012).

*a Tanin*

Senyawa tanin pada tanaman berfungsi sebagai proteksi utama terhadap serangga herbivora. Manfaatnya tanin dalam pertahanan tanaman di antaranya menghambat pencernaan serangga, menurunkan nutrisi nilai daun, memiliki sifat antimikroba pada tanaman, serta menciptakan rasa pahit pada keseluruhan morfologi tanaman.

*b Alkaloid*

Senyawa alkaloid merupakan senyawa nitrogen kompleks yang umumnya bersifat toksik pada morfologi atau struktur tanaman. Manfaat senyawa alkaloid pada tanaman bermanfaat untuk racun bagi serangga (menyebabkan kelumpuhan dan gangguan saraf pada serangga), serta menghambat makan (*antifeedant*). Hal ini menyebabkan serangga berhenti makan tanaman, dan mengganggu metabolisme sel patogen yang menjadikan tanaman terhindar dari jamur.

*c Fenolik*

Fenolik merupakan senyawa aromatik pada tanaman yang memiliki fungsi sebagai respons pertahanan pada tanaman. Manfaat fenolik pada pertahanan tanaman dan lingkungan diantaranya: antimikroba, yaitu dengan merusak membran sel bakteri atau jamur patogen; antioksidan, yaitu sebagai pelindung sel tanaman dari stres oksidatif akibat serangan patogen, dan menghambat

makan serangga karena rasa pahit yang dihasilkan oleh fenolik dan efek toksik ringan.

*d Terpenoid*

Senyawa terpenoid merupakan senyawa volatil dan non-volatile yang memiliki peran sebagai pertahanan kimia pada tanaman. Terpenoid memiliki manfaat sebagai racun serangga (mempengaruhi sistem saraf dan respirasi), dan berperan sebagai *repellent* (mengusir dan mencegah serangga bertelur pada tanaman).

## **Bioteknologi dan Pertanian Berkelanjutan dalam Pelindungan Tanaman**

Bioteknologi dalam pertanian di era modern saat ini sangat berkembang secara pesat, khususnya dalam peningkatan kualitas varietas yang tahan lingkungan, hama, dan penyakit. Penerapan bioteknologi dalam hal ini tidak hanya meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap pektisida yang berdampak negatif terhadap lingkungan.

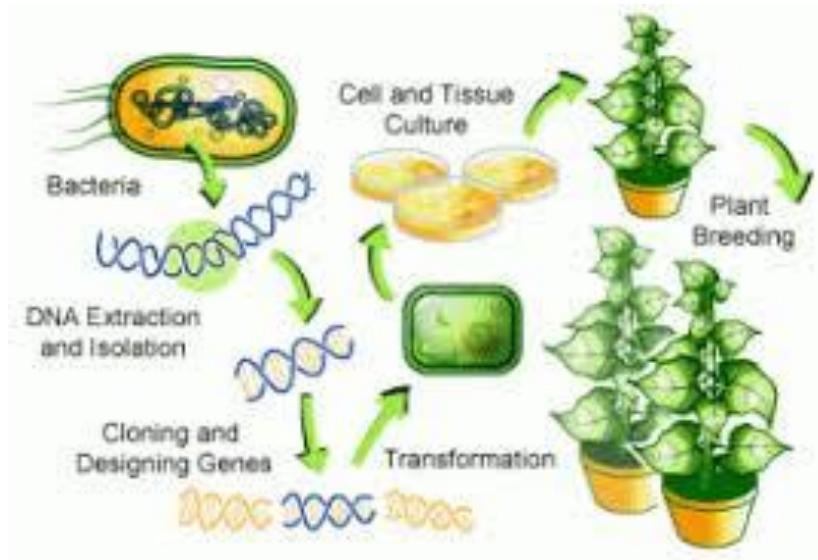
## **Bioteknologi Agrikultur dalam Pengembangan dan Pelindungan Tanaman**

Inovasi bioteknologi pada industri pertanian meningkatkan produktivitas dan ketahanan terhadap hama, sekaligus memfasilitasi para peneliti dalam mengembangkan produk bioteknologi berbasis industri pertanian, yaitu rekayasa genetika dan *Biofertilizer*.

### **a. Rekayasa Genetika Tanaman pada Agrikultur**

Pengembangan hasil dari tanaman rekayasa genetika, atau yang sebut *GMO* (*Genetic Modification Organizime*), dalam implementasinya melibatkan penambahan gen yang bermanfaat sebagai peningkatan kualitas tanaman. Metode ini sering menggunakan teknologi seperti CRISPR-Cas9 (Akram *et al.*, 2025). Hasil rekayasa genetika telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan pertanian seperti resisten terhadap hama dan penyakit. Selain itu, peningkatan tanaman

memiliki kandungan atau senyawa tambahan seperti antibiotik dan resistensi biotik. Contoh hasil dari perkembangan rekayasa genetika pada tanaman Kedelai BT menggunakan *Bacillus thuringiensis* yang dapat menghasilkan protein yang toksik bagi hama yang menjadikan keuntungan dalam sistem pertanian karena minimnya akan kebutuhan akan peptisida (Lassoued *et al.*, 2019).



Sumber: Pondok Ilmu,2012

**Gambar 11.1 Rekayasa Genetik Pada Tanaman**

b. Mikroorganisme Sebagai *Biofertilizer*

Pertanian modern saat ini berhadapan dengan beragam tantangan, di antaranya adalah degradasi kualitas tanah, dan ketergantungan petani terhadap obat kimia sintesis. Era teknologi yang berkembang pesat di dunia pertanian menjadikan pemanfaatan beragam media, salah satunya adalah pemanfaatan mikroorganisme sebagai pembuatan *biofertilizer*. Pemanfaatan *biofertilizer* menjadi salah satu pemecahan permasalahan pada lahan pertanian yang bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Pemanfaatan mikroorganisme dalam pembuatan pupuk yang ramah lingkungan merupakan salah satu implementasi yang mengurangi limbah dari hasil produksi, salah satunya pemanfaatan molase (limbah pembuatan gula pasir) yang dimanfaatkan sebagai pupuk (Sudiarti, 2017). *Biofertilizer* berperan penting dalam peningkatan penyaluran unsur hara di sektor pertanian yang ramah lingkungan. Salah satu mikroorganisme yang dimanfaatkan yaitu *Bacillus sp.* yang merupakan mikroorganisme pelarut fosfat di tanah (Mendrofa & Lase, 2025).

### **Pertanian Berkelanjutan Berbasis Kearifan Lokal Masyarakat dalam Mendukung Pelindungan Tanaman**

Pertanian berkelanjutan merupakan pengelolaan sistem pertanian yang menerapkan ramah lingkungan yang berdampak secara ekologi dan ekonomi terhadap masyarakat. Dalam era perkembangan teknologi yang pesat dan dunia pertanian modern, kearifan lokal masyarakat pedesaan tetap melestarikan pengelolaan pertanian yang berkelanjutan, salah satunya adalah agroforestri (Hakim, 2021).

Agroforestri merupakan salah satu sistem pertanian yang ramah lingkungan. Hal ini dikarenakan sistem pengolahannya mencakup penamanaman secara campur dengan beragam jenis tanaman, tidak hanya dengan satu jenis tanaman (monokultur) dalam sebentang lahan (Ardini *et al.*, 2020). Agroforestri memiliki dampak positif terhadap lingkungan dan masyarakat. Secara umum, di pedesaan agroforestri mendukung terhadap ketahanan pangan masyarakat lokal dikarenakan adanya beragam jenis tanaman. Jenis tanaman dalam agroforestri dibagi menjadi dua strata, yaitu tanaman penaung dan tanaman *undercover* (herba). Jenis tanaman penaung yang menjadi pangan lokal masyarakat di antaranya yaitu: sukun, petai, jengkol, durian, nangka, dst. Sedangkan pada tanaman *undercover* (herba) di antaranya yaitu: talas, singkong, ganyong, garut, dan beragam rempah seperti jahe, kunir, serai, hingga cabai jawa (Pribadi *et al.*, 2024).

Agroforestri mendukung pelestarian lingkungan dengan beragam jenis tanaman naungan. Beragam penelitian telah menjelaskan bahwa

agroforestri mendukung konservasi lahan tanaman, meningkatkan karbon pada lahan (Cardinael *et al.*, 2017), meningkatkan kesuburan tanah yang dihasilkan dari seresah tanaman (Pribadi *et al.*, 2023), serta mengendalikan iklim mikro dalam area agroforestri (Gomes *et al.*, 2020). Akibatnya, manfaat tersebut dapat meminimalisir kerusakan lahan yang diakibatkan oleh perubahan iklim yang menjadi permasalahan global.

### **Flora Agroforestry Kopi Sebagai Kawasan Konservasi Berbasis Pertanian Lokal**

Flora agroforestri kopi telah muncul sebagai solusi inovatif dalam integrasi pertanian dan konservasi lingkungan, mengingat pentingnya keberlanjutan dalam produksi pertanian saat ini.

Kebutuhan sumber daya alam yang meningkat disebabkan oleh pertumbuhan ekonomi dan populasi manusia beberapa dekade terakhir menjadi penyebab terjadinya degradasi pada flora endemik dan jenis varietas tanaman pertanian. Dengan pelestarian keanekaragaman hayati, konsep agroforestri menawarkan pendekatan yang harmonis antara pemanfaatan lahan dan perlindungan lingkungan. Dalam konteks ini, kawasan agroforestri kopi tidak hanya berfungsi sebagai penghasil komoditas pertanian yang bernilai tinggi, tetapi juga sebagai area konservasi yang mendukung keberadaan flora dan fauna lokal.

Agroforestri kopi, yang mengombinasikan penanaman kopi dengan tanaman pelindung dan pohon peneduh, menciptakan ekosistem yang lebih seimbang. Cara bertani ini dapat memperbaiki kualitas tanah, mengurangi erosi, serta memberikan habitat bagi berbagai spesies. Selain itu, penerapan praktik pertanian lokal dalam pengelolaan kawasan ini memberikan keuntungan ganda, yakni melestarikan warisan budaya dan pengetahuan tradisional masyarakat setempat. Jenis-Jenis flora agroforestri kopi yang memiliki dampak ekologi dan terhadap tanaman sebagai berikut:

- a) Nangka (*Artocarpus heterophyllus*)

Pohon nangka memiliki peran penting dalam mendukung ekologi dan konservasi pada sistem agroforestri kopi. Kanopinya yang lebar namun tidak terlalu rapat mampu

menyediakan naungan parsial yang ideal bagi tanaman kopi, sehingga membantu menstabilkan suhu mikro, mengurangi stres panas, serta menjaga kelembaban tanah. Serasah daun nangka yang mudah terurai turut memperkaya unsur hara dan meningkatkan struktur tanah, sekaligus memperbesar kapasitas tanah dalam menahan air pada musim kemarau. Sistem perakaran nangka yang kuat berkontribusi dalam mengurangi erosi dan menjaga kestabilan lahan, terutama di kebun kopi yang berada di wilayah perbukitan. Selain itu, pohon nangka mendukung keanekaragaman hayati dengan menyediakan habitat bagi burung, serangga penyebuk, dan organisme tanah, sehingga memperkuat fungsi ekologis kebun (Siarudin, *et al.* 2019). Kehadiran pohon berbuah ini juga mendukung ketahanan pangan lokal dan pelestarian varietas nangka yang telah lama beradaptasi dengan lingkungan setempat. Secara keseluruhan, nangka tidak hanya meningkatkan produktivitas ekosistem, tetapi juga memperkuat keberlanjutan praktik agroforestri kopi.

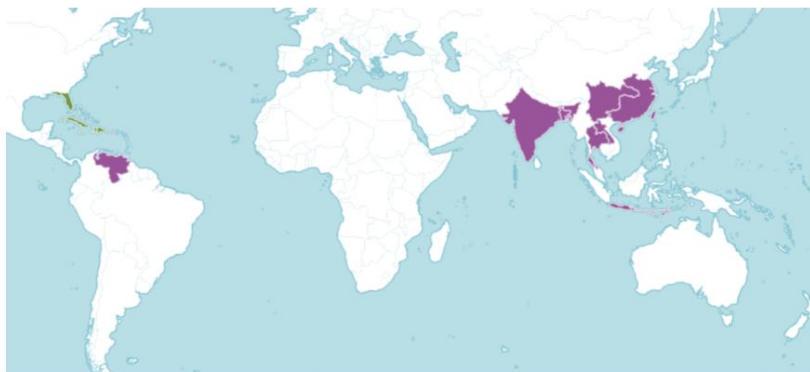


■ Native ■ Introduced

**Gambar 11.2 Persebaran Nangka (*Artocarpus heterophyllus*)**

b) Mahoni (*Swietenia macrophylla*)

Pohon mahoni berperan penting sebagai naungan dalam sistem agroforestri, terutama pada lahan budidaya kopi. Hal ini dikarenakan kemampuannya dalam mengurangi erosi dan degradasi kualitas tanah. Mahoni memiliki sistem perakaran yang dalam dan kuat, sehingga mampu memperkokoh struktur tanah, menahan gerakan tanah di lereng, serta mengurangi limpasan air permukaan ketika hujan deras (Mashudi, *et al.*, 2016). Kanopinya yang rindang turut berfungsi menahan pukulan langsung hujan ke permukaan tanah, sehingga meminimalkan terjadinya pengikisan lapisan atas tanah yang kaya hara. Selain itu, guguran daun mahoni yang melimpah menjadi sumber bahan organik yang bermanfaat, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kandungan humus, serta memperbaiki kapasitas infiltrasi air (Pribadi *et al.*, 2023). Dengan demikian, kehadiran pohon mahoni dalam agroforestri tidak hanya mendukung pertumbuhan tanaman kopi melalui pengaturan mikroklimat, tetapi juga secara signifikan menjaga kualitas tanah agar tetap produktif dan berkelanjutan.



■ Native ■ Introduced

**Gambar 11.3 Persebaran Mahoni (*Swietenia macrophylla*)**

c) Asam Jawa (*Tamarindus indica*)

Pohon asam jawa memiliki peran ekologis yang penting dalam sistem agroforestri kopi, terutama sebagai pohon naungan yang

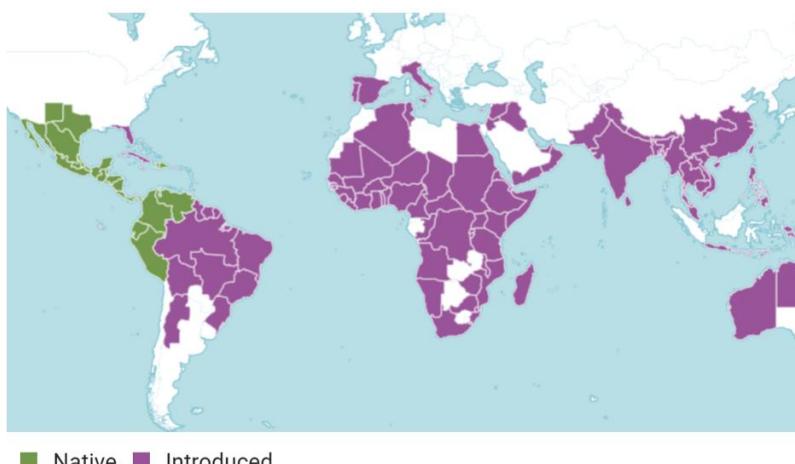
mampu menjaga stabilitas lahan dan kualitas tanah. Sistem perakarannya yang kuat dan menyebar membantu menahan struktur tanah sehingga efektif mengurangi erosi, terutama pada lahan miring atau rawan degradasi. Kanopi asam jawa yang cukup lebar mampu menyediakan naungan sedang bagi tanaman kopi, membantu menstabilkan suhu mikro, serta mempertahankan kelembapan tanah. Selain itu, guguran daun asam jawa yang kaya bahan organik berkontribusi dalam meningkatkan kesuburan tanah melalui proses dekomposisi yang memperkaya humus, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Pohon ini juga mendukung keberlanjutan ekosistem agroforestri dengan memberikan habitat bagi fauna penyerbuk dan organisme tanah, sehingga memperkuat fungsi ekologis dan konservasi di kebun kopi (Wijayanto & Prasetyo, 2021). Secara keseluruhan, asam jawa merupakan pilihan pohon peneduh yang tidak hanya bermanfaat bagi produktivitas kopi, tetapi juga bagi pelestarian kualitas lingkungan (Tampubolon *et al.*, 2019).



**Gambar 11.4 Persebaran Asam Jawa (*Tamarindus indica*)**

- d) Lamtoro (*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit)  
Lamtoro (*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit) merupakan jenis yang toleran dalam segala kondisi lingkungan dan merupakan hijauan yang memiliki nilai gizi yang tinggi. Daun

lamtoro dimanfaatkan sebagai pakan ternak hewan ruminansia dikarenakan memiliki kandungan karbohidrat, protein, mineral, kalsium, dan fosfor (Kato-Noguchi & Kurniadie, 2022). Selain jenis tanaman yang toleran dengan kondisi lingkungan dan sebagai pakan ternak, lamtoro dapat meningkatkan kualitas tanah seperti meningkatkan unsur hara, meningkatkan nitrogen hasil dari fiksasi nitrogen biologis, serta sekuestrasi dalam tanah (Saraiva *et al.*, 2022).



**Gambar 11.5 Persebaran Lamtoro (*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit)**

e) Durian (*Durio Zibethinus*)

Pohon durian memberikan manfaat ekologis dan konservasi yang penting dalam sistem agroforestri kopi. Hal ini dikarenakan struktur kanopinya yang luas dan tinggi yang mampu menyediakan naungan yang stabil bagi tanaman kopi. Naungan ini membantu mengatur mikroklimat kebun, menurunkan intensitas cahaya berlebih, serta menjaga kelembaban tanah, sehingga mengurangi stres lingkungan pada tanaman kopi. Sistem perakaran durian yang kuat dan dalam berperan dalam menahan erosi, meningkatkan stabilitas tanah, serta memperbaiki infiltrasi air pada lahan miring. Guguran

daun dan serasah organik dari durian juga berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah melalui proses dekomposisi yang memperkaya kandungan bahan organik dan humus. Kehadiran pohon durian dalam agroforestri turut mendorong keanekaragaman hayati, menyediakan habitat bagi burung, serangga penyerbuk, dan mikroorganisme tanah yang berperan dalam menjaga kesehatan ekosistem. Selain manfaat ekologis, durian juga memberikan nilai ekonomi tambahan bagi petani, sehingga meningkatkan keberlanjutan sistem agroforestri kopi dari aspek lingkungan maupun sosial-ekonomi (Achza *et al.*, 2025).



**Gambar 11.6 Persebaran Durian (*Durio Zibethinus*)**

f) Pohon Secang (*Biancaea sappan*)

Pohon secang memiliki manfaat ekologis yang penting dalam sistem agroforestri kopi karena kemampuannya memperkuat struktur tanah dan meningkatkan kualitas lingkungan. Dengan perakaran yang cukup kuat dan menyebar, tanaman berkayu seperti pohon secang dapat membantu menahan erosi pada lahan miring dan meningkatkan stabilitas tanah, sehingga mengurangi risiko degradasi lahan (Arief *et al.*, 2025). Sebagai

anggota famili legum, pohon ini juga berpotensi melakukan fiksasi nitrogen, yang berkontribusi pada peningkatan kesuburan tanah dan mengurangi kebutuhan pupuk kimia. Serasah daun secang yang mudah terurai memperkaya bahan organik tanah, meningkatkan kapasitas simpan air, dan memperbaiki struktur tanah (Zega & Lase, 2025). Kanopinya yang tidak terlalu rapat dapat memberikan naungan ringan hingga sedang, sehingga membantu menstabilkan suhu mikro yang sesuai untuk tanaman kopi. Selain itu, keberadaan secang mendukung keanekaragaman hayati dengan menyediakan habitat bagi berbagai organisme, termasuk serangga bermanfaat dan mikroorganisme tanah. Dengan demikian, pohon secang memberikan kontribusi konservatif dan ekologis yang signifikan dalam mendukung keberlanjutan agroforestri kopi.



**Gambar 11.7 Persebaran Pohon Secang (*Biancaea sappan*)**

### **Industri Agrowisata Sebagai Pendukung Pemuliaan Tanaman dan Pelindungan Tanaman**

Pelindungan tanaman, atau dalam bahasa biologinya adalah konservasi/pelestarian tanaman, tidak hanya dari sektor internal (pelindungan dari dalam tanaman) dan eksternal (pelindungan dari sisi ekologi), namun terdapat juga pelindungan atau pelestarian yang berbasis industrial pertanian, salah satunya adalah agrowisata. Industri agrowisata merupakan sektor pertanian strategis yang dapat meningkatkan nilai ekonomi masyarakat melalui rekreasi dan edukasi.

Selain itu, agrowisata juga berperan dalam mendukung pemuliaan tanaman dan pelindungan tanaman secara berkelanjutan. Peran penting agrowisata dalam mendukung pemuliaan tanaman di antaranya:

a. Peningkatan Keanekaragaman Hayati

Agrowisata merupakan industri pertanian yang dikombinasikan dengan wisata. Dalam penerapannya, dilakukan beragam pengelolaan dan atraksi wisata dalam agrowisata. Tujuannya adalah untuk menciptakan atau mengoleksi beragam varietas jenis tanaman dengan tujuan pelestarian jenis unggul dan tahan lingkungan, memperkaya biodiversitas (Saroinsong, 2020), serta mendukung pertumbuhan ekonomi hijau.

b. Pusat Edukasi dan Penelitian

Agrowisata dapat berfungsi sebagai pusat kegiatan ilmiah yang dinamis, menghadirkan ruang bagi penelitian, pelatihan, dan *workshop* terkait pemuliaan serta pemanfaatan tanaman herbal dan kopi. Dalam ekosistem ini, petani, akademisi, dan masyarakat berkolaborasi secara langsung untuk mengembangkan pengetahuan, meningkatkan keterampilan, dan memperluas pemahaman mengenai potensi sumber daya hayati lokal (Mujiyo *et al.*, 2025). Kegiatan tersebut tidak hanya memperkuat kapasitas komunitas dalam mengelola dan memanfaatkan tanaman bernilai ekonomi tinggi, tetapi juga mendorong inovasi maupun penerapan teknologi tepat guna yang mendukung keberlanjutan pertanian dan peningkatan kesejahteraan masyarakat sekitar (Gambar 11.8).



**Gambar 11.8 Pertanian Agroforestri Kopi Sebagai Wisata Edukasi**

c. Keterlibatan Aktif Komunitas Masyarakat

Model pengelolaan partisipatif melibatkan petani dan masyarakat secara aktif dalam proses budidaya dan pengembangan varietas unggul, sehingga tercipta ruang kolaboratif yang mendorong transfer pengetahuan dan lahirnya berbagai inovasi pertanian. Melalui pendekatan ini, pengalaman lokal dan kearifan tradisional dapat dipadukan dengan temuan ilmiah dan teknologi terbaru, sekaligus menghasilkan praktik budidaya yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan (Tryasnandi *et al.*, 2023). Keterlibatan langsung masyarakat tidak hanya meningkatkan rasa memiliki terhadap hasil pengembangan, tetapi juga memperkuat kapasitas komunitas dalam menerapkan teknik budidaya yang lebih maju, sekaligus mempercepat penyebaran inovasi ke berbagai wilayah pertanian lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Achza, A., Munzilin, M., & Nazwa, N. (2025). Penerapan sistem agroforestri kopi pada petani di Kabupaten Bener Meriah, Aceh, Indonesia. *Jurnal Bioleuser*, 9(2), 1–10.
- Akram, J., Naeem, N., Manzoor, M. T., Ali, Q., Marwat, U. A., & Zia, T. (2025). Role of modern biotechnology in improving crop protection. *Bulletin of Biological and Allied Sciences Research*, 10, 1–10.
- Ardini, M., Marsela, A., Mustika, R., Subakti, R., Khairani, S., & Suwardi, A. B. (2020). Potensi pengembangan agroforestri berbasis tumbuhan buah lokal. *Jurnal Ilmiah Pertanian*, 17(1), 27–34.
- Arief, F. B., Nuriman, M., Krisnohadi, A., Purwaningsih, P., Rianto, F., Biono, B., Maherawati, M., & Hartanti, L. (2025). *Pengembangan pertanian cerdas iklim di Kapuas Hulu*. WWF Indonesia.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Beral, C., Barthes, B. G., Dupraz, C., Chenu, C., & Kouakoua, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243–255.
- Foresta, H. D., Kusworo, A., Michon, G., & Djatmiko, W. A. (2000). *Ketika kebun berupa hutan: Agroforest khas Indonesia sebuah sumbangan masyarakat*. SMT Grafika.
- Gomes, L. C., Bianchi, F. J. J. A., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., Filho, E. I. F., & Schulte, R. P. O. (2020). Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 1–10.
- Hakim, L. (2021). *Agroforestri kopi: Mendorong taman hayati dan wisata kopi*. Media Nusa Creative.
- Hasan, H., Mayefis, D., Silvyana, A. E., Yusuf, B., Nisaa, N. R. K., Sari, D. R. T., et al. (2023). *Botani farmasi*. Get Press Indonesia.

- Hutami, S., Mariska, I., & Supriati, Y. (2006). Peningkatan keragaman genetik tanaman melalui keragaman somaklonal. *Jurnal Agrobiogen*, 2(2), 81–88.
- Isbah, U., & Iyan, R. Y. (2016). Analisis peran sektor pertanian dalam perekonomian dan kesempatan kerja di Provinsi Riau. *Jurnal Sosial Ekonomi Pembangunan*.
- Lassoued, R., Phillips, P. W., Smyth, S. J., & Hesseln, H. (2019). Estimating the cost of regulating genome-edited crops: Expert judgment and overconfidence. *GM Crops & Food*, 10, 44–62. <https://doi.org/10.1080/21645698.2019.1612689>
- Mahmood, H., Hassan, M. S., Meraj, G., & Furqan, M. (2024). Agriculture's role in environmental sustainability: A comprehensive review of challenges and solutions. *Challenges in Sustainability*, 12(3), 178–189. <https://doi.org/10.56578/cis120302>
- Mashudi, M., Susanto, M., & Baskorowati, L. (2016). Potensi hutan tanaman mahoni (*Swietenia macrophylla* King) dalam pengendalian limpasan dan erosi. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 23(2), 259–265.
- Mendrofa, Y. T., & Lase, N. K. (2025). Peran bakteri *Bacillus* sp. sebagai agen biofertilizer dalam meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman: Kajian literatur. *HIDROPONIK: Jurnal Ilmu Pertanian dan Teknologi dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), 79–85.
- Mujiyo, M., Sutoro, S., Syamsiyah, J., Dewi, W. S., Rahayu, R., Widijanto, H., et al. (2025). Innovation in paddy pest control: Education and implementation of refugia for sustainable agriculture. *Community Empowerment*, 10(5), 1163–1175.
- Muttaqin, S. Z. (2023). *Anatomi tumbuhan (sel, jaringan, dan organ vegetatif tumbuhan)*. Pusat Penerbitan dan Publikasi Universitas Kristen Indonesia.
- Pribadi, T. A., Afifyanti, M., & Hakim, L. (2023). Vegetation structure and composition of coffee agroforestry in Kalibaru Sub-District. *Jurnal Biodjati*, 8(1), 139–150.

- Pribadi, T. A., Nurrofik, A., Evabian, C. H. B., & Yuwafi, H. (2024). Ethnobotanical study of potential food-utilization of shade and undercover vegetation in the coffee agroforestry landscape, Kalibaru District, Banyuwangi Regency. *Journal of Coffee and Sustainability*, 1(1), 1–16.
- Rachmawati, R. R. (2020). Smart farming 4.0 untuk mewujudkan pertanian Indonesia maju, mandiri, dan modern. *Forum Pertanian Agro Ekonomi*, 38(2), 137–154.
- Ramdhini, R. N., Manalu, A. I., Rawaida, I. P., Isrianto, P. L., Panggabean, N. H., Wilujeng, S., et al. (2021). *Anatomi tumbuhan*. Yayasan Kita Menulis.
- Rashid War, A., Paulraj, M. G., Ahmad, T., Buhroo, A. A., Hussain, B., Ignacimuthu, S., & Sharma, H. C. (2012). Mechanisms of plant defense against insect herbivores. *Plant Signaling & Behavior*, 7(10), 1306–1320.
- Sari, R., Maryam, M., & Yusmah, R. A. (2023). Penentuan C-organik pada tanah untuk meningkatkan produktivitas tanaman dan keberlanjutan umur tanaman dengan metode spektrofotometri UV–Vis. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 12(1), 11–19.
- Saroinsong, F. B. (2020). Supporting plant diversity and conservation through landscape planning: A case study in an agro-tourism landscape in Tampusus, North Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(4), 1–9.
- Siebrecht, N. (2020). Sustainable agriculture and its implementation gap: Overcoming obstacles to implementation. *Sustainability*, 12(1), 1–27.
- Siarudin, M., Indrajaya, Y., Junaidi, E., Winara, A., Widiyanto, A., & Badrunasar, A. (2019). *Jasa lingkungan agroforestri: Belajar dari masyarakat DAS Balangtieng Sulawesi Selatan*. IPB Press.
- Song, N., & Banyo, Y. (2011). Konsentrasi klorofil daun sebagai indikator kekurangan air pada tanaman. *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(2), 1–8.
- Sriwahyuni, P., & Parmila, P. (2019). Peran bioteknologi dalam pembuatan pupuk hayati. *AGRO BALI: Agricultural Journal*, 2(1), 46–57.

- Sudiarti, D. (2017). The effectiveness of biofertilizer on soybean (*Glycine max*) plant growth. *Jurnal Sain Health*, 1(2), 46–55.
- Tampubolon, E. P., Setiawan, A., & Sudiarso. (2019). Analisis vegetasi di perkebunan kopi rakyat dan PTPN XII dengan naungan yang berbeda. *Jurnal Produksi Tanaman*, 7(1), 81–89.
- Trtasnandi, A., Maryani, E., & Andari, R. (2023). The concept of community-based tourism development in Situ Tandon Ciater. *Journal of Tourism Sustainability*, 3(2), 101–105.
- Wijayanto, N., & Prasetyo, A. (2021). Struktur vegetasi, komposisi, dan serapan karbon pekarangan di Desa Duyung, Kecamatan Trawas, Kabupaten Mojokerto. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 12(3), 144–150.
- Zega, I. C., & Lase, N. K. (2025). Potensi *Rhizobium* dalam meningkatkan efisiensi fiksasi nitrogen untuk kesuburan tanah: Kajian literatur. *Hidroponic: Jurnal Ilmu Pertanian dan Teknologi dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), 86–94.
- Zhao, J., Liu, D., & Huang, R. (2023). A review of climate-smart agriculture: Recent advancements, challenges, and future direction. *Sustainability*, 15(4), 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/su15043404>

## BAB 12

# Industri Digital: Pemanfaatan Biokomputasi dan Bioinformatika sebagai Analisis Industri

**Dita Tri Mulyani**

Perkembangan teknologi digital pada abad ke-21 telah mengubah hampir seluruh sektor industri, termasuk industri kesehatan, bioteknologi, pertanian, farmasi, hingga lingkungan. Transformasi ini ditandai dengan meningkatnya kemampuan komputasi, ketersediaan *big data*, serta pertumbuhan kecerdasan buatan yang semakin canggih. Dalam konteks industri berbasis biologi, muncul dua bidang penting yang menjadi penggerak utama revolusi digital tersebut, yaitu biokomputasi dan bioinformatika. Biokomputasi memberikan pendekatan matematis dan pemodelan komputasional untuk memahami sistem biologis, sedangkan bioinformatika fokus pada pengelolaan, analisis, dan interpretasi data biologis berskala besar. Interaksi keduanya menghasilkan suatu ekosistem analitis baru yang menjadi fondasi analisis industri modern. Melalui pendekatan berbasis data, bioinformatika memungkinkan identifikasi cepat terhadap biomolekul potensial, optimalisasi rantai pasok bioproduk, hingga prediksi hasil fermentasi dan rekayasa genetika industri (*industrial biotechnology*). Dalam konteks industri, integrasi biokomputasi memungkinkan optimasi proses bioproduksi melalui pemodelan variabel proses, prediksi hasil biologis, dan pengendalian kualitas secara *real-time*. Kolaborasi kedua bidang ini mempercepat transformasi digital industri dengan memadukan analisis data biologis dan kecerdasan komputasional. Oleh karena itu, pembahasan mengenai pemanfaatan

bioinformatika dan biokomputasi sebagai alat analisis industri menjadi sangat relevan, baik untuk memahami untuk memahami implementasi, tantangan, serta potensi strategisnya dalam mendukung daya saing industri masa depan.

## **Pengertian Biokomputasi dan Bioinformatika**

Biokomputasi merupakan bidang yang mengintegrasikan prinsip biologi, komputasi, matematika, serta ilmu data untuk memodelkan, menganalisis, dan mengoptimalkan proses biologis. Dalam konteks industri, Biokomputasi dapat didefinisikan sebagai penerapan metode komputasional untuk memahami, merancang, dan mengendalikan sistem biologis guna mendukung proses industri berbasis biologi (Delépine, 2017). Penerapan ini meliputi pemrosesan data biologis berskala besar, simulasi proses molekuler, rekayasa jalur metabolismik, dan pengembangan model prediktif untuk meningkatkan kinerja produk. Biokomputasi melihat DNA, protein, sel, dan jaringan biologis sebagai elemen yang dapat dimodelkan layaknya komponen komputasional seperti memori, prosesor, dan jaringan komunikasi (Zhang *et al.*, 2022). Pemanfaatannya meluas pada sektor farmasi, bioteknologi, pertanian, energi, dan lingkungan (Li *et al.*, 2004).

Pendekatan ini membantu peneliti memahami kompleksitas sistem biologis, sekaligus menciptakan cara baru untuk mensimulasikan dan memprediksi perilaku organisme. Dengan demikian, biokomputasi berkembang sebagai alat penting dalam bioinformatika, biologi sistem, dan rekayasa genetika. Hal ini dikarenakan biokomputasi memungkinkan analisis *big data* biologis dan pengembangan model yang lebih akurat.

Istilah bioinformatika diciptakan oleh Paulien Hogeweg pada tahun 1979, yang mempelajari proses informatika dalam sistem biotik. Kemudian, sekitar tahun 1980-an berkembangnya internet membuat para peneliti mulai menggunakan komputer sebagai tempat penyimpanan utama data yang dapat diakses dari jarak jauh. Setelah era 1980-an, bioinformatika berkembang pesat. Berbagai data molekuler dapat diakses untuk kepentingan penelitian di berbagai bidang (Singh, 2016). Perkembangan pesat di era komputer dan revolusi data biologi

menyebabkan lahirnya berbagai *database* seperti GenBank, EMBL, dan SWISS-PROT (Jean-Michel Claverie, 2007).

Bioinformatika adalah ilmu interdisipliner yang memanfaatkan teknik komputer, matematika, statistika, dan informatika untuk mengelola, menganalisis, dan menafsirkan data biologi, khususnya data molekuler seperti DNA, RNA, dan protein (Xiong, 2005). Segala aktivitas dalam penelitian, pengembangan, hingga pemanfaatan teknologi komputasi yang bertujuan memperluas penggunaan data di bidang biologi, kedokteran, perilaku, kesehatan, pertanian, industri serta ilmu pengetahuan lainnya. Selain itu, mulai dari proses memperoleh, menyimpan, mengelola, mengarsipkan, menganalisis, hingga memvisualisasikan data, semuanya termasuk dalam cakupan bioinformatika (Ramsden, 2004).

Bioinformatika tidak hanya fokus pada pengolahan data urutan DNA atau protein, tetapi juga meliputi pemanfaatan perangkat lunak dan *database* untuk mengelola informasi, analisis penemuan algoritma, pengembangan metode visualisasi data biologi, serta penerapan teknik analisis untuk menjawab permasalahan di ranah biologi molekuler, klinis, bioteknologi, farmakologi, bahkan hingga pertanian dan ilmu lingkungan. Seluruh proses mulai dari pencarian, penyimpanan, hingga analisis dan interpretasi data adalah bagian integral dari bioinformatika (Baxevanis *et al.*, 2020).

## **Manfaat Biokomputasi dan Bioinformatika**

### **1. Mempercepat Penemuan Obat dan Terapi Medis**

Biokomputasi dan bioinformatika memainkan peran sentral dalam pengembangan obat modern melalui simulasi molekuler, prediksi interaksi obat-target, dan analisis struktur protein. Dengan algoritma pembelajaran mesin dan pemodelan biologis, peneliti dapat mensimulasikan ribuan interaksi molekul dalam waktu singkat tanpa harus menguji semuanya secara laboratorium. Hal ini mempercepat proses penemuan obat, mengurangi biaya riset, dan meningkatkan akurasi identifikasi kandidat terapi potensial. Teknik seperti *in silico screening* dan pemodelan dinamika molekuler kini menjadi standar dalam farmakologi modern (Lavecchia, 2015).

## 2. Mengungkap Kompleksitas Sistem Biologis

Biokomputasi dan bioinformatika membantu ilmuwan memahami sistem biologis yang sangat rumit, seperti jaringan genetik, metabolisme sel, dan interaksi protein. Dengan pendekatan komputasional, peneliti dapat membangun model sistemik yang menunjukkan bagaimana sel bereaksi terhadap perubahan lingkungan, mutasi genetik, atau infeksi patogen. Hal ini penting dalam riset penyakit kompleks seperti kanker, Alzheimer, dan penyakit autoimun, yang mekanismenya melibatkan banyak komponen interaktif. Sains modern sangat bergantung pada simulasi komputasi untuk memvalidasi hipotesis biologis secara lebih efisien (Adleman, 1994).

## 3. Mendorong Inovasi Komputasi Berbasis Biologi

Biokomputasi dan bioinformatika tidak hanya menggunakan komputer untuk memahami biologi, tetapi juga menggunakan biologi sebagai komputernya. Komputasi DNA, komputasi molekuler, dan sel yang direkayasa sebagai perangkat logika adalah contoh revolusioner bagaimana biologi digunakan sebagai platform komputasi baru. Sistem ini menawarkan kapasitas paralel yang luar biasa, efisiensi energi tinggi, dan skala miniatur yang tak dapat dicapai oleh komputer elektronik. Peran ini semakin penting dalam penelitian kecerdasan buatan bioinspiratif (*bio-inspired computing*) dan pengembangan teknologi komputasi masa depan (Pyeritz *et al.*, 2018).

## 4. Mendorong Inovasi Komputasi dalam Bidang Pertanian

Biokomputasi dan bioinformatika memegang peranan penting dalam bidang pertanian modern, khususnya dalam program pemuliaan hewan dan tumbuhan. Teknologi ini dimanfaatkan untuk menganalisis sekuen, mengidentifikasi gen dalam DNA, serta mengembangkan metode prediksi struktur dan fungsi sekuen protein maupun RNA. Selain itu, bioinformatika mendukung pengelompokan sekuen dan pemodelan struktur protein yang berperan dalam peningkatan kualitas genetik tanaman dan ternak (Singh, 2016).

Dalam ilmu tanaman, bioinformatika digunakan untuk memahami mekanisme ketahanan terhadap patogen, interaksi antar tanaman, serta hubungan tanaman dengan organisme lain di lingkungannya. Informasi yang diperoleh dari analisis bioinformatika memungkinkan

pengembangan varietas tanaman yang lebih kuat, tahan terhadap serangga, serta peningkatan mutu ternak, sehingga menjadi lebih sehat, lebih kebal penyakit, dan lebih produktif (Sethi, 2016).

##### 5. Manajemen Keanekaragaman Hayati

Pengelolaan serta konservasi keanekaragaman hayati memerlukan ketersediaan informasi ilmiah yang mudah diakses. Namun, hingga kini, banyak data keanekaragaman hayati yang masih tersebar di berbagai basis data yang belum terintegrasi dan belum dapat diakses secara luas. Selain itu, sejumlah besar informasi ilmiah tersebut masih berada dalam bentuk dokumen cetak yang tersimpan di museum, herbaria, maupun repositori lainnya. Bioinformatika keanekaragaman hayati muncul sebagai disiplin baru yang berpotensi mengintegrasikan internet menjadi sistem informasi keanekaragaman hayati yang komprehensif. Berbagai penelitian konservasi berbasis bioinformatika tengah dikembangkan di berbagai negara untuk meningkatkan kapasitas pengelolaan data keanekaragaman hayati (Singh, 2016).

Bioinformatika dalam konteks keanekaragaman hayati membangun kerangka konseptual dan pendekatan teknis yang mampu memadukan beragam jenis informasi biologis, mulai dari data molekuler hingga ciri morfologis, informasi populasi, serta karakteristik habitat. Pendekatan ini mempelajari berbagai mekanisme sehingga memungkinkan terbentuknya korelasi antara data baru, data konvensional, dan data dari sumber lain yang lebih beragam termasuk perubahan ekosistem berskala global dan data siklus karbon. Kompleksitas biologi organisme, banyaknya spesies dalam suatu ekosistem, serta interaksi antara spesies dengan faktor abiotik menjadikan informasi keanekaragaman hayati sangat beragam dan rumit. Oleh karena itu, data yang diperoleh perlu disusun dengan metode baru, dianalisis, disintesis, dan disajikan dalam format yang dapat dipahami dan dimanfaatkan secara efektif. Bioinformatika keanekaragaman hayati menempatkan fokus pada pengembangan desain basis data yang optimal untuk mendukung pengelolaan dan penyimpanan informasi keanekaragaman hayati dalam jangka panjang (Singh, 2016).

**Tabel 12.1. Persamaan dan perbedaan Biokomputasi dan Bioinformatika**

<b>Aspek</b>	<b>Biokomputasi</b>	<b>Bioinformatikan</b>
1. Fokus Utama	Pemodelan biologis dan komputasi berbasis biologi	Analisis data biologis
2. Objek kajian	Sistem biologis sebagai model atau medium komputasi	Data genomik, proteomik, dan data biomolekul lainnya
3. Tujuan	Menciptakan model prediktif atau sistem komputasi inspirasi biologi	Memperoleh wawasan biologis dari data
4. Metode dominan	Simulasi, pemodelan, algoritma terinspirasi biologi	Statistik, machine learning, analisis sekuens
5. Contoh aplikasi	<i>DNA computing, dynamical simulations, neural computing</i>	BLAST, prediksi struktur protein, analisis filogenetik

### **Metode Biokomputasi dan Bioinformatika**

Metode penelitian beberapa tahun akan datang diperkirakan akan mengalami perubahan drastis dibandingkan pada tahun 2000. Para peneliti akan menghabiskan lebih banyak waktu bekerja di depan komputer serta memanfaatkan internet untuk melakukan eksperimen, menggambarkan dan menganalisis data, serta membandingkan hasil penelitian mereka dengan data dari studi lain. Kondisi ini menuntut adanya pengembangan dan pemanfaatan perangkat komputasi yang memadai. Beragam *tools* telah dikembangkan untuk menunjang aktivitas biokomputasi dan bioinformatika, baik berupa web server maupun perangkat lunak yang dirancang untuk penyimpanan dan pengambilan data secara terorganisir, analisis ekspresi gen, interpretasi sekuens DNA dan protein, algoritma untuk penyelarasan sekuens, hingga visualisasi data ilmiah (Rhee *et al.*, 2006).

***Beberapa Aplikasi Web dan Program yang dapat digunakan sebagai Analisis Industri***

Salah satu sasaran utama biokomputasi dan bioinformatika adalah merancang serta menerapkan berbagai perangkat dan metode sehingga proses mengakses dan mengelola beragam informasi dapat dilakukan dengan lebih efisien. Adapun beberapa aplikasi berbasis web dan program yang biasa dimanfaatkan dalam analisis *in silico* antara lain sebagai berikut:

## 1. NCBI

NCBI (*National Center for Biotechnology Information*) merupakan salah satu sumber informasi biologi dan kimia terpenting bagi komunitas penelitian biomedis. Basis data ini digunakan secara luas dalam berbagai bidang seperti *cheminformatics*, biologi kimia, kimia medisinal, serta penemuan dan pengembangan obat.

NCBI menyediakan beragam *big data* yang dimanfaatkan dalam pembelajaran mesin dan ilmu data, misalnya untuk *virtual screening*, *drug repurposing*, prediksi toksisitas kimia, prediksi efek samping obat, serta identifikasi metabolit.

Database NCBI diperbarui secara berkelanjutan mengikuti perkembangan terbaru terkait DNA, protein, senyawa aktif, dan taksonomi. Selain basis data, NCBI juga menyediakan berbagai perangkat lunak dan alat analisis, seperti analisis sekuen DNA, struktur protein 3D, pencarian primer, analisis *conserved domain*, dan banyak lagi.

Secara umum, NCBI merupakan salah satu bank data genom, protein, dan literatur ilmiah di bidang kesehatan yang paling lengkap dan banyak dijadikan acuan oleh peneliti di seluruh dunia (Apsari *et al.*, 2018). Situs NCBI dapat diakses pada: [www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov).

## 2. BLAST

BLAST, singkatan dari *Basic Local Alignment Search Tools*, merupakan perangkat lunak yang sangat maju. Aplikasi ini telah menjadi salah satu alat terpenting dalam bidang komputasi. Ada beberapa alasan yang mendasarinya. Pertama, pencarian kesamaan

sekuen adalah cara yang sangat efektif untuk mengenali berbagai elemen yang belum diketahui dalam data sekuen. Kedua, BLAST memiliki tingkat keandalan tinggi, baik secara statistik maupun dalam kualitas pengembangan perangkat lunaknya. Ketiga, BLAST bersifat fleksibel dan dapat disesuaikan dengan banyak jenis analisis sekuen. Walaupun ada algoritma lain yang serupa dan menawarkan fitur tambahan, keunggulan historis BLAST membuatnya tetap menjadi pilihan utama (Korf *et al.*, 2003). Situs BLAST dapat diakses pada: <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>

### 3. UniProt

UniProt (*Universal Protein Resource*) adalah layanan web yang menyediakan data mengenai urutan protein beserta berbagai informasi terkait, seperti fungsi, struktur, dan sekuennya. Platform ini menawarkan kumpulan data yang lengkap, berkualitas tinggi, dan dapat diakses secara gratis. Selain itu, UniProt terhubung dengan web server PDB, sehingga mempermudah pengguna dalam memperoleh struktur 3D dari suatu protein (Pundir *et al.*, 2016). Situs UniProt dapat diakses pada: <https://www.uniprot.org/>.

### 4. PDB

PDB (*Protein Data Bank*) adalah *database* yang menyimpan informasi struktur tiga dimensi dari molekul berukuran besar, termasuk protein, asam nukleat, serta berbagai kompleks molekuler lainnya. *Database* ini bermanfaat untuk mempelajari berbagai aspek terkait sintesis protein, biomedis, pertanian, kesehatan, maupun penyakit (Almo *et al.*, 1997). Situs PDB dapat di akses di <https://www.rcsb.org/>.

### 5. KEGG Pathway Database

KEGG (*Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes*) merupakan *database* yang memuat informasi mengenai genom, gen, jalur (*pathway*) biologis, penyakit, obat-obatan, enzim, reaksi, serta berbagai senyawa kimia. KEGG digunakan untuk menelaah fungsi sistem biologis pada level sel, organisme, hingga ekosistem dengan memanfaatkan data molekuler skala besar, khususnya hasil sekuensing genom dan teknik eksperimental lainnya. Di dalam KEGG, pengguna

dapat menemukan beragam gen atau protein, interaksi, reaksi, serta jaringan hubungan (*network*) yang berperan dalam suatu penyakit tertentu (Kanehisa *et al.*, 2016). Situs KEGG dapat di akses di <https://www.genome.jp/kegg/>.

## 6. Ensembl Genome Browser

Ensembl Genome Browser adalah platform komputasi yang menyediakan akses komprehensif terhadap data genom berbagai organisme, terutama vertebrata. Ensembl menampilkan informasi lengkap mengenai susunan genom, anotasi gen, varian genetik, urutan DNA, regulasi gen, serta perbandingan genom antarspesies. *Database* ini dirancang untuk membantu peneliti memahami struktur dan fungsi genom dengan menyediakan visualisasi interaktif, alat pencarian yang kuat, serta fitur analisis seperti perbandingan evolusioner (*comparative genomics*) dan prediksi gen. Ensembl juga sering digunakan untuk meninjau hubungan antara variasi genetik dan fenotipe atau penyakit tertentu (Aken *et al.*, 2016). Situs Ensembl Genome Browser dapat di akses di <https://www.ensembl.org>.

## 7. String Database

STRING Database adalah *database* yang menyediakan informasi mengenai interaksi antarprotein, baik yang telah dibuktikan secara eksperimen maupun yang diprediksi melalui berbagai metode komputasional. STRING mengumpulkan dan mengintegrasikan data dari berbagai sumber, termasuk hasil penelitian laboratorium, prediksi bioinformatika, analisis ko-ekspresi, asosiasi tekstual, serta basis data interaksi lainnya (Szklarczyk *et al.*, 2023).

Tujuan utama STRING adalah membantu peneliti memahami bagaimana protein saling berhubungan dan bekerja sama dalam proses biologis. Dalam platform ini, setiap protein ditampilkan dalam bentuk jaringan (*network*) yang memperlihatkan hubungan fungsionalnya dengan protein lain, sehingga memudahkan identifikasi jalur biologis, fungsi protein, maupun keterkaitannya dengan penyakit. Dengan visualisasi jaringan yang interaktif dan data yang terus diperbarui, STRING menjadi alat penting dalam studi proteomik, biologi sistem,

dan analisis interaksi molekuler (Szklarczyk *et al.*, 2023). Situs STRING dapat di akses di <https://string-db.org>.

## 8. Copasi

COPASI adalah perangkat lunak *open-source* yang dirancang untuk mensimulasikan dan menganalisis jaringan biokimia serta dinamika molekuler. Perangkat ini mampu menjalankan model menggunakan persamaan diferensial biasa (ODE), melakukan simulasi stokastik dengan algoritme Gillespie, serta menangani peristiwa diskrit dalam sistem. COPASI menyediakan berbagai metode analisis, termasuk estimasi parameter, optimisasi, analisis sensitivitas, dan analisis kestabilan, sehingga peneliti dapat menyesuaikan model dengan data eksperimen dan mengeksplorasi perilaku sistem secara menyeluruh. Selain itu, perangkat ini mendukung standar SBML untuk pertukaran model, dan hasil simulasi dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik waktu nyata, histogram, atau animasi diagram jaringan. COPASI tersedia sebagai aplikasi mandiri yang dapat digunakan melalui grafis (GUI) maupun baris perintah, sehingga fleksibel untuk pengguna dengan berbagai tingkat pengalaman (Bergmann *et al.*, 2017). Situsnya dapat di akses: <https://copasi.org/>.

## 9. Matlab

MATLAB adalah perangkat lunak komputasi numerik dan pemrograman yang banyak digunakan untuk analisis data, pemodelan, simulasi, dan visualisasi ilmiah. MATLAB menyediakan lingkungan terpadu yang memungkinkan pengguna melakukan perhitungan matematis, pemrosesan sinyal, analisis statistik, serta pemodelan sistem kompleks dengan mudah. Dalam komputasi dan penelitian ilmiah, MATLAB sering digunakan untuk analisis data biologis, visualisasi grafik interaktif, serta pengembangan algoritma. Perangkat ini juga mendukung berbagai *toolbox* khusus, seperti *Bioinformatics Toolbox*, yang menyediakan fungsi dan algoritma tambahan untuk pengolahan data sekuen, analisis genomik, dan pemodelan jaringan biologis. Dengan aplikasi yang intuitif dan kemampuan *scripting* yang kuat, MATLAB menjadi salah satu alat utama bagi peneliti untuk

mengintegrasikan komputasi numerik dengan analisis data dan visualisasi ilmiah (Afrianita & Laksono, 2015). Situs Matlab dapat diakses di <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

## 10. Gromacs

GROMACS adalah perangkat lunak *open-source* yang digunakan untuk *molecular dynamics (MD) simulations*, yaitu simulasi pergerakan atom dan molekul dalam sistem biologis atau kimia. Program ini banyak dipakai untuk mempelajari protein, lipid, DNA, dan sistem biomolekuler lainnya pada tingkat atom. GROMACS dikenal karena kecepatan dan efisiensinya dalam menghitung interaksi antaratom, serta kemampuan melakukan simulasi dalam skala besar. Perangkat ini menyediakan berbagai alat untuk menyiapkan sistem, menjalankan simulasi, menganalisis dinamika molekuler, dan memvisualisasikan hasil secara interaktif.

Dengan fleksibilitas tinggi dan dukungan komunitas yang luas, GROMACS menjadi salah satu platform utama dalam studi dinamika molekuler, desain obat berbasis komputer, dan penelitian biofisika (Abraham *et al.*, 2015).

### ***Langkah-langkah Biokomputasi dan Bioinformatika***

Salah satu metode yang dapat digunakan pada Biokomputasi dan Bioinformatika adalah NCBI, berikut langkah-langkah NCBI:

- Akses data senyawa di PubChem

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.

- Hingga muncul seperti tampilan dibawah ini:



The screenshot shows the PubChem homepage with a dark blue header. The header features the NIH National Library of Medicine logo and the text "National Center for Biotechnology Information". Below the header, the PubChem logo is displayed, followed by links for "About", "Docs", "Submit", and "Contact". The main content area has a dark blue background with a hexagonal geometric pattern. The text "Explore Chemistry" is prominently displayed in white. Below it, the subtext "Quickly find chemical information from authoritative sources" is visible. A search bar is located at the bottom of the main content area. Below the search bar, there are several input fields and buttons: "Try", "aspirin", "EGFR", "C9H8O4", "57-27-2", "C1=CC=C(C=C1)C=O", "InChI=1S/C3H6O/c1-3/24/h1-2h3", "Use Entrez", "Compounds", "Substances", and "BioAssays".

- c. Masukkan nama senyawa pada kotak “*search*”. kemudian pilih “Go”.

Compound	Gene	Taxonomy
Osthole	holt;	porthole catfish
Osthol	hole-in-one	porthole pipefish
Ostole	ear punch hole 1	porthole treefrog
OXAZOLE	mutS ortholog 2-like	Porthole pygmygoby
Anethole trithione	KIAA0211-like ortholog	porthole livebearer
Ostheneol	Suppressor of pole hole 6	Stomigenea ortholex
Ethyl oxazole-4-carboxylate	Suppressor of pole hole 7	dhole

- d. Hasilnya akan muncul tampilan di bawah ini, senyawa yang dipilih tergantung tujuan penelitian kita. Misalnya kita menargetkan senyawa murni yang bukan turunan, maka pilihlah senyawa murni.

BEST MATCH

Osthole; Osthol; 484-12-8; Ostole; Ostol; 2H-1-Benzopyran-2-one, 7-methoxy-8-(3-methyl-2-butenyl)-; 7-methoxy-8-(3-methylbut-2-enyl)chromen-2-one; 7-Methoxy-8-isopentenylcoumarin; ...

Compound CID: 10228

MF: C9H16O5 MW: 244.28 g/mol

IUPAC Name: 7-methoxy-8-(3-methyl-2-butenyl)chromen-2-one

SMILES: CC1=CC(C=C2=C1COC(=O)C2)OC(=O)C1=CC2=CC=CC=C2=C1

InChIKey: MRLBLQHOWLULMFP-UHFFFAOYSA-N

InChI: InChI=1S/C15H16O5/c1-10(24-7-12-13(17-38-5-11-6-9-14(16(18-15(11)12/h4-6,8-9H,7H2,1-3H3

Create Date: 2005-03-26

Summary Similar Structures Search Related Records PubMed (MeSH Keyword)

- e. Kemudian akan muncul tampilan di bawah ini, nama senyawa dan ID harus disimpan di notepad, lalu untuk mendapatkan struktur 3D maka harus di-*scroll* ke bawah.

National Library of Medicine  
National Center for Biotechnology Information

PubChem About Docs Submit Contact Search PubChem

COMPOUND SUMMARY

## Osthol

PubChem CID 10228

Structure

Primary Hazards Laboratory Chemical Safety Summary (LCSS) Datasheet

Molecular Formula C<sub>13</sub>H<sub>16</sub>O<sub>3</sub>

Synonyms Osthole  
Osthol  
484-12-8  
Ostole

CONTENTS

- 1 Structures
- 2 Names and Identifiers
- 3 Chemical and Physical Properties
- 4 Spectral Information
- 5 Related Records
- 6 Chemical Vendors
- 7 Drug and Medication Information
- 8 Food Additives and Ingredients
- 9 Pharmacology and Biochemistry
- 10 Use and Manufacturing
- 11 Identification
- 12 Safety and Hazards
- 13 Toxicity

- f. Pilih 3D conformer, kemudian download dan pilih format sdf.

PubChem Osthol (Compound)

PubChem

1.2 3D Conformer

Interactive Chemical Structure Model

Ball and Stick  
Sticks  
Wire-Frame  
Space-Filling  
Show Hydrogens  
Animate

Structure Search Get Image Download Coordinates

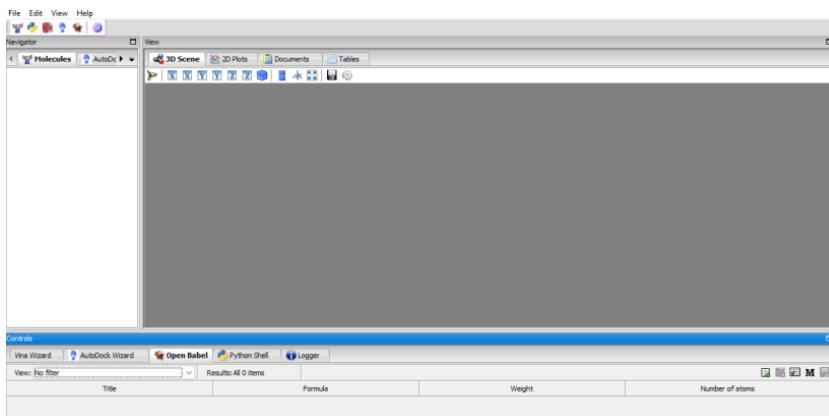
Conformer 1 of 10 Next > Last >>

PubChem

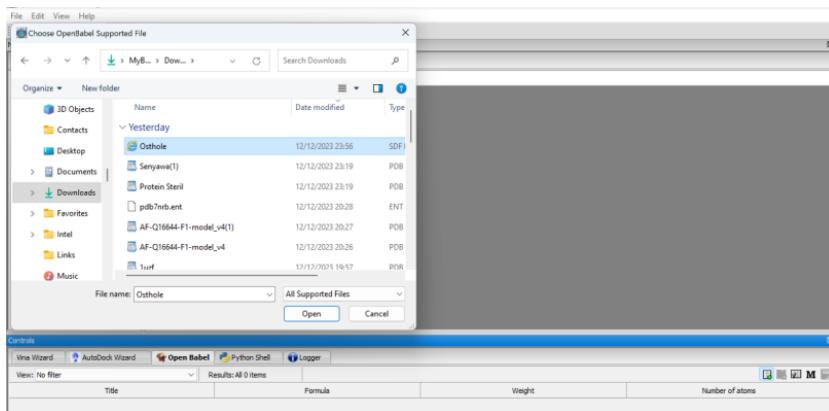
CONTENTS

- 1 Structures
- 2 Names and Identifiers
- 3 Chemical and Physical Properties
- 4 Spectral Information
- 5 Related Records
- 6 Chemical Vendors
- 7 Drug and Medication Information
- 8 Food Additives and Ingredients
- 9 Pharmacology and Biochemistry
- 10 Use and Manufacturing
- 11 Identification
- 12 Safety and Hazards
- 13 Toxicity
- 14 Associated Disorders and Diseases
- 15 Literature
- 16 Patents
- 17 Interactions and Pathways

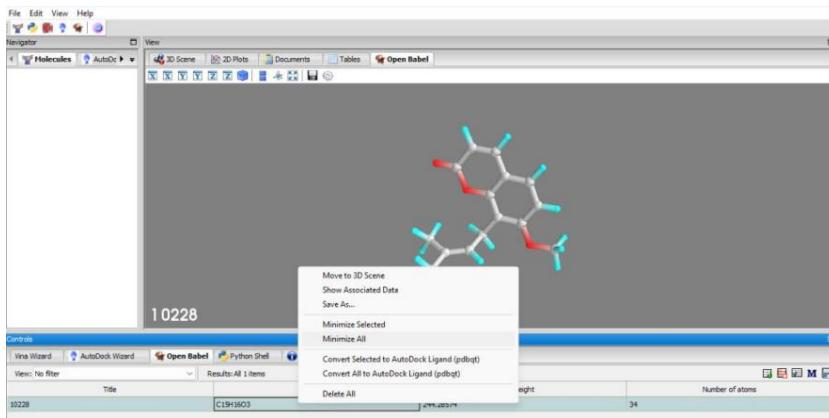
- g. Senyawa yang telah di download diberi nama yang sesuai, kemudian disimpan dalam *folder* yang telah ditentukan.
- h. Sampel dalam format sdf harus diminimasi atau di-convert ke dalam format pdb agar dapat dilakukan *docking* dalam software PyRx. Untuk *docking*, pertama kita harus membuka software PyRx terlebih dahulu, kemudian *plug in*, lalu pilih OpenBabel:



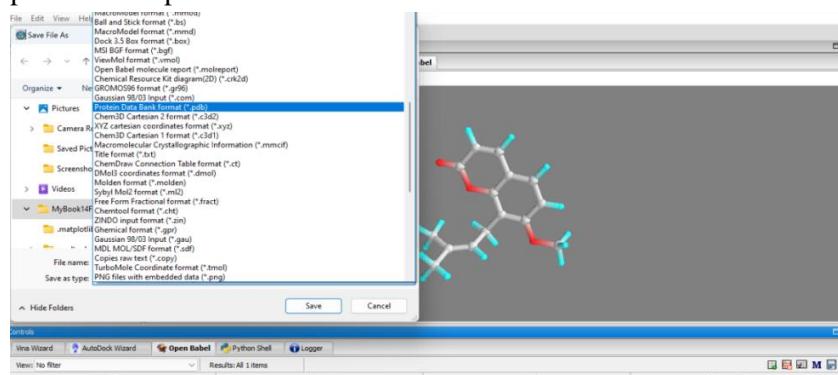
- i. Lalu untuk memasukkan senyawa dengan format sdf, pilih “*insert new item*”.
- j. Pilih sampel yang akan diminimasi:



- k. Kemudian, klik kanan dan pilih "minimize all":



1. Simpan sampel dengan cara klik kanan - save as - pilih folder, lalu pilih format .pdb dan “save”.



## DAFTAR PUSTAKA

- Alleman, L. M. (1994). Molecular computation of solutions to combinatorial problems. *Science*, 266(5187), 1021–1024. <https://doi.org/10.1126/science.7973651>
- Baxevanis, A. D., Bader, G. D., & Wishart, D. S. (2020). *Bioinformatics*. Wiley.
- Delépine, B. (2017). *Design (CAD) tools for bioproduction and biosensing pathway engineering* (Doctoral dissertation). Université Paris-Saclay.
- Claverie, J.-M., & Notredame, C. (2007). *Bioinformatics for dummies* (2nd ed.). Wiley.
- Lavecchia, A. (2015). Machine-learning approaches in drug discovery: Methods and applications. *Drug Discovery Today*, 20(3), 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2014.10.012>
- Li, C., Henry, C. S., Jankowski, M. D., Ionita, J. A., Hatzimanikatis, V., & Broadbelt, L. J. (2004). Computational discovery of biochemical routes to specialty chemicals. *Chemical Engineering Science*, 59(22–23), 5051–5060. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.09.021>
- Pyeritz, R. E., Korf, B. R., & Grody, W. W. (2018). *Emery and Rimoin's principles and practice of medical genetics and genomics*. Elsevier.
- Ramsden, J. (2004). *Bioinformatics: An introduction*. Kluwer Academic Publishers.
- Rhee, S. Y., Dickerson, J., & Xu, D. (2006). Bioinformatics and its applications in plant biology. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 335–360. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144103>
- Sethi, P. C. (2016). *Bioinformatics: Applications and issues*. [Conference presentation]. October, 24–25.
- Singh, H. (2016). Bioinformatics: Benefits to mankind. *International Journal of PharmTech Research*, 9(4), 242–248.
- Xiong, J. (2005). *Essential bioinformatics*. Cambridge University Press.

Zhang, Y., Luo, M., Wu, P., Wu, S., Lee, T.-Y., & Bai, C. (2022). Application of computational biology and artificial intelligence in drug design. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(21), 13568. <https://doi.org/10.3390/ijms232113568>

## BAB 13

# Bidang Keamanan: Bahaya Biologi dalam Lingkungan Industri

**Achmad Sakhowi Al Awwarij**

Lingkungan industri menjadi salah satu pendorong utama pertumbuhan ekonomi, tetapi juga tidak lepas dari berbagai risiko, termasuk ancaman biologis. Bahaya biologis di sektor industri mengacu pada potensi risiko yang muncul akibat penggunaan, pengolahan, atau pembuangan bahan-bahan biologis yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan sekitar.

Bahaya biologis di tempat kerja dan lingkungan industri mencakup keberadaan agen penyebab penyakit, limbah biologis, serta perlunya pengelolaan dan pemantauan yang cermat agar risikonya dapat ditekan. Dampak kesehatan akibat bahaya biologis ini sangat beragam. Dalam dunia industri, para pekerja berisiko terpapar mikroorganisme, virus, bakteri, atau agen patogen lain yang bisa menimbulkan infeksi atau gangguan kesehatan serius.

Secara keseluruhan, kesadaran dan pengelolaan terhadap bahaya biologis di lingkungan industri harus menjadi perhatian utama bagi semua pihak terkait. Melalui kerja sama yang baik antar pemangku kepentingan dan penerapan prosedur keselamatan yang tepat, risiko akibat bahaya biologis dapat diminimalkan, menciptakan tempat kerja yang lebih aman bagi karyawan, serta melindungi kesehatan masyarakat dan kelestarian lingkungan.

Keamanan dalam konteks industri mencakup aspek perlindungan terhadap kesehatan pekerja, konsumen, serta pemenuhan regulasi lingkungan. Mengingat meningkatnya kompleksitas produk bioteknologis dan potensi penyebaran patogen, perlunya sistem

keamanan yang mengutamakan perlindungan kesehatan masyarakat menjadi semakin krusial. Oleh karena itu, penerapan standar keamanan yang tinggi merupakan bagian integral dari kebijakan industri, dan melibatkan pengawasan yang cermat terhadap proses produksi serta distribusi (Mishali & Eldar, 2012).

### **Definisi dan Klasifikasi Ancaman Biologi**

Ancaman biologi mencakup penggunaan dan penyebaran patogen untuk tujuan agresif, seperti dalam bioterorisme dan konflik militer. Mereka menggaris bawahi pentingnya penelitian dalam identifikasi dan pengembangan teknologi deteksi untuk agen patogen yang dipilih. Selain itu, menurut Stawicki, memperluas definisi keamanan kesehatan internasional diperlukan dan mencakup berbagai faktor, termasuk penyakit menular baru dan keamanan rantai pasokan obat. Hal ini menunjukkan bahwa ancaman biologi dapat berdampak luas pada populasi (Stawicki *et al.*, 2021).

Bahaya biologi (*biohazard*) sering didefinisikan sebagai ancaman yang timbul dari agen biologis, seperti bakteri, virus, dan biotoksin, yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan. Dalam konteks industri, bahaya ini mencakup paparan terhadap zat-zat yang dapat menyebabkan penyakit atau dampak negatif lainnya. Sementara itu, ancaman bioterorisme adalah penggunaan bahan biologis dengan maksud merusak dalam konteks sosial atau politik. Perbedaan penting antara keduanya adalah bahwa bahaya biologi lebih bersifat tidak disengaja dan muncul dari pengelolaan yang kurang baik, sedangkan bioterorisme direncanakan dengan maksud jahat (Coker, 2010).

Di sektor strategis, seperti industri pangan, farmasi, dan energi, perhatian terhadap bahaya biologi sangat penting, karena insiden kecil dapat berakibat fatal terhadap kesehatan masyarakat dan infrastruktur. Misalnya, kontaminasi pangan oleh patogen seperti *Salmonella* dapat menyebabkan wabah serius yang berdampak luas. Dalam industri farmasi, kesalahan dalam pengelolaan patogen atau biotoksin bisa mengarah pada produk gagal dan risiko bagi pasien (Pandey & Teixeira, 2017). Oleh karena itu, pemahaman yang jelas tentang bahaya biologi

dan langkah pencegahan yang diperlukan sangat penting untuk melindungi kesehatan masyarakat (Winder, 2012).

### **Definisi dan konteks bahaya biologi**

Bahaya biologi merujuk kepada risiko yang ditimbulkan oleh mikroorganisme, bahan biologi, dan organisme hidup terhadap manusia, hewan, dan lingkungan. Definisi ini sesuai dengan pemahaman yang dikemukakan oleh para ahli dan teks yang diakui dalam kajian biologi dan kesehatan. Menurut Hannan *et al.*, bahaya biologi di sektor perikanan, khususnya dalam pemrosesan udang, bisa timbul dari kontaminasi mikroba selama tahap paska-panen, yang belum banyak dipahami dalam hal pemrosesan dan inspeksi bahan mentah (Hannan *et al.*, 2022). Mereka menekankan pentingnya kontrol kualitas dan jalur jejak (*traceability*) untuk meminimalkan risiko tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa aspek biologi memiliki implikasi langsung terhadap kualitas dan keamanan pangan.

Dalam konteks yang lebih luas, bahaya biologi juga dapat mencakup risiko terhadap kesehatan masyarakat yang lebih besar. Penelitian oleh Sönmez dan Hocaoğlu menggarisbawahi bahwa pandemi COVID-19, misalnya, menimbulkan dampak psikososial yang signifikan, termasuk stigma terhadap individu yang terinfeksi dan xenofobia dalam masyarakat (Sönmez & Hocaoğlu, 2023). Penelitian ini menunjukkan bagaimana penyebaran agen biologis, seperti virus, dapat memperburuk dinamika sosial dan kesehatan publik. Oleh karena itu, pemahaman tentang bahaya biologi tidak hanya melibatkan aspek teknis tetapi juga membutuhkan perhatian pada konteks sosial dan psikologis yang dapat memperburuk situasi.

Selain itu, konteks bahaya biologi juga berhubungan dengan isu-isu lingkungan dan perubahan iklim yang dapat meningkatkan penyebaran patogen. Arnold dan Barker mencatat bahwa tantangan yang dihadapi dalam penelitian dan inovasi termasuk mengatasi krisis lingkungan dan penyakit. Dalam dinamika ini, bahaya biologi menjadi faktor utama (Arnold & Barker, 2022).

Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang risiko dan bahaya yang ditimbulkan oleh unsur biologi sangat penting, tidak hanya untuk kesehatan individu, tetapi juga untuk keberlanjutan lingkungan.

Kesimpulannya, bahaya biologi meliputi berbagai aspek yang saling terkait, mulai dari keamanan pangan, dampak kesehatan masyarakat, hingga isu lingkungan. Pemahaman yang komprehensif mengenai bahaya biologi memerlukan pengintegrasian pengetahuan dari beragam disiplin ilmu, termasuk biologi, kesehatan masyarakat, dan ilmu sosial.

### **Sumber utama agen biologi dalam industri**

Agen biologi dalam industri dapat dikategorikan menjadi empat jenis utama: patogen alami, biotoksin, produk rekayasa hayati (GMO), dan penyakit menular atau epidemik.

1. Patogen alami: Bakteri, virus, dan jamur dapat menimbulkan risiko serius bagi pekerja dan produk. Patogen seperti *Legionella* dalam sistem pendingin dan *Salmonella* dalam industri pangan menunjukkan bagaimana infeksi dapat menyebar dengan cepat jika tidak dikelola dengan baik (Pietrangeli & Lauri, 2018). Paparan terhadap patogen ini bisa terjadi melalui inhalasi, konsumsi, atau kontak langsung.

Bakteri yang umum di industri makanan, seperti spesies *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, dan *Listeria monocytogenes*, yang dapat menyebabkan penarikan produk (*product recall*) besar-besaran. Di lingkungan non-pangan, *Legionella pneumophila* dari sistem pendingin adalah patogen udara yang signifikan. Sedangkan virus merupakan ancaman di fasilitas produksi vaksin atau terapeutik biologis, yang merupakan kebocoran atau kontaminasi silang dan dapat menghancurkan *batch* produksi.

2. Biotoksin: Racun yang dihasilkan oleh organisme, seperti aflatoksin dan toksin botulinum, dapat menyebabkan keracunan serius (Kasangaki, 2025). Pentingnya pengenalan dan pengendalian biotoksin dalam lingkungan industri tidak bisa

- diabaikan, karena potensi dampaknya terhadap kesehatan pekerja dan kualitas produk.
3. Produk rekayasa hayati (GMO): Organisme hasil rekayasa genetik menghadirkan risiko berupa potensi pelepasan organisme dengan sifat yang tidak terduga ke lingkungan, yang dapat berdampak negatif terhadap ekosistem (Pandey & Teixeira, 2017). Penerapan bahan biologis sintetis ini harus diatur secara ketat untuk mencegah dampak yang tidak diinginkan.
  4. Penyakit Menular atau Epidemik: Ancaman biologis juga mencakup potensi epidemi penyakit yang berasal dari zoonosis atau dari lingkungan. Dwivedi *et al.* mencatat penerapan teknik penginderaan canggih untuk mengidentifikasi ancaman terhadap kesehatan manusia yang dapat muncul dari keterkaitan dengan lingkungan dan agrikultur, meskipun penelitian ini lebih fokus pada pengklasifikasian citra dan bukan eksplisit tentang ancaman biologis (Dwivedi *et al.*, 2020).

### **Klasifikasi risiko biologi (*Biosafety Levels – BLS*)**

Klasifikasi BSL adalah alat fundamental yang diatur oleh badan seperti WHO dan CDC. Klasifikasi ini didasarkan pada patogenisitas, rute penularan, dan ketersediaan pencegahan/pengobatan.

Klasifikasi risiko biologis yang dikenal sebagai *Biosafety Levels* (BSL) membagi agen biologi ke dalam kategori berdasarkan tingkat bahaya yang mereka timbulkan. Menurut Cooker (2010) dan Biological Hazards (2020), terdapat empat level BSL yang diatur untuk memastikan keselamatan kerja dalam fasilitas yang menggunakan atau mengelola agen ini, antara lain:

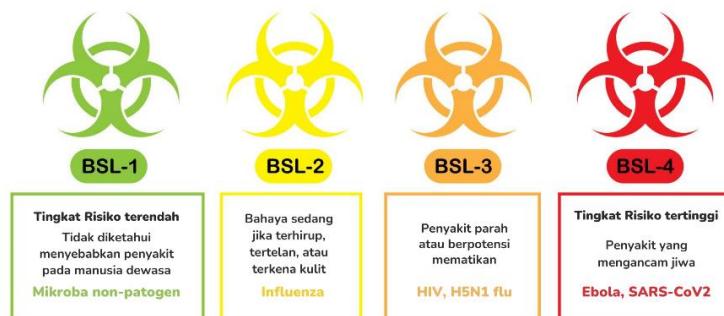
- BSL-1: Termasuk agen yang tidak berbahaya dan tidak dapat menyebabkan penyakit pada manusia. Prosedur standar cukup untuk mengelola level ini.
- BSL-2: Agar dapat mengelola agen yang berpotensi menyebabkan penyakit ringan, diperlukan langkah-langkah keamanan tambahan seperti penggunaan alat pelindung.

- BSL-3: Menghadapi patogen yang dapat menyebabkan penyakit serius yang ditularkan melalui inhalasi. Fasilitas pada level ini dilengkapi dengan kontrol akses ketat dan sistem ventilasi.
- BSL-4: Menangani agen yang bersifat mematikan dan tanpa adanya terapi yang efektif. Fasilitas dalam tingkat ini harus bersifat sangat terisolasi dan mengikuti prosedur keselamatan yang ketat.

**Tabel 13.1. Biosafety Levels**

Level (BSL)	Kategori Risiko (WHO/CDC)	Agen Biologi Khas	Lingkungan Industri yang Relevan
<b>BSL-1</b>	Risiko Individu dan Komunitas Rendah	<i>E. coli</i> non-patogen	Laboratorium
<b>BSL-2</b>	Risiko Individu Sedang, Risiko Komunitas Rendah	<i>Salmonella spp.</i> , Hepatitis B	Pengajaran, R&D dasar, Lab Diagnostik Klinis, Produksi Vaksin skala kecil
<b>BSL-3</b>	Risiko Individu Tinggi, Risiko Komunitas Rendang	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Fasilitas Produksi Vaksin tertentu, Lab Penelitian Khusus
<b>BSL-4</b>	Risiko Individu dan Komunitas Tinggi	Virus Ebola, Virus Marburg	Hanya Laboratorium Karantina/Penelitian Tingkat Tinggi

## BIOSAFETY LEVELs (BSL)



Sumber: Biological Hazards (2020)

**Gambar 13.1 Contoh gambar**

Penerapan klasifikasi BSL merupakan langkah penting dalam pengelolaan risiko di fasilitas penelitian dan produksi, untuk melindungi kesehatan pekerja dan mencegah kebocoran biologis yang dapat berpengaruh luas pada masyarakat.

### **Analisis Risiko dan Skema Dampak Industri**

Analisis risiko biologi dan skema dampak industri merupakan aspek kunci dalam menjaga kesehatan masyarakat dan lingkungan, sekaligus pengendalian yang diperlukan untuk meminimalisir risiko tersebut.

Analisis risiko biologi melibatkan pengidentifikasi, evaluasi, dan pengendalian risiko yang timbul dari agen biologis, seperti bakteri dan virus, dalam konteks industri dan lingkungan. Dalam hal ini, prosedur untuk mengontrol paparan terhadap bahaya biologis, termasuk manajemen limbah biologis dan penilaian risiko. Pengelolaan bahaya ini penting untuk meminimalkan potensi terjadinya insiden yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem (Coker, 2010).

### **Kerangka penilaian risiko Biologi (*Biological Risk Assessment – BRA*)**

Proses penilaian risiko biologis merupakan langkah pertama yang kritis dalam manajemen keamanan biologis. Penilaian ini mencakup tiga langkah utama: identifikasi bahaya, penilaian kemungkinan paparan, dan penentuan tingkat risiko. Langkah-langkah ini harus dievaluasi secara berkala untuk menyesuaikan kebijakan dan praktik yang ada sesuai dengan kondisi terkini (Guémas *et al.*, 2020).

Penilaian Risiko Biologi (*Biological Risk Assessment*) adalah fondasi dari manajemen keamanan biologi industri. Menurut manual *Laboratory Biosafety* dari Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), BRA adalah proses berulang yang melibatkan empat langkah utama, yaitu:

1. Identifikasi bahaya: Proses ini dimulai dengan pengidentifikasi agen biologis yang dapat berpotensi menimbulkan risiko, seperti mikroorganisme, toksin, dan patogen. Dalam tahap ini, perlu juga untuk mengevaluasi karakteristik biologis dari agen tersebut,

- termasuk tingkat virulensi dan infektivitasnya. Evaluasi ini sangat penting untuk memahami bahaya yang mungkin ditimbulkan oleh pelepasan agen biologis ke lingkungan atau tubuh manusia.
2. Identifikasi aktivitas dan paparan: Setelah bahaya diidentifikasi, tahap selanjutnya adalah mengidentifikasi aktivitas yang dapat menyebabkan paparan terhadap agen biologis tersebut. Misalnya, dalam konteks industri, aktivitas seperti pengolahan limbah biologis, penggunaan bahan baku biologis, atau interaksi di laboratorium perlu diperiksa secara rinci. Hal ini termasuk menjelaskan rute paparan yang mungkin terjadi seperti inhalasi, kontak kulit, atau konsumsi. Penilaian perlu mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan dan praktik kerja yang dapat meningkatkan atau mengurangi kemungkinan terjadinya paparan.
  3. Penentuan risiko: Pada tahap ini, analisis dilakukan untuk menilai hubungan antara bahaya yang teridentifikasi dan tingkat paparan yang mungkin terjadi. Tahap ini melibatkan penilaian tentang seberapa besar kemungkinan terjadinya dampak kesehatan, serta seberapa parah dampak tersebut jika terjadi. Estimasi risiko ini sering kali didukung dengan data epidemiologis dan hasil penelitian sebelumnya yang dapat memberikan gambaran mengenai potensi efek dari paparan tersebut.
  4. Implementasi Kontrol Mitigasi: Setelah risiko diidentifikasi dan dinilai, tahap selanjutnya adalah merumuskan dan menerapkan kontrol mitigasi untuk mengurangi risiko tersebut. Kontrol ini bisa mencakup langkah-langkah teknis, seperti penggunaan alat pelindung pribadi (PPE), pengendalian teknik, dan prosedur keselamatan laboratorium. Selain itu, perlu juga menciptakan kebijakan dan pelatihan untuk meningkatkan kesadaran pekerja tentang risiko yang terkait dengan agen biologis yang ada di lingkungan kerja. Evaluasi berkala terhadap efektivitas kontrol yang diimplementasikan juga penting untuk memastikan bahwa tingkat risiko tetap dalam batas yang dapat diterima.

Dalam implementasi dan pengawasan keseluruhan, pendekatan yang multidisiplin dan melibatkan berbagai pemangku kepentingan merupakan kunci untuk keberhasilan kerangka penilaian risiko biologi

ini. Dengan memperhatikan prosedur di atas, diharapkan potensi risiko biologis dapat dikelola dengan lebih efektif.

### **Dampak Bahaya biologi pada sektor industri**

Bahaya biologis dalam konteks industri strategis memiliki dampak yang signifikan terhadap berbagai aspek. Dampaknya tidak hanya mencakup kesehatan pekerja tetapi juga mencakup dampak ekonomi, operasional, dan hukum yang lebih luas. Memahami dampak ini membantu manajemen membuat rencana respons yang efektif.

1. Dampak kesehatan dan sumber daya manusia (SDM) : dampak manusia ini fokus ke penyakit akibat kerja (PAK). Penyakit akibat kerja (PAK) adalah salah satu dampak paling signifikan dari paparan bahaya biologis di tempat kerja. Pekerja yang terpapar patogen atau toksin dapat mengalami berbagai masalah kesehatan yang dapat berujung pada ketidakmampuan kerja atau penyakit jangka panjang. Wabah yang terjadi di lingkungan pabrik dapat menambah beban pada sistem kesehatan masyarakat dan merugikan industri secara keseluruhan. Memastikan bahwa tindakan pencegahan diterapkan dengan baik dapat mengurangi insiden penyakit di kalangan pekerja (Leber, 2016). Selain itu, menurut pemantuan pejalan dan pengawasan kesehatan yang ketat, wabah di fasilitas industri dapat melumpuhkan operasi karena tingginya tingkat absensi dan karantina.
2. Dampak operasional dan ekonomi : insiden yang melibatkan bahaya biologi dapat berakibat fatal bagi operasional dan ekonomi perusahaan. Contohnya, penarikan produk (*product recall*) karena kontaminasi dapat mengakibatkan kerugian finansial yang besar, penutupan fasilitas, dan hilangnya kepercayaan publik. Dampak ini dapat berkelanjutan jika reputasi perusahaan terpengaruh oleh laporan atau insiden yang menggaungkan media. Oleh karena itu, pengelolaan risiko yang efektif merupakan langkah penting untuk menjaga keberlanjutan dan reputasi perusahaan (Nisii *et al.*, 2016).
3. Dampak hukum dan regulasi: Kepatuhan terhadap standar internasional dan regulasi terkait *biosecurity* juga memainkan peran besar dalam pengelolaan risiko biologis. Kegagalan untuk

memenuhi standar ini dapat menyebabkan sanksi hukum, denda, atau bahkan penutupan fasilitas. Pemerintah dan lembaga pengatur semakin mengedepankan perlunya prosedur yang ketat untuk mencegah insiden biologis. Oleh karena itu, perusahaan perlu memahami regulasi yang relevan dan memastikan bahwa semua praktik sesuai dengan standar yang ditetapkan untuk menghindari konsekuensi hukum (Nazarova & Russell, 2016).

## Studi kasus

Studi kasus seringkali memberikan wawasan berharga tentang bagaimana ancaman biologis dapat muncul dan ditangani dalam konteks industri. Analisis insiden yang terjadi di industri makanan, vaksin, dan *bioprocessing* dapat memberikan pembelajaran penting bagi perusahaan lain untuk memahami risiko yang ada dan mengembangkan respons yang sesuai (Santibáñez *et al.*, 2015).

1. Kasus kontaminasi vaksin: Salah satu kasus yang menarik perhatian terjadi ketika kontaminasi di fasilitas produksi vaksin menyebabkan penarikan vaksin dari pasar. Insiden ini bukan hanya menimbulkan kerugian finansial bagi perusahaan tetapi juga meruntuhkan kepercayaan masyarakat terhadap vaksin. Hal ini menunjukkan betapa pentingnya pengontrolan yang ketat dalam proses produksi dan distribusi vaksin, serta perlunya transparansi dalam manajemen krisis (Golkar *et al.*, 2016).
2. Wabah di fasilitas pengolahan makanan: Dampak dari wabah di fasilitas pengolahan makanan juga merupakan contoh penting dalam memahami seriusnya bahaya biologi. Kasus *Salmonella* yang dihasilkan dari kontaminasi produk pangan menunjukkan potensi risiko yang dapat muncul dari proses produksi yang tidak memadai. Insiden ini membawa dampak besar, mulai dari penarikan produk hingga kerugian ekonomi yang signifikan, dan memicu penyelidikan yang memperlihatkan formulasi strategi baru untuk mencegah bahaya di masa mendatang (Gonzalez *et al.*, 2007).

Dari dua studi kasus diatas dapat diambil kesimpulan bahwa kurangnya Kontrol Sanitasi (*Hygiene Control*) dan kegagalan sistem HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points*), menunjukkan bahwa kelemahan minor dalam desain fasilitas atau protokol pembersihan dapat memicu ancaman biologi berskala besar.

### **Sistem keselamatan biologi (*Biosafety*) dan Keamanan Biologi (*Biosecurity*)**

Sistem *biosafety* dan *biosecurity* merupakan inti dari solusi dan strategi mitigasi untuk risiko biologis. Implementasi yang efektif dari kedua sistem ini dapat membantu industri meminimalkan risiko dan merespons dengan efisien ketika masalah muncul.

### **Strategi keselamatan biologi (*biosafety*) untuk perlindungan pekerja**

Dalam menghadapi bahaya biologi, industri harus menerapkan strategi keamanan yang komprehensif untuk melindungi pekerja. Hal ini mencakup penerapan kontrol teknik, administratif, program pelatihan dan pemantauan kesehatan serta alat pelindung diri (APD).

1. Kontrol teknik (*engineering controls*): Kontrol teknik berfokus pada desain fasilitas dan perlengkapan yang dapat mengurangi risiko paparan. Misalnya, penerapan sistem ventilasi berfilter HEPA yang memastikan bahwa udara yang dihirup oleh pekerja telah dibersihkan dari partikel berbahaya. Selain itu, penggunaan *Biological Safety Cabinet* (BSC) untuk penanganan bahan berbahaya dapat memberikan perlindungan tambahan bagi pekerja yang mungkin terpapar terhadap agen infeksius (Groaz *et al.*, 2021).
2. Kontrol administratif: melibatkan pengembangan *Standard Operating Procedures* (SOP) yang ketat serta berbasis risiko adalah bagian integral dari kontrol administratif. SOP ini harus mencakup cara penanganan, dekontaminasi, dan pembuangan limbah biologis. Dokumen-dokumen ini harus mudah diakses oleh semua pekerja, dan mereka harus diharuskan untuk mengikuti

prosedur tersebut untuk menjamin keselamatan dan kepatuhan terhadap peraturan yang ada.

3. Pelatihan dan pemantauan kesehatan: Pelatihan dan pemantauan kesehatan pekerja juga harus menjadi prioritas. Program imunisasi yang tepat dan pengawasan kesehatan rutin dapat membantu mendeteksi masalah kesehatan lebih awal. Dengan membekali pekerja dengan pengetahuan yang cukup tentang potensi risiko yang mereka hadapi dan cara mencegahnya, perusahaan dapat menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan lebih produktif.
4. Alat pelindung diri (APD): penggunaan APD merupakan lapisan terakhir. Penggunaan sarung tangan, *respirator* (N95 atau PAPR), dan pakaian pelindung yang didasarkan pada penilaian risiko (misalnya, penggunaan *tyvek suit* di area BSL-3).

### **Strategi keamanan biologi (*Biosecurity*) untuk perlindungan aset**

Selain perlindungan pekerja, biosecurity juga memainkan peran penting dalam melindungi aset perusahaan. Hal ini mencakup perlindungan terhadap bahan biologis, sampel, dan informasi sensitif dari akses yang tidak sah.

1. Kontrol akses: Sistem kontrol akses yang ketat sangat penting untuk mencegah akses yang tidak valid ke barang atau area berbahaya dalam fasilitas. Penjagaan fisik dan penggunaan sistem otentikasi digital atau kontrol akses biometrik, serta pengawasan menggunakan CCTV untuk mengontrol akses ke area sensitif sangat dianjurkan. Dengan langkah-langkah ini, diharapkan dapat mencegah kemungkinan pencurian material biologis yang berpotensi berbahaya, serta mengurangi risiko terjadinya bioterorisme.
2. Manajemen inventaris: Pengelolaan inventaris yang baik juga merupakan bagian penting dari sistem *biosecurity*. Perusahaan harus menerapkan sistem pelacakan yang efektif untuk material biologis berisiko tinggi atau *Select Agents*. Sistem ini bukan hanya menambah keamanan, tetapi juga membantu dalam audit dan pelaporan yang diperlukan untuk pemenuhan regulasi.

## **Peran bioteknologi dalam mitigasi dan deteksi**

Di tengah meningkatnya ancaman biologis, bioteknologi menawarkan berbagai solusi yang inovatif dalam pengelolaan dan mitigasi risiko.

1. Teknologi deteksi cepat: Pemanfaatan teknologi deteksi cepat seperti PCR (*Polymerase Chain Reaction*) dan teknologi *immunoassay* memainkan peran penting dalam deteksi kontaminasi di lokasi dalam waktu nyata. Dengan teknik ini, industri dapat mendeteksi adanya agen patogen dengan cepat dan mengambil langkah-langkah remedial tepat waktu.
2. Pengembangan agen dekontaminasi: Bioteknologi juga berkontribusi pada pengembangan agen dekontaminasi yang lebih efektif. Aplikasi biologi untuk menciptakan metode sterilisasi memungkinkan industri memperkenalkan pendekatan baru yang lebih efisien untuk menjaga kebersihan. Misalnya, penggunaan enzim untuk menetralkan bahan berbahaya menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam memperbaiki prosedur dekontaminasi dan meningkatkan keselamatan di fasilitas.

## **Kesimpulan Bidang Keamanan: Bahaya Biologi dalam Lingkungan Industri**

Dalam konteks industri strategis, bahaya biologi merupakan isu penting yang tidak dapat diabaikan. Bahaya ini mencakup beragam aspek, mulai dari patogen alami hingga biotoksin dan produk rekayasa hayati yang berisiko. Dalam mendefinisikan ancaman ini, penting untuk memahami perbedaan antara *biohazard* dan *bioterrorisme*, yang masing-masing memiliki implikasi dan penanganan yang berbeda. Sektor-sektor seperti pangan, farmasi, dan energi menjadi fokus utama karena risiko kecelakaan dan insiden berbahaya yang dapat mengancam kesehatan masyarakat dan lingkungan. Dalam buku ini, bahaya biologi telah dikelompokkan, dievaluasi, dan dibahas melalui kerangka penilaian risiko yang terstruktur, sementara berbagai dampak yang dapat ditimbulkan dari ancaman tersebut juga diulas secara mendetail.

Analisis risiko biologis memerlukan pemahaman mendalam tentang sumber dan jenis-jenis bahaya yang mungkin muncul di lingkungan industri. Dengan adanya kerangka penilaian berupa *Biological Risk Assessment* (BRA) yang mencakup identifikasi bahaya, penilaian kemungkinan paparan, dan penentuan tingkat risiko, perusahaan dapat lebih siap dalam menghadapi insiden biologis. Selain itu, dampak kesehatan dari bahaya biologi dapat menyebabkan penyakit akibat kerja yang signifikan, sementara dampak operasional dan ekonomi dapat menjurus kepada penarikan produk dan menurunnya kepercayaan publik. Penelitian dan studi kasus telah menunjukkan bagaimana tindakan preventif dan mitigasi dapat mengurangi risiko ini, serta menunjukkan perlunya peningkatan kesadaran dan pemenuhan regulasi dalam soal *biosafety* dan *biosecurity*.

Menghadapi tantangan bahaya biologis di industri bukan hanya menjadi tanggung jawab pihak tertentu, tetapi memerlukan kolaborasi dari semua pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, industri, dan masyarakat. Dengan menerapkan strategi yang mempertimbangkan *biosecurity* dan *biosafety*, serta inovasi dalam deteksi dan mitigasi, kita dapat melindungi pekerja, konsumen, dan lingkungan dari dampak negatif yang mungkin timbul. Keberlanjutan dalam praktik ini akan menjadi fondasi bagi keselamatan publik, kepercayaan konsumen, dan efisiensi operasional di masa depan. Maka dari itu, upaya untuk selalu memperbarui pemahaman dan sistem terhadap bahaya biologi harus terus dilakukan, agar dunia industri tidak hanya siap menghadapi risiko tetapi juga berkontribusi terhadap kesehatan masyarakat secara keseluruhan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Coker, A. and Sridhar, M. K. C. (2010). Chapter 12 controlling exposure to biological hazards. ICE Manual of Health and Safety in Construction, 137-148. <https://doi.org/10.1680/mohs.40564.0137>
- Arnold, E., & Barker, K. (2022). What past changes in Swedish policy tell us about developing third-generation research and innovation governance. In *Smart policies for societies in transition* (pp. 59–86). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781788970815.00009>
- Coker, A., & Sridhar, M. K. C. (2010). Controlling exposure to biological hazards. In *ICE manual of health and safety in construction* (pp. 137–148). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/mohs.40564.0137>
- Dwivedi, S., Mandal, M., Yadav, S., & Vipparthi, S. K. (2020). 3D CNN with localized residual connections for hyperspectral image classification. In *Communications in computer and information science* (pp. 354–363). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4018-9\\_32](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4018-9_32)
- Golkar, Z., Pace, D. G., & Bagasra, O. (2016). Utility of potent antiviral microRNAs in emerging infectious diseases. In *RNA interference*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61687>
- Groaz, E., De Clercq, E., & Herdewijn, P. (2021). Anno 2021: Which antivirals for the coming decade? In *Annual reports in medicinal chemistry* (pp. 49–107). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.armc.2021.09.004>
- Hannan, A., Habib, K. A., Shahabuddin, A. M., Haque, M. A., & Munir, M. B. (2022). Post-harvest processing, packaging and inspection of frozen shrimp: A practical guide. In *Post-harvest handling of aquatic products*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-1566-6>
- Kasangaki, W. (2025). Occupational toxicology. In *Principles of medical toxicology* (pp. 336–387). <https://doi.org/10.69613/4fe5y895>

- Leber, A. L. (2016). Risk assessment. In *Clinical microbiology procedures handbook* (pp. 15.9.1–15.9.4). ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555818814.ch15.9>
- Nazarova, E. V., & Russell, D. G. (2016). Growing and handling of *Mycobacterium tuberculosis* for macrophage infection assays. In *Methods in molecular biology* (pp. 325–331). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6581-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6581-6_22)
- Nisii, C., Grunow, R., Bråve, A., Ippolito, G., Jacob, D., Juréen, P., & Di Caro, A. (2016). Prioritization of high-consequence viruses to improve European laboratory preparedness for cross-border health threats. In *Advances in experimental medicine and biology* (pp. 123–129). Springer. [https://doi.org/10.1007/5584\\_2016\\_152](https://doi.org/10.1007/5584_2016_152)
- Pandey, A., & Teixeira, J. A. (2017). Preface. In *Current developments in biotechnology and bioengineering* (pp. xiii–xiv). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63668-3.05001-0>
- Pietrangeli, B., & Lauri, R. (2018). Biogas production plants: A methodological approach for occupational health and safety improvement. In *Advances in biofuels and bioenergy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72819>
- Santibáñez, P., Palomar, A. M., Portillo, A., Santibáñez, S., & Oteo, J. A. (2015). The role of chiggers as human pathogens. In *An overview of tropical diseases*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61978>
- Sadhra, S. S., Bray, A., & Boorman, S. (Eds.). (2022). Biological hazards. In S. S. Sadhra, A. Bray, & S. Boorman (Eds.), *Oxford handbook of occupational health* (3rd ed., pp. 117–128). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780198849803.003.0003>
- Sönmez, D., & Hocaoğlu, Ç. (2023). Psychosocial impact of COVID-19: Stigma and xenophobia. In *Psychosocial, educational, and economic impacts of COVID-19*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101527>
- Stawicki, S. P., Papadimos, T. J., Galwankar, S. C., Izurieta, R., & Firstenberg, M. S. (2021). Introductory chapter: International

health security expanded and re-defined. In *Contemporary developments and perspectives in international health security* (Vol. 1). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94394>

## BAB 14

# Industri Wisata: Pemanfaatan Biologi dalam Wisata Berkelanjutan

**Riyan Riyadlun Najih**

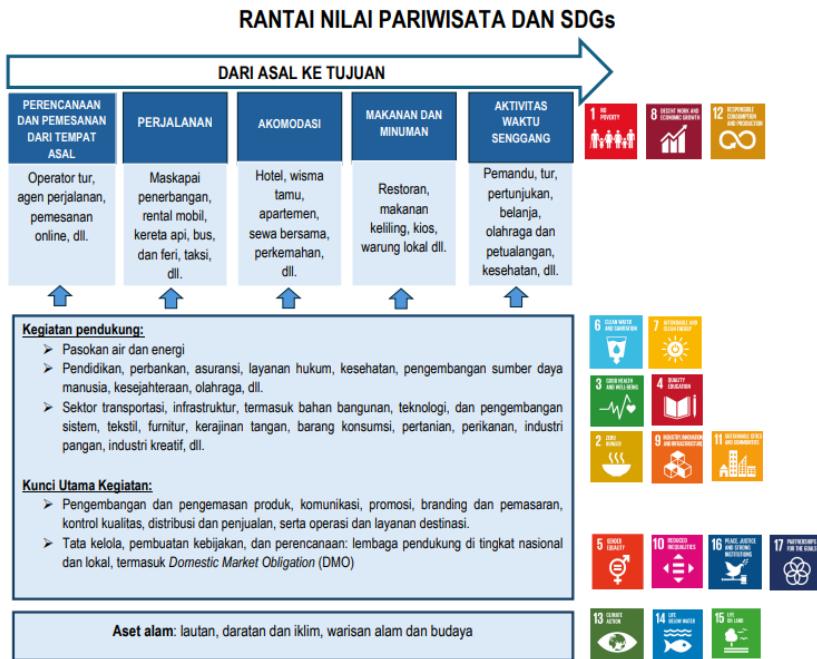
Industri pariwisata yang diintegrasikan dengan ilmu biologi mampu menjembatani kesuksesan pembangunan berkelanjutan, terutama jika mengikuti tren yang sedang berkembang terkait peningkatan kesadaran ekologi. Pergeseran preferensi menuju wisata ramah lingkungan dengan mengintegrasikan keberlanjutan biologi ke dalam praktek-praktek pariwisata dilakukan guna memahami keterkaitan antara ekologi dan kelangsungan sosial-ekonomi. Akibatnya, sektor pariwisata mampu beradaptasi terhadap tuntutan konsumen pada pilihan wisata yang lebih berkelanjutan. Bentuk industri pariwisata berkelanjutan dapat menanamkan rasa kepemilikan di antara masyarakat lokal, sehingga mendorong mereka untuk melestarikan warisan alam.

### **Pariwisata sebagai Industri mendukung SDGs**

Pemimpin-pemimpin dunia yang tergabung dalam Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) memanifestasikan setiap negara harus memiliki masa depan yang lebih baik untuk dunia. Sejarah baru dihasilkan pada 25 September 2015 berupa kesepakatan tentang Agenda Universal 2030 yang memuat 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) yang bertujuan untuk mewujudkan masa depan yang lebih baik bagi semua (Munandar *et al.*, 2019). Bidang-bidang pembangunan secara krusial ditetapkan dalam 17 SDGs. Pemangku kepentingan pemerintah dan non-pemerintah diharuskan melaksanakan kemitraan fundamental guna mencapai tujuan-tujuan SDGs.

Perkembangan pariwisata sangatlah pesat sehingga menjadi salah satu pusat kekuatan ekonomi global. Sebelum terjadinya pandemi COVID-19, *dalam World Travel & Tourism Council* (WTTC) disebutkan bahwa sumbangsih pariwisata sekitar 10,4% dari PDB dunia dan sekitar 30% dari ekspor jasa. Pariwisata menopang satu dari sepuluh pekerjaan secara global, menjadikanya sektor industri yang menempati kontributor tertinggi dalam metrik ekonomi global secara teratur. Industri pariwisata bukan hanya menghadirkan peluang ekonomi bagi setiap negara, tetapi manfaatnya juga sangat luas, mulai dari promosi pertukaran budaya hingga kesadaran lingkungan (Munasinghe *et al.*, 2020). Tentunya, pariwisata secara intrinsik mempunyai keterkaitan secara kontribusi terhadap banyak tujuan SDG. Pariwisata memperluas pengaruhnya bukan hanya meliputi perkembangan ekonomi, juga mendalamai manfaat dalam aspek konsumsi global beretika dan bertanggung jawab, kemajuan masyarakat secara inklusif, serta keberlanjutan lingkungan. Kontribusi pelaksanaan pariwisata adalah peluang, khususnya pada negara-negara berkembang yang dapat mengerakkan industri fundamental dalam melaksanakan tujuan-tujuan SDGs.

Negara-negara berkembang guna mewujudkan pembangunan berkelanjutan memiliki peluang sangat besar dalam meningkatkan pertumbuhan ekonominya yang masih terbatas. Dengan menghadirkan industri pariwisata, negara mampu menyelaraskan dengan kapasitas pariwisata dalam menciptakan lapangan kerja dan menyediakan mata pencaharian. Wisata yang berkembang akan membutuhkan sumber daya manusia dengan mengandalkan masyarakat lokal dan mengedukasinya. Hal ini dilakukan agar secara langsung terlibat dalam praktik-praktik berkelanjutan untuk melestarikan budaya dan lingkungan mereka, sekaligus mendapatkan manfaat ekonomi. Keselarasan elemen tersebut sangat penting dalam praktik pariwisata.



Sumber: ditafsirkan dari (World Tourism Organization, 2023)

**Gambar 14. 1 Rantai nilai pariwisata dan SDGs**

Menyelaraskan pariwisata dengan SDGs mengharuskan pemahaman yang komprehensif terhadap rantai nilai pariwisata dari berbagai disiplin keilmuan, guna mendukung penerapan kebijakan dan praktik pariwisata global yang adaptif terhadap perkembangan zaman. Industri pariwisata juga dituntut untuk mengadopsi berbagai inovasi, termasuk teknologi digital, yang mampu meningkatkan efisiensi operasional, memperkuat kinerja keberlanjutan, serta mendorong efisiensi konsumsi sumber daya. Pihak pengelola destinasi wisata, perhotelan, restoran, dan agen perjalanan telah mengembangkan inovasi produk dan proses yang berorientasi hijau sebagai daya tarik wisata yang selaras dengan pencapaian tujuan SDGs (Wang et al., 2024). Oleh karena itu, kinerja hijau dalam industri pariwisata perlu dicatat, diukur, dan terus ditingkatkan, disertai dengan advokasi terhadap praktik-praktik pengelolaan yang berkelanjutan.

Seiring dengan semakin eratnya keterkaitan antara pariwisata dan keberlanjutan, kolaborasi seluruh pemangku kepentingan—mulai

dari pemerintah, masyarakat lokal, sektor swasta, akademisi, hingga peneliti—menjadi sangat penting untuk membangun pemahaman yang kohesif mengenai praktik pariwisata berkelanjutan. Strategi yang adil, efektif, dan inklusif dapat terbentuk melalui penggabungan beragam perspektif para pemangku kepentingan, yang didukung oleh komitmen bersama untuk menghasilkan solusi-solusi inovatif dalam menghadapi tantangan dan risiko pengembangan pariwisata di masa mendatang. Langkah selanjutnya adalah menerapkan pendekatan multi-level, di mana seluruh pemangku kepentingan berpartisipasi aktif dalam menggerakkan perubahan menuju pariwisata berkelanjutan (Elfadel et al., 2024). Dengan pendekatan ini, pariwisata memiliki potensi besar untuk berkontribusi terhadap pencapaian SDGs melalui penciptaan peluang ekonomi, promosi kesetaraan sosial, serta penguatan pengelolaan lingkungan. Dengan memanfaatkan kekuatan industri pariwisata sekaligus mengelola kompleksitasnya, masa depan berkelanjutan yang inklusif bagi seluruh elemen masyarakat dapat diwujudkan bersama.

### **Peran Penting Biologi di Industri Pariwisata Berkelanjutan**

Pemahaman terhadap prinsip-prinsip biologi menjadi fondasi penting dalam mengelola ekosistem secara berkelanjutan. Dengan memahami peran fundamental biologi, strategi pariwisata dapat dirancang agar selaras dengan pembangunan berkelanjutan, yang ditandai oleh kawasan yang ramah lingkungan sekaligus layak secara ekonomi bagi masyarakat lokal. Keterkaitan antara biologi, pariwisata, dan pembangunan berkelanjutan terletak pada pendekatan multidisipliner yang mampu menghadirkan lanskap kajian yang multifaset, sehingga memungkinkan integrasi aspek ekologi dengan manfaat sosial dan ekonomi. Secara khusus, kolaborasi lintas disiplin menekankan pentingnya pendekatan kooperatif untuk mencapai pembangunan yang berkeadilan tanpa menguras sumber daya alam maupun merusak ekosistem (Culhane et al., 2024).

Biologi berperan sebagai dasar dalam upaya menghormati dan melestarikan keanekaragaman hayati dalam pengembangan praktik pariwisata. Penerapan ilmu biologi dalam pengelolaan ekosistem

menyediakan berbagai layanan lingkungan yang bernilai, seperti penyaringan air, udara bersih, serta penyediaan habitat bagi satwa liar. Keberadaan layanan ekosistem tersebut menjadi indikator kesehatan ekosistem, yang pada gilirannya mendukung pengembangan pariwisata berbasis alam dan petualangan (Zhang & Jahng, 2024). Sebagai contoh, pariwisata pesisir sangat bergantung pada kesehatan ekosistem laut yang bersifat dinamis. Ekosistem ini tidak hanya menarik wisatawan untuk aktivitas rekreasi dan petualangan, tetapi juga berperan penting dalam mendukung perikanan serta perekonomian lokal melalui praktik yang berkelanjutan. Oleh karena itu, manajemen pariwisata perlu memprioritaskan wawasan biologis dan ekologis di tengah berbagai tekanan, seperti degradasi ekosistem pesisir, invasi spesies asing, pencemaran, abrasi dan perubahan garis pantai, reklamasi, sedimentasi berlebih, serta pembangunan kawasan pesisir yang tidak terkendali. Tanpa pengelolaan yang tepat, tekanan-tekanan tersebut dapat berdampak negatif terhadap keanekaragaman hayati sekaligus keberlanjutan industri pariwisata. Interaksi yang kuat antara biologi dan pariwisata menjadi landasan penting dalam mendorong praktik pariwisata yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

Penerapan prinsip-prinsip biologi oleh pengelola destinasi wisata memungkinkan penilaian yang lebih akurat terhadap dampak aktivitas manusia di kawasan alami, sekaligus perancangan strategi mitigasi terhadap dampak negatif yang mungkin timbul (Prihadi et al., 2024; Zhang & Jahng, 2024). Pemahaman terhadap dinamika ekologi, termasuk interaksi antarspesies dan kebutuhan habitat, menjadi krusial karena sangat memengaruhi perumusan strategi pariwisata berkelanjutan. Hal ini semakin relevan mengingat industri pariwisata saat ini menghadapi tekanan signifikan akibat lonjakan jumlah pengunjung. Tanpa pengelolaan yang memadai, wisatawan yang belum memiliki kesadaran dan edukasi lingkungan berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan ekologis.

Hubungan antara biologi, pariwisata, dan pembangunan berkelanjutan menjadi kunci untuk memastikan bahwa pariwisata tidak hanya berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi, tetapi juga menghormati serta melestarikan ekosistem alami. Model pariwisata

yang mengintegrasikan ketiga aspek tersebut dikenal sebagai ekowisata. Praktik ekowisata yang berlandaskan prinsip-prinsip biologis memungkinkan pengelola pariwisata mengembangkan strategi yang selaras dengan tujuan-tujuan SDGs, mendorong model pariwisata yang memprioritaskan kesehatan lingkungan, serta menjembatani kesenjangan antara aktivitas pariwisata dan konservasi biologis. Pendekatan ini diharapkan mampu membentuk kerangka kerja sosio-ekologis yang lebih tangguh dan berkeadilan bagi generasi mendatang.

### **Studi Ekologi untuk Perencanaan Pengelolaan Pariwisata**

Perencanaan pariwisata yang optimal memerlukan keseimbangan antara integritas biologi (ekologi), kelayakan ekonomi, dan kesejahteraan masyarakat lokal. Keseimbangan ketiga dimensi tersebut menjadi dasar dalam mendorong praktik pariwisata berkelanjutan yang tidak hanya melindungi sumber daya alam, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap tatanan sosial dan ekonomi masyarakat setempat. Penilaian yang cermat terhadap dampak aktivitas manusia, kesesuaian habitat, serta upaya konservasi yang berbasis bukti ilmiah menjadi prasyarat penting bagi keberlanjutan ekologi dalam pariwisata. Pemahaman terhadap kebijakan dan praktik yang lebih terinformasi akan mendorong pengembangan pariwisata yang bertanggung jawab sekaligus menjaga kelestarian ekosistem.

Peningkatan kapasitas pemantauan dampak lingkungan dapat dilakukan melalui integrasi penilaian ekologi ke dalam kerangka kerja manajemen pariwisata. Selanjutnya, pengembangan indikator keberlanjutan yang disesuaikan dengan karakteristik lokasi wisata memungkinkan para pemangku kepentingan untuk mengevaluasi dampak ekologis aktivitas pariwisata secara lebih efektif (Bentley & Halim, 2024; Antamoshkina et al., 2021). Pendekatan ini menjadi dasar dalam penyusunan strategi manajemen yang memprioritaskan keberlanjutan serta adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat, sehingga pengembangan pariwisata tetap layak dan bertanggung jawab.

Penerapan studi ekologi dalam perencanaan pariwisata dapat diilustrasikan melalui berbagai kegiatan utama, seperti pemantauan kualitas lingkungan, analisis dampak lingkungan, identifikasi area

konservasi, serta pengelolaan sumber daya, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 14.1. Pemantauan kualitas lingkungan yang dilakukan secara sistematis memungkinkan pengelola kawasan pariwisata mengidentifikasi area-area kritis yang memerlukan intervensi untuk memitigasi dampak negatif. Melalui pelaksanaan studi ekologi secara berkala, para pemangku kepentingan dapat menghasilkan laporan yang bersifat aplikatif dan dapat ditindaklanjuti, sehingga mendukung penyesuaian kebijakan serta peningkatan pengelolaan sumber daya alam (Culhane et al., 2024).

**Tabel 14.1 Pelaksanaan Studi Ekologi dalam Perencanaan pariwisata Berkelanjutan**

Aspek yang Diperiksa	Metode Pelaksanaan	Output yang Diharapkan
1. <b>Pemantauan Kualitas Lingkungan</b>	Pengambilan sampel kualitas air, udara, dan tanah guna analisis di lapangan dan laboratorium	Berupa Laporan kualitas lingkungan guna perbaikan kebijakan pengelolaan sumber daya alam
2. <b>Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL)</b>	Studi flora, fauna, dan modeling dampak di area wisata	Dokumen AMDAL berupa rekomendasi mitigasi dampak pariwisata
3. <b>Identifikasi area Konservasi</b>	Identifikasi area konservasi dengan survei keanekaragaman hayati, <i>remote sensing</i> , dan pemetaan GIS	Peta zonasi konservasi kawasan yang jelas di area wisata
4. <b>Manajemen Sumber Daya Alam</b>	Pengelolaan air, tanah, dan energi melalui sistem penggunaan berkelanjutan	Rencana pengelolaan berkelanjutan untuk sumber daya alam
5. <b>Pengelolaan Kepadatan Pengunjung</b>	Perhitungan kapasitas daya dukung dan penerapan sistem	Sistem pengelolaan pengunjung yang ramah lingkungan

---

		pembatasan jumlah pengunjung
6. <b>Pendidikan dan Penyuluhan Lingkungan</b>	Program edukasi untuk wisatawan, forum group discussion (FGD), dan pendekatan berdasarkan pengetahuan lokal/adat	Program pelatihan dan workshop yang meningkatkan kesadaran lingkungan

---

### **Pariwisata Berkelanjutan: Ekowisata**

Ekowisata didefinisikan sebagai praktik pariwisata yang bertanggung jawab dengan menekankan upaya konservasi lingkungan serta mempromosikan pembangunan sosial-ekonomi yang berkelanjutan bagi masyarakat lokal. Ekowisata menyasar wisatawan yang mencari interaksi dan pengalaman mendalam dengan alam dan budaya setempat, dengan memastikan bahwa setiap bentuk interaksi tersebut memberikan kontribusi positif bagi lingkungan dan kesejahteraan masyarakat lokal (Ahmad & Balisany, 2024; Doan, 2011).

Tujuan utama ekowisata adalah menumbuhkan pemahaman dan apresiasi yang lebih mendalam terhadap ekosistem alam, sekaligus memberikan advokasi melalui kegiatan yang berdampak dan mempromosikan isu-isu lingkungan kepada para pengunjung. Prinsip-prinsip ekowisata mencakup fokus pada aspek pendidikan, keterlibatan masyarakat, tanggung jawab lingkungan, serta komitmen terhadap konservasi, yang secara keseluruhan bertujuan untuk memungkinkan pemanfaatan sumber daya alam tanpa merusak ekosistemnya (Ahmad & Balisany, 2024; Bentley & Halim, 2024; Doan, 2011; Laksmi et al., 2023).

### **Perbedaan Ekowisata dan Pariwisata Massal**

Perbedaan mendasar antara pariwisata massal dan ekowisata terletak pada dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat lokal.

Pariwisata massal umumnya cenderung mengarah pada eksplorasi sumber daya alam dalam skala besar, yang sering kali disertai dengan kurangnya penghormatan terhadap adat, nilai, dan tradisi setempat. Sebaliknya, ekowisata berorientasi pada prinsip keberlanjutan dengan menekankan upaya-upaya untuk meminimalkan dampak negatif pariwisata. Pendekatan ini dilakukan dengan memastikan bahwa kegiatan wisata bersifat ramah lingkungan, menghormati budaya lokal, serta mendukung kesejahteraan masyarakat setempat (Ahmad & Balisany, 2024; Bentley & Halim, 2024; Kumar et al., 2023; Zuhri & Rosalina, 2024). Contoh kegiatan wisata yang menerapkan prinsip keberlanjutan ditunjukkan pada Gambar 14.2.



**Gambar 14.2. Menyusuri alam dengan tetap memperhatikan etika lingkungan adalah cara menjaga kelestarian alam**

Prinsip-prinsip keberlanjutan dalam ekowisata memainkan peran penting dalam upaya pelestarian sumber daya alam sekaligus peningkatan kualitas hidup masyarakat lokal. Prinsip-prinsip ini mendorong penerapan praktik yang menyeimbangkan manfaat ekologis dengan pertumbuhan ekonomi lokal, yang tercermin dalam berbagai kegiatan seperti program restorasi habitat, konservasi satwa liar, dan pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan. Keterlibatan masyarakat lokal dalam inisiatif ekowisata tidak hanya membuka peluang ekonomi, tetapi juga mendorong partisipasi aktif dalam pengelolaan lingkungan di wilayah tempat mereka tinggal. Hal ini

berkontribusi pada tumbuhnya rasa kepemilikan, kebanggaan, dan tanggung jawab terhadap ekosistem lokal (Afifah et al., 2024; Prihadi et al., 2024; Runya et al., 2023). Perbandingan antara ekowisata dan pariwisata massal disajikan dalam Tabel 14.2.

**Tabel 14. 2. Perbedaan Antara Ekowisata dan Pariwisata Massal**

Aspek	Ekowisata	Pariwisata Massal
1. Definisi	Ekowisata menekankan perjalanan yang bertanggung jawab ke kawasan alami, mempromosikan konservasi dan pelestarian lingkungan sambil memberikan manfaat sosial-ekonomi bagi masyarakat lokal.	Pariwisata massal merujuk pada pergerakan wisatawan dalam skala besar ke destinasi populer, dengan fokus utama pada maksimalisasi keuntungan dan tingginya jumlah pengunjung.
2. Dampak Lingkungan	Dirancang untuk meminimalkan jejak ekologis dan mendorong konservasi lingkungan. Ekowisata secara aktif terlibat dalam praktik-praktek yang melindungi habitat alami dan satwa liar.	Sering menyebabkan degradasi lingkungan, termasuk polusi, kerusakan habitat, dan tekanan pada sumber daya lokal karena tingkat kunjungan yang tinggi.
3. Pengalaman Pengunjung	Menawarkan pengalaman mendalam dan kesempatan pendidikan yang meningkatkan kesadaran dan apresiasi terhadap alam dan budaya lokal.	Biasanya dicirikan oleh objek wisata yang ramai dan pengalaman yang kurang personal, di mana fokusnya sering kali adalah pada rekreasi daripada edukasi.
4. Kontribusi Ekonomi	Bertujuan untuk memberikan manfaat ekonomi langsung kepada masyarakat	Menghasilkan pendapatan yang signifikan bagi perusahaan-perusahaan besar dan internasional,

	lokal, mempekerjakan penduduk dan menggunakan sumber daya lokal, sehingga mendorong mata pencarian berkelanjutan.	dengan porsi manfaat ekonomi yang lebih kecil yang menjangkau masyarakat lokal.
5. Keterlibatan Pengunjung	Mendorong interaksi yang bermakna dengan alam dan penduduk lokal, menumbuhkan rasa pengelolaan dan tanggung jawab terhadap lingkungan.	Umumnya melibatkan lebih sedikit interaksi dengan budaya dan masyarakat setempat; pengalaman dikomersialkan, yang sering kali menyebabkan pengenceran budaya.
6. Praktik Keberlanjutan	Menekankan konsumsi berkelanjutan, upaya konservasi, dan dukungan terhadap ekonomi lokal; ekowisata sering kali mematuhi peraturan lingkungan yang ketat.	Seringkali tidak memiliki praktik berkelanjutan; sering menyebabkan penggunaan infrastruktur berlebihan dan peningkatan penipisan sumber daya.
7. Target Pengunjung	Menarik wisatawan yang peduli lingkungan yang mencari pengalaman berbasis budaya dan alam.	Menarik bagi khalayak luas yang mencari kemudahan, kenyamanan, dan pengalaman perjalanan dengan harga terjangkau.
8. Pendekatan Pemasaran	Terutama berfokus pada nilai-nilai ekologi dan budaya yang unik dari suatu destinasi, untuk menarik keinginan wisatawan akan pariwisata yang bertanggung jawab.	Sering menggunakan strategi pemasaran agresif yang menonjolkan kemewahan, kemudahan, dan atraksi populer, terkadang mengabaikan keberlanjutan.
9. Dampak Infrastruktur	Umumnya berdampak rendah pada pembangunan infrastruktur, berwisata pada kawasan konservasi yang	Sering kali mengakibatkan pembangunan infrastruktur yang luas, seperti hotel dan resor besar, yang dapat mengganggu ekosistem lokal.

		menyatuh dengan lingkungan alam.
10. Kerangka Kebijakan	Didorong dan didukung oleh pemerintah daerah, dan kelompok konservasi dengan tujuan untuk pembangunan berkelanjutan.	Kebijakan sering kali mengutamakan pertumbuhan ekonomi dibandingkan masalah lingkungan, dan berpotensi mengabaikan keberlanjutan destinasi jangka panjang.

Sumber: dikembangkan dari (Hakim, 2004; Parmawati *et al.*, 2022)

### **Kontribusi Ekowisata pada Edukasi dan Konservasi**

Ekowisata memiliki kontribusi yang signifikan terhadap upaya konservasi spesies endemik, terancam punah, maupun langka dengan menyediakan insentif ekonomi untuk menjaga satwa liar tetap berada di habitat alaminya. Minat pengunjung terhadap pengamatan satwa liar dan pengalaman berbasis alam membuka peluang bagi pembiayaan konservasi, di mana pengeluaran wisatawan tidak hanya mendukung aktivitas wisata, tetapi juga berperan dalam mempertahankan ekosistem. Melalui mekanisme ini, ekowisata menghasilkan sumber daya finansial yang dapat dialokasikan untuk berbagai inisiatif konservasi, seperti upaya pencegahan perburuan liar, perlindungan habitat, serta program pemulihian spesies terancam punah.

Pendapatan yang dihasilkan dari kegiatan ekowisata dapat dimanfaatkan untuk mendanai penelitian di lokasi wisata serta mendukung strategi pengelolaan kawasan yang bertujuan menjaga keberlanjutan ekosistem dan spesies yang rentan. Hal ini menciptakan hubungan langsung antara keterlibatan pengunjung dan pelestarian keanekaragaman hayati (Syamsi *et al.*, 2024). Selain itu, keterlibatan aktif masyarakat lokal dalam kegiatan ekowisata memberikan manfaat ekonomi yang mendorong mereka untuk memprioritaskan upaya konservasi, sekaligus memitigasi degradasi habitat dan praktik eksploitasi sumber daya yang tidak berkelanjutan.

Upaya mitigasi terhadap dampak negatif ekowisata terhadap flora dan fauna lokal memerlukan perencanaan yang matang serta penerapan praktik pengelolaan yang cermat. Salah satu strategi utama adalah

pengaturan jalur atau koridor wisata agar pergerakan pengunjung tidak mengganggu ekosistem, serta pembatasan jumlah wisatawan untuk mengurangi tekanan terhadap lingkungan (Culhane et al., 2024). Penetapan kawasan konservasi atau kawasan lindung, disertai dengan pedoman perilaku wisatawan yang jelas, menjadi elemen penting dalam meminimalkan gangguan terhadap habitat alami. Pendekatan ini bertujuan menjaga keutuhan ekosistem dengan membatasi interaksi langsung antara manusia dan satwa liar (Culhane et al., 2024). Selain itu, pelatihan bagi pemandu lokal mengenai signifikansi nilai ekologis kawasan wisata memungkinkan mereka untuk memberikan edukasi yang efektif kepada pengunjung serta mendorong perilaku wisata yang bertanggung jawab. Upaya ini berkontribusi pada peningkatan kesadaran dan apresiasi wisatawan terhadap pentingnya konservasi (Syamsi et al., 2024).

Integrasi kegiatan penelitian dan pemantauan ilmiah ke dalam praktik ekowisata merupakan langkah esensial untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Data biologis yang dihasilkan dari pemantauan menjadi dasar dalam pengembangan praktik terbaik ekowisata. Sebagai contoh, pemantauan populasi satwa liar dan kondisi habitat dapat membantu mengidentifikasi ambang batas ekologis yang berpotensi terlampaui akibat aktivitas wisata, sehingga pengelola dapat menyesuaikan tingkat akses pengunjung secara tepat. Pemanfaatan teknologi, seperti satelit dan drone, juga memungkinkan pemantauan perilaku spesies tanpa interaksi langsung dengan manusia. Pendekatan ini mendukung respons yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan dan memungkinkan penerapan strategi pengelolaan ekowisata yang dinamis dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, K. N., Yoo, R., & Suhirman, S. (2024). Fostering Environmental Stewardship Through Mangrove Ecotourism: A Study on Gili Sulat's Educational Impact. *Ijete*, 1(1), 55. <https://doi.org/10.33394/ijete.v1i1.10882>
- Ahmad, A. F., & Balisany, W. M. k. (2024). Sustainable Tourism Management and Ecotourism as a Tool to Evaluate Tourism's Contribution to the Sustainable Development Goals and Local Community. *Ots Canadian Journal*, 2(4). <https://doi.org/10.58840/838qdx22>
- Bentley, L., & Halim, H. B. (2024). Evaluating the Long-Term Impact of Sustainable Tourism Practices on Local Communities and Natural Resources in Developing Countries. *Integrated Journal for Research in Arts and Humanities*, 4(3), 136–141. <https://doi.org/10.55544/ijrah.4.3.27>
- Culhane, F., Austen, M. C., Ashley, M., Javier, J., Kuit, S. H., Hung, N. P., Tran, H. D., Praptiwi, R. A., Sainal, S., Justine, E., Wulandari, P., Broszeit, S., Jontila, J. B., Johari, S., Creencia, L., Then, A. Y., Gajardo, L. J., Maharja, C., Goh, H. C., ... Langmead, O. (2024). Assessing Impact Risk to Tropical Marine Ecosystems From Human Activities With a Southeast Asian Example. *Journal of Applied Ecology*, 61(12), 2897–2911. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14812>
- Doan, T. M. (2011). Sustainable Ecotourism in Amazonia: Evaluation of Six Sites in Southeastern Peru. *International Journal of Tourism Research*, 15(3), 261–271. <https://doi.org/10.1002/jtr.1866>
- Elfadel, M. W., Othman, R. B., Mat, N. H. B. N., Hamad, F. F., Mohadis, H. M., & Ahmed, M. (2024). The Relationship Between E-Marketing Mix Framework (4Ps) and Customer Satisfaction With Electronic Information Services: An Empirical Analysis of Jordanian University Libraries. *Information Services and Use*, 44(2), 139–164. <https://doi.org/10.3233/isu-240230>
- Hakim, L. (2004). *Dasar-dasar ekowisata*. Bayumedia.

- Kumar, S., Hasija, N., Kumar, V., & Sageena, G. (2023). Ecotourism: A Holistic Assessment of Environmental and Socioeconomic Effects Towards Sustainable Development. *Current World Environment*, 18(2), 589–607. <https://doi.org/10.12944/cwe.18.2.14>
- Laksmi, P. A. S., Putra, Y. D., Sara, I. M., Setena, I. M., Putra, I. K., & Jamaludin, M. R. (2023). Self-Reliance With Nature: Development of Subak Ecotourism as an Effort to Empower the Local Community in Siangan Village, Gianyar District, Gianyar Regency. *Bhakti Persada*, 9(2), 118–123. <https://doi.org/10.31940/bp.v9i2.118-123>
- Munandar, A. I., Darjono, A. H., & Zeffa Aprilasani, S. T. (2019). *Pembangunan Berkelanjutan: Studi Kasus Di Indonesia*. Bypass.
- Munasinghe, L. M., Gunawardhana, T., & Ariyawansa, R. G. (2020). *Sri Lankan Travel and Tourism Industry: Recent Trends and Future Outlook Towards Real Estate Development*. <https://doi.org/10.31235/osf.io/z7ge2>
- Parmawati, R., Hardyansah, R., Pangestuti, E., & Hakim, L. (2022). *Ekowisata: determinan pariwisata berkelanjutan untuk mendorong perekonomian masyarakat*. Universitas Brawijaya Press.
- Prihadi, D. J., Zhang, G., Lahbar, G. M., & Pasaribu, B. (2024). Integration of Community-Based Tourism (CBT) Index and Biophysical Assessment for Sustainable Ecotourism Mangrove: A Case Study of Karangsong, Indonesia. *Sustainability*, 16(7), 2806. <https://doi.org/10.3390/su16072806>
- Runya, R. M., Karani, N. J., Muriuki, A., Mwasaru, D. M., Kamau, A. W., Ndomasi, N., Njagi, K., Munga, C. N., & Okello, J. A. (2023). Local Perceptions, Opportunities, and Challenges of Community-Based Ecotourism in Gazi Bay, Kenya. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 21(2), 95–108. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v21i2.9>
- Syamsi, R. N., Rosyida, S. H., Allysa, T. N., Hanifah, W., Dianti, D., Sunarto, S., Nazar, I. A. B. U., Md. Naim, D., & Setyawan, A. D. W. I. (2024). Harnessing Local Wisdom to Conserve Biodiversity

- on the Southern Coast of Gunung Kidul, Indonesia. *Asian Journal of Ethnobiology*, 7(2).  
<https://doi.org/10.13057/asianjethnobiol/y070204>
- Wang, L., Zhang, Q., Ye, M.-J., Wong, P. P. W., & Gong, Y. (2024). Green Hotels Visit Intention Among Young Adults: Integrating the Familiarity, Novelty, Trust, Perceived Risk, and Theory of Planned Behaviour. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03935-0>
- World Tourism Organization. (2023). *Achieving the Sustainable Development Goals through Tourism – Toolkit of Indicators for Projects (TIPs)*. UNWTO.  
<https://doi.org/10.18111/9789284424344>
- Zhang, Y., & Jahng, S. (2024). Within the Ecology of Communication: Identifying Crucial Elements That Drive Use Intentions on Knowledge-Sharing Platforms. *Sage Open*, 14(4).  
<https://doi.org/10.1177/21582440241288735>
- Zukhri, N., & Rosalina, E. (2024). Ecotourism for Sustainability: An in-Depth Perception and Evaluation Analysis of Community-Based “Belitung Geopark” in Belitung Island. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1419(1), 12068.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1419/1/012068>
- Antamoshkina, E., Korabelnikov, I., Daeva, T., Nazarova, T., & Morozova, N. (2021). Methodological Approach to the Assessment of Ecological Tourism as a Direction of Sustainable Development of the Tourism Industry. *E3s Web of Conferences*, 296, 5006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129605006>

# BAB 15

## Perkembangan Pendidikan Biologi di Era Industri 5.0

**Ziadatur Rizqiyah**

Perkembangan dunia saat ini sangat dipengaruhi oleh revolusi teknologi digital yang semakin pesat, terutama yang dikenal sebagai Revolusi Industri 4.0 dan dilanjutkan dengan Revolusi Industri 5.0. Revolusi ini menandai perubahan fundamental dalam cara dunia memproduksi, bekerja, dan belajar, yang dipacu oleh integrasi *cyber*-fisik, *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan, serta kolaborasi manusia dan mesin secara lebih intensif. Pada konteks pendidikan, khususnya pendidikan biologi, revolusi ini menuntut penyesuaian yang cepat dan mendasar agar bisa menghasilkan sumber daya manusia yang siap dan kompeten menghadapi tantangan masa depan yang kompleks dan dinamis.

Definisi revolusi Industri 4.0 adalah gelombang perubahan industri yang ditandai dengan penggunaan teknologi digital, otomatisasi, data besar, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi produksi dan interaksi manusia dengan mesin. Hal ini meliputi interkoneksi antara mesin, sensor, dan manusia melalui internet yang memungkinkan komunikasi dan pengambilan keputusan secara *real-time*. Sementara itu, Revolusi Industri 5.0 telah mulai memasukkan unsur kolaborasi manusia dengan teknologi secara lebih humanis. Dalam konteks ini, kreativitas dan nilai-nilai manusia menjadi fokus, dengan teknologi mendukung bukan menggantikan peran manusia. Revolusi ini mengharuskan berbagai sektor, termasuk pendidikan, untuk melakukan transformasi besar agar tidak tertinggal (Smith, 2004).

Dalam konteks pendidikan biologi, transformasi kurikulum menjadi sangat penting. Kurikulum biologi harus beradaptasi terhadap kebutuhan era digital dan bio-ekonomi dengan mengintegrasikan teknologi digital dan pendekatan pembelajaran yang lebih interaktif, berbasis penelitian, serta kontekstual pada isu keberlanjutan dan lingkungan. Metode pembelajaran yang sebelumnya banyak bergantung pada hafalan dan teori, kini harus bergeser ke proses eksplorasi, eksperimen, serta pemanfaatan teknologi digital seperti simulasi komputer dan kecerdasan buatan untuk memperdalam pemahaman fenomena biologis. Namun, transformasi ini menghadapi tantangan infrastruktur yang belum merata, terutama di daerah terpencil, serta perlunya peningkatan kapasitas guru untuk mengimplementasikan metode dan teknologi baru tersebut (Ardelia & Juanengsih, 2021).

Peran sentral biologi dalam bio-ekonomi sangat penting sebagai fondasi ilmu pengetahuan yang mendukung pengembangan ekonomi berbasis sumber daya hayati secara berkelanjutan. Bio-ekonomi merupakan konsep ekonomi yang memanfaatkan sumber daya hayati (biomassa, mikroorganisme, tumbuhan, hewan) untuk menghasilkan produk dan layanan bernilai tinggi, seperti pangan, energi, obat-obatan, bahan baku industri, dan lainnya. Dalam konteks ini, biologi memberikan dasar ilmiah yang memungkinkan inovasi teknologi dan pemanfaatan optimal sumber daya alam secara efisien dan ramah lingkungan.

Pertama, pemahaman mendalam tentang organisme hidup—mulai dari mikroba hingga flora dan fauna—menjadi kunci untuk mengembangkan berbagai produk bio-ekonomi. Misalnya, mikrobiologi berperan besar dalam mengoptimalkan proses bioteknologi untuk produksi *biofuel*, enzim, serta bahan farmasi yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, penelitian dalam biologi molekuler dan genetika membuka peluang untuk meningkatkan kualitas dan hasil produk pertanian melalui teknik pemuliaan dan bioteknologi modern, yang berkontribusi pada ketahanan pangan dan diversifikasi ekonomi (Chachar *et al.*, 2025).

Digitalisasi dan teknologi informasi berperan sebagai penguat bio-ekonomi. Teknologi seperti *big data*, kecerdasan buatan (AI), dan *Internet of Things* (IoT) membantu menganalisis data biologis secara masif dan meningkatkan efisiensi produksi *bio-based*. Digitalisasi juga memungkinkan rancangan sistem produksi yang lebih presisi lewat teknologi pertanian presisi (*precision agriculture*) dan pengembangan produk berbasis bioinformatika. Hal ini berujung pada pengembangan ekonomi sirkular yang meminimalkan limbah dan memaksimalkan nilai tambah dari sumber daya hayati.

Lebih jauh, bio-ekonomi berkontribusi besar pada upaya pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), terutama dalam hal pengentasan kemiskinan, ketahanan pangan, energi bersih dan terjangkau, serta produksi yang bertanggung jawab. Pengembangan bio-ekonomi mendukung pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan sekaligus menciptakan peluang kerja baru di berbagai sektor, khususnya di daerah pedesaan. Indonesia, sebagai negara dengan keanekaragaman hayati yang kaya, memiliki potensi besar untuk mengembangkan bio-ekonomi melalui inovasi biologi yang terintegrasi dengan teknologi modern, misalnya di bidang farmasi, bioenergi, dan pangan (Kementerian PPN/Bappenas, 2024).

Secara ringkas, biologi berperan sebagai ilmu fundamental yang memungkinkan transformasi sumber daya alam menjadi produk-produk inovatif yang mendukung pembangunan ekonomi berkelanjutan. Integrasi biologi dengan teknologi digital dan pendekatan ekonomi sirkular memperkuat bio-ekonomi sebagai pilar penting masa depan ekonomi global dan nasional yang berlandaskan kelestarian lingkungan dan kesejahteraan sosial.

### **Tantangan Pendidikan Biologi Tradisional**

Pendidikan biologi tradisional menghadapi berbagai tantangan mendasar yang menghambat kemampuannya menyiapkan siswa menghadapi dunia kerja dan masyarakat modern. Pendekatan konvensional yang berfokus pada hafalan dan pengajaran satu arah sering kali tidak selaras dengan tuntutan era digital dan bio-ekonomi.

Tantangan ini mencakup kesenjangan kurikulum, kesulitan memahami konsep abstrak, serta isu literasi sains di tengah maraknya disinformasi.

Kurikulum biologi tradisional sering kali tidak responsif terhadap dinamika industri, yang menyebabkan lulusan kurang kompetitif di pasar kerja. Materi ajar yang dominan berbasis teori dasar seperti taksonomi dan anatomi tidak mencakup keterampilan praktis seperti bioteknologi, bioinformatika, atau analisis data biologis yang dibutuhkan sektor bio-ekonomi dan farmasi. Hal ini mengakibatkan rendahnya keterserapan lulusan di industri, dengan banyak perguruan tinggi gagal menyediakan tenaga kerja berbasis *skill* relevan seperti kolaborasi industri dan pemahaman teknologi presisi (Bernadetta *et al.*, 2025).

Konektivitas rendah antara institusi pendidikan dan industri memperlebar kesenjangan ini. Minimnya kolaborasi menyebabkan kurikulum tidak mencerminkan kebutuhan aktual, seperti pengembangan produk *bio-based* atau pengelolaan sumber daya hayati berkelanjutan. Di Indonesia, hal ini terlihat dari tingginya pengangguran lulusan SMA dan perguruan tinggi bidang sains, yang menuntut reformasi kurikulum berbasis kompetensi industri.

Konsep abstrak dalam biologi, seperti genetika molekuler, proses seluler, dan struktur mikroskopis, menjadi salah satu hambatan utama pendidikan biologi tradisional karena sifatnya yang tidak terlihat secara langsung. Siswa sering mengalami miskonsepsi tinggi akibat ketergantungan pada hafalan dan ceramah satu arah, tanpa visualisasi atau simulasi interaktif. Data dari berbagai studi menunjukkan tingkat pemahaman konsep biologi siswa SMA rata-rata hanya mencapai 50-60%, dengan genetika molekuler sebagai materi tersulit.

Pemahaman genetika molekuler menantang karena melibatkan proses tak kasat mata seperti replikasi DNA, transkripsi, dan translasi. Studi pada mahasiswa pendidikan biologi menemukan miskonsepsi mencapai 23,75% pada konsep DNA dan 18,75% pada gen, yang disebabkan oleh kurangnya media visual dan terminologi rumit. Penelitian lain di SMA menunjukkan hanya 45% siswa yang benar memahami dogma sentral biologi (DNA → RNA → Protein), sementara 35% keliru menganggapnya proses linier tanpa regulasi.

**Tabel 15. 1 Rangkuman data miskonsepsi umum pada genetika molekuler dari studi terpilih. Data ini diambil dari observasi 100-200 siswa per studi, menyoroti pola nasional di Indonesia.**

Konsep	Persentase Miskonsepsi	Penyebab Utama	Sumber [web]
Struktur DNA	23,75%	Kurang visualisasi heliks ganda	(Heinemann, 2020)
Definisi Gen	18,75%	Hafalan tanpa konteks fungsi	(Jannah <i>et al.</i> , 2023)
Dogma Sentral	35%	Pandangan deterministik kaku	(Sharp & Krall, 2023)
Replikasi DNA	28%	Abstrak fase-semi konservatif	(BHAGAVAN, 2002)
Mutasi Genetik	42%	Kesulitan hubungkan dengan fenotipe	(Cooper <i>et al.</i> , 2013)

Kurikulum biologi mencakup materi terlalu luas, abstrak, dan interdisipliner. Hal ini menyebabkan *overload* kognitif. Siswa sulit menghubungkan konsep seperti siklus Krebs atau meiosis tanpa analogi visual. Buku teks konvensional gagal menyajikan atribut esensial konsep dengan gambar atau bagan dikotomi, sehingga pemahaman hanya 40-50% efektif dibanding pendekatan visual. Minat belajar rendah (rata-rata skor 2,5/5) dan kurangnya interaksi memperburuk hal ini, dengan 60% siswa menganggap biologi "sulit karena abstrak".

Penelitian bibliometrik menemukan 70% studi pendidikan biologi nasional membahas kesulitan konsep abstrak sebagai masalah kronis, terutama di SMP/SMA dengan akses lab terbatas. Di kelas tanpa media digital, aktivitas belajar hanya naik 15-20% pasca-intervensi sederhana seperti diagram. Kesulitan ini menghambat literasi sains, dengan siswa gagal mengaplikasikan konsep ke isu nyata seperti rekayasa genetika atau evolusi virus. Statistik nasional menunjukkan pemahaman konsep biologi berkontribusi hanya 55% terhadap prestasi PISA sains Indonesia, jauh di bawah rata-rata OECD. Tanpa transformasi ke

VR/AR simulasi, tantangan ini berlanjut, mempersulit persiapan bio-ekonomi.

### **Fondasi Konseptual Biologi Digital**

Biologi digital adalah integrasi ilmu biologi dengan teknologi komputasi untuk menganalisis dan memahami data biologis dalam skala besar dan kompleks. Subtopik inti meliputi bioinformatika, genomika, proteomika, dan biologi sistem yang kini menjadi fondasi studi kehidupan dan pembelajaran biologi modern. Bioinformatika adalah disiplin interdisipliner yang menggabungkan biologi, ilmu komputer, matematika, dan statistika untuk menyimpan, mengolah, dan menganalisis data biologis, terutama sekuen DNA, RNA, dan protein. Bioinformatika memungkinkan pengelolaan data genomik dalam jumlah masif yang tidak mungkin ditangani secara manual, misalnya pengurutan genom manusia yang mencapai 3 miliar basa. Aplikasi bioinformatika sangat beragam, mulai dari desain obat berbasis pengetahuan genetik, analisis DNA forensik, hingga pengembangan varietas tanaman tahan penyakit melalui profiling ekspresi gen (Sardi, 2022).

Genomika adalah studi tentang genom organisme yang mencakup pemetaan, urutan, dan analisis fungsi gen dalam konteks keseluruhan genom. Dengan kemajuan teknologi sekuening, genomika memungkinkan peneliti memahami interaksi genetik kompleks dan variasi genetik yang memengaruhi kesehatan, evolusi, dan adaptasi organisme (EV, Koonin MY., 2003).

Proteomika melibatkan studi kuantitatif dan kualitatif protein yang dihasilkan oleh genom. Karena protein adalah molekul fungsional utama dalam sel, proteomika menyediakan wawasan tentang proses biologis pada tingkat molekuler dan membantu pengembangan terapi medis dan bioteknologi berbasis protein (Al-amrani *et al.*, 2021).

Biologi Sistem mengintegrasikan data dari genomika, proteomika, dan bioinformatika untuk memahami sistem biologis sebagai satu kesatuan yang dinamis. Pendekatan ini memanfaatkan pemodelan matematis dan komputasi untuk menganalisis interaksi molekuler,

jaringan metabolismik, serta respons sistemik organisme terhadap berbagai stimulus, yang krusial dalam riset penyakit dan pengembangan obat.

Dalam pembelajaran biologi modern, integrasi data besar (*big data*) menjadi sangat penting. Data biologis yang dihasilkan dari sekruensing genom dan proteom menuntut siswa dan peneliti untuk mampu mengelola dan menganalisis *dataset* besar menggunakan teknologi komputasi. Hal ini membuka peluang bagi metode pembelajaran interaktif yang melibatkan analisis data nyata, serta simulasi proses biologis menggunakan perangkat lunak bioinformatika. Dengan mengadopsi konsep digital ini, proses pembelajaran biologi tidak hanya memperkuat pemahaman teoritis, tetapi juga melatih keterampilan praktis yang relevan dengan dunia industri dan riset saat ini.

Secara kuantitatif, genom manusia terdiri dari sekitar 3 miliar pasangan basa DNA, dengan ribuan gen yang diekspresikan menjadi protein. Analisis bioinformatika menyaring informasi tersebut untuk menemukan pola genetik yang terkait dengan penyakit atau sifat tanaman unggul, yang memerlukan kemampuan komputasi tingkat tinggi dan integrasi data multi-omik (genom, proteom, metabolism) (Manzoni *et al.*, 2016).

Dengan demikian, fondasi konsep biologi digital ini menjadi pilar penting untuk mentransformasikan pendidikan biologi ke arah yang lebih relevan dengan era digital dan bio-ekonomi, serta membantu siswa memahami kompleksitas kehidupan melalui pendekatan ilmiah dan teknologi mutakhir.

### **Kurikulum Biologi Berbasis Kompetensi Digital**

Kurikulum biologi yang berbasis kompetensi digital saat ini sangat penting untuk menyiapkan generasi abad ke-21 yang mampu bersaing secara global dan adaptif terhadap perkembangan teknologi. Kurikulum ini fokus pada pengembangan keterampilan kunci seperti kolaborasi, pemikiran kritis, dan berpikir komputasional dalam konteks pembelajaran biologi. Selain itu, literasi data biologis menjadi aspek esensial yang harus ditanamkan untuk mengolah dan menginterpretasi data biologis yang semakin besar dan kompleks. Pendekatan ini

mengintegrasikan keterampilan digital seperti analisis data biologis, pemrograman bioinformatika, dan simulasi virtual dengan pengetahuan biologi inti, sehingga lulusan tidak hanya menguasai teori tetapi juga siap berkontribusi pada bio-ekonomi global. Di era ketika 90% pekerjaan masa depan membutuhkan keterampilan digital, kurikulum ini menekankan adaptabilitas melalui pembelajaran berbasis proyek yang mereplikasi tantangan industri seperti pengembangan vaksin atau pemodelan ekosistem.

Kurikulum biologi modern harus menekankan pengembangan keterampilan abad ke-21, khususnya kemampuan kolaborasi dan pemikiran kritis. Kolaborasi membantu siswa belajar bersama dalam menyelesaikan masalah biologis kompleks melalui diskusi, eksperimen kelompok, dan proyek bersama. Pemikiran kritis diperlukan agar siswa tidak hanya menghafal fakta, tetapi juga mampu menilai validitas informasi, menganalisis data, dan membuat kesimpulan berdasarkan bukti ilmiah. Dalam pelaksanaannya, pembelajaran biologi berbasis masalah dan studi kasus sangat efektif untuk mengasah kedua keterampilan tersebut (Taqiya *et al.*, 2024).

*Computational Thinking* (CT) atau berpikir komputasional adalah proses berpikir sistematis untuk memecahkan masalah yang dapat dipecahkan secara algoritmis, memanfaatkan konsep seperti dekomposisi (memecah masalah menjadi bagian kecil), abstraksi (mengidentifikasi pola dan menyederhanakan informasi), algoritma (langkah-langkah penyelesaian masalah), dan pengenalan pola (mendeteksi kesamaan dan perbedaan dalam data). Dalam pendidikan biologi, CT digunakan untuk memahami sistem biologis yang kompleks seperti siklus hidup sel, rantai makanan, dan mekanisme genetik (April *et al.*, 2024).

Data penelitian menunjukkan bahwa pengembangan CT melalui pembelajaran berbasis laboratorium virtual dan simulasi memberikan hasil positif. Misalnya, siswa menunjukkan kemampuan abstraksi sebesar 96,7%, algoritma 92%, dekomposisi 96,5%, dan pengenalan pola 96,25% setelah mengikuti pembelajaran yang terintegrasi CT. Data ini membuktikan bahwa, melalui CT, siswa mampu menyusun dan

menyelesaikan masalah biologis yang kompleks secara sistematis dan kreatif (Kusmiati, 2022).

Implementasi CT dalam pelajaran biologi juga meningkatkan hasil belajar dan pemahaman konsep, seperti menunjang siswa dalam memahami proses evolusi, mekanisme sensorik, dan interaksi lingkungan. Penggunaan teknologi pemrograman visual seperti *Snap!* dapat mengasah kemampuan berpikir komputasional siswa sekaligus pemahaman konsep biologis.

Seiring pesatnya perkembangan teknologi, data biologis kini diperoleh dalam skala besar (*big data*) dari berbagai sumber seperti *genome sequencing*, *proteomics*, dan sensor lingkungan. Literasi data biologis menjadi kompetensi penting agar siswa dapat memahami, mengelola, dan menganalisis data tersebut. Literasi ini mencakup kemampuan membaca grafik, memahami statistik, menggunakan perangkat lunak analisis data, hingga menginterpretasi hasil penelitian biologis secara kritis. Generasi mendatang menghadapi kesenjangan digital di mana hanya 40% siswa Indonesia memiliki akses infrastruktur komputasi memadai untuk bioinformatika, yang menyebabkan ketertinggalan dalam analisis *big data* biologis. Tantangan lain adalah resistensi guru tradisional terhadap CT, dengan 60% merasa kurang kompeten mengajar pemrograman, ditambah beban kurikulum nasional yang masih hafalan-sentrис (Revida & Rauf, 2019).

Kurikulum juga harus mengatasi disinformasi biologis di media sosial. Literasi data rendah membuat siswa rentan salah interpretasi data genomik, seperti klaim vaksin mRNA. Secara global, proyeksi OECD memperkirakan 85% pekerjaan 2030 belum ada saat ini, menuntut adaptasi cepat terhadap *AI-driven biology*, sementara di Indonesia pengangguran sarjana sains mencapai 12% akibat *mismatch skill*.

Dengan mengantisipasi tantangan ini melalui pelatihan guru dan investasi infrastruktur, kurikulum biologi digital memastikan generasi selanjutnya tidak hanya bertahan, tetapi memimpin inovasi bio-ekonomi global. Dalam praktik kurikulum, literasi data biologis dikembangkan melalui aktivitas praktikum data, pengolahan data eksperimen, hingga penggunaan aplikasi bioinformatika. Hal ini membantu siswa membangun kemampuan analisis ilmiah yang

dibutuhkan di dunia riset dan industri bioekonomi. Karena itu, kurikulum harus memasukkan modul pembelajaran yang memfasilitasi penguasaan alat dan teknik pengolahan data dalam konteks biologi.

Kurikulum biologi berbasis kompetensi digital menciptakan sinergi antara penguasaan ilmu biologi dengan keterampilan digital dan abad ke-21. Kolaborasi, berpikir kritis, dan berpikir komputasional membentuk pondasi intelektual siswa untuk menghadapi tantangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Sementara literasi data biologis mempersiapkan kemampuan praktis mengelola informasi biologis yang terus berkembang.

### **Pemanfaatan *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR)**

Pemanfaatan teknologi *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR) dalam pendidikan biologi telah membuka peluang besar untuk meningkatkan pemahaman siswa terhadap materi yang sulit divisualisasikan secara konvensional. Teknologi ini memungkinkan visualisasi yang lebih nyata dan interaktif dari struktur mikroskopis hingga proses makroskopis secara detail dan mendalam, sekaligus mendukung pembelajaran yang lebih efektif dan menyenangkan. Keberhasilan ini terbukti melalui berbagai studi kasus empiris di Indonesia dan global, yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam hasil belajar, motivasi, dan retensi konsep.

Salah satu tantangan utama dalam pembelajaran biologi adalah mengajarkan konsep struktur sel dan organel yang berskala mikroskopis dan abstrak. VR dan AR memberikan solusi melalui simulasi tiga dimensi (3D) interaktif yang memungkinkan siswa "memasuki" dan mengeksplorasi sel hidup serta komponen-komponennya seperti mitokondria, ribosom, dan retikulum endoplasma. Misalnya, dengan AR, siswa dapat melihat model 3D otak dan sistem saraf serta memanipulasi objek secara real-time untuk memahami hubungan spasial antar organel, yang meningkatkan pemahaman konsep secara signifikan dibanding metode konvensional.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model pembelajaran berbasis AR pada materi sistem saraf meningkatkan skor pemahaman siswa dari 62,3 menjadi 84,7 (pre-test ke post-test) dan meningkatkan

motivasi belajar. Interaksi langsung dengan objek virtual memperkuat daya ingat dan keterlibatan kognitif siswa, serta memungkinkan eksplorasi mandiri yang tidak terbatas oleh ketersediaan mikroskop dan bahan biologis (Widjaja & Solihatin, 2025).

Selain struktur mikroskopis, VR dan AR juga efektif untuk memvisualisasikan proses biologis makroskopis seperti ekosistem dan evolusi. Dengan VR, siswa dapat "berjalan" dalam ekosistem virtual, mengamati interaksi antar organisme dan perubahan lingkungan secara *real-time*, sekaligus memahami siklus rantai makanan dan dampak perubahan iklim. AR dapat menggabungkan visualisasi data lingkungan ke dalam lingkungan nyata, seperti menunjukkan distribusi spesies di taman sekolah dengan *smartphone*, sehingga pembelajaran menjadi kontekstual dan aplikatif.

Simulasi proses evolusi menggunakan VR bisa memperjelas bagaimana mutasi dan seleksi alam mempengaruhi populasi selama waktu sangat panjang, sesuatu yang sulit dipahami melalui teks statis. Siswa dapat melihat evolusi secara dinamis dalam bentuk representasi visual yang interaktif, meningkatkan pemahaman konsep evolusi dan variabilitas genetik.

Laboratorium virtual berbasis VR/AR telah dikembangkan untuk memungkinkan siswa melakukan eksperimen yang berbahaya, mahal, atau sulit dilakukan di dunia nyata. Misalnya, eksperimen terkait reaksi kimia berbahaya, pengamatan mikroskopis dengan mikroskop elektronik, atau pemahaman mekanisme kerja alat-alat biologi kompleks seperti spektrometer dan PCR (*Polymerase Chain Reaction*). Di laboratorium virtual ini, siswa dapat berinteraksi dengan alat dan bahan biologis secara aman dan realistik, meminimalkan risiko cedera dan kerusakan alat, serta menekan biaya operasional.

Selain itu, laboratorium virtual memungkinkan pengulangan eksperimen tanpa batas, sehingga siswa bisa belajar dari kesalahan dan memperdalam pemahaman. Penerapan VR pada eksperimen biologi juga sudah terbukti meningkatkan keterampilan praktikum dan hasil belajar, dengan motivasi siswa yang meningkat karena pengalaman belajar yang lebih menarik dan bebas stres (Lisa *et al.*, 2022).

Studi kasus pertama dari Universitas Islam Kebangsaan Indonesia (2024) menerapkan VR dan AR pada materi biologi tumbuhan untuk mahasiswa pertanian. Hasil eksperimen menunjukkan perbedaan signifikan antara *pre-test* dan *post-test* ( $p < 0,05$ ), dengan *N-gain* tinggi dan korelasi positif antara motivasi belajar serta hasil belajar. Mahasiswa melaporkan respons positif. VR/AR meningkatkan motivasi mahasiswa hingga 30% karena pengalaman imersif yang mereplikasi pengamatan lapangan tanpa batasan fisik.

Kasus kedua dari SMA berbasis AR untuk materi sistem saraf (model ADDIE) menghasilkan peningkatan skor rata-rata dari 62,3 menjadi 84,7, divalidasi ahli sebagai "sangat layak". Siswa kelas XI dapat memanipulasi model 3D otak secara real-time, mengurangi kesulitan abstrak dan meningkatkan pemahaman konsep anatomi saraf secara statistik signifikan (paired t-test  $p < 0,05$ ). Validasi pedagogi, desain, dan teknologi mencapai skor tinggi, membuktikan AR sebagai solusi inovatif untuk materi kompleks.

Pelatihan guru di Universitas Warmadewa (studi pengabdian masyarakat) melibatkan 83% peserta yang mahir menggunakan AR dengan *Case Based Learning* (CBL) untuk biologi. 100% guru menyatakan AR meningkatkan motivasi siswa, antusiasme, dan kemampuan proses sains, serta mendukung keterampilan abad 21 seperti pemecahan masalah kreatif (Herlian, 2025).

Studi pengembangan AR Android untuk sistem saraf di UNM meningkatkan ketuntasan belajar hingga 76%, dengan siswa mampu mengeksplorasi model 3D virtual yang informatif dan menarik. Implementasi AR di SMP (UBL, 2020) untuk biologi umum juga efektif, sementara flipbook AR (UNJA, 2022) mengurangi *learning loss* pandemi dengan transfer materi efisien, mendukung keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi.

Pemanfaatan VR dan AR dalam pembelajaran biologi merupakan inovasi signifikan yang menjembatani kesenjangan antara materi biologis yang abstrak dan kemampuan kognitif serta pengalaman nyata siswa. Visualisasi 3D interaktif memperkuat pemahaman konsep mikroskopis dan makroskopis, sementara laboratorium virtual membuka akses eksperimen yang sebelumnya sulit atau berisiko tinggi.

Implementasi teknologi ini memerlukan dukungan infrastruktur dan pelatihan bagi guru agar pemanfaatannya optimal dalam kurikulum biologi modern berorientasi digital.

Integrasi VR dan AR dalam pembelajaran bukan sekadar pengganti metode lama, melainkan pelengkap yang membuka potensi pembelajaran yang lebih efektif, kreatif, dan inklusif. Metode ini mempersiapkan siswa untuk memanfaatkan teknologi biologi di masa depan yang serba digital dan cepat berubah.

### **Integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dalam Pembelajaran Biologi**

*Artificial Intelligence* (AI) memberikan revolusi besar dalam proses pembelajaran biologi dengan memfasilitasi pembelajaran yang personal dan adaptif. AI memungkinkan sistem pembelajaran menyesuaikan materi, tingkat kesulitan, dan metode pengajaran berdasarkan kebutuhan dan kemajuan individu siswa. Melalui analisis pola belajar, AI bisa mengidentifikasi kesulitan spesifik siswa dan memberikan rekomendasi penguatan materi yang sesuai, sehingga setiap siswa belajar secara optimal sesuai gaya dan kecepatannya. Contohnya, platform pembelajaran berbasis AI di Universitas Negeri Surabaya mampu menyesuaikan materi biologi sesuai kemampuan siswa, meningkatkan pemahaman dan motivasi belajar secara signifikan.

*Adaptive Learning* juga menggunakan data besar (*big data*) pendidikan untuk memodelkan jalur belajar terbaik, memungkinkan pengalaman belajar dinamis dan lebih efektif. Sistem AI mengintervensi secara *real time* dengan memberikan *feedback* cerdas dan aktivitas yang disesuaikan, mengembangkan keterampilan berpikir kritis dan eksplorasi ilmiah. Hal ini menjadi sangat penting di masa kini di mana pemahaman konsep bioinformatika dan analisis data biologis menjadi kompetensi vital.

### **Penggunaan AI dalam Analisis Citra Mikroskopis dan Identifikasi Spesies**

AI, terutama teknik *deep learning* dan *computer vision*, sangat berguna dalam analisis citra mikroskopis yang biasanya memerlukan

keahlian tinggi dan waktu lama. Sistem berbasis AI dapat mengenali dan mengklasifikasikan struktur sel, organel, dan mikroorganisme secara otomatis dan akurat. Misalnya, AI mampu mendeteksi sel kanker atau spesies plankton dari gambar mikroskopis dengan tingkat akurasi diatas 90%. Hal ini mempercepat diagnosis dan penelitian yang sebelumnya sangat bergantung pada ahli mikroskop (Wang *et al.*, 2024).

Selain itu, AI digunakan dalam identifikasi spesies berdasarkan citra dan data lingkungan. Dalam ekologi, AI membantu memantau biodiversitas melalui pengenalan pola suara satwa, foto kamera jebak, dan data satelit. Dalam hal ini, AI memfasilitasi konservasi yang lebih efektif. Contohnya adalah penggunaan AI di kebun raya dan konservasi hutan untuk memonitor populasi satwa dan mengenali spesies yang langka secara otomatis.

Sistem penilaian otomatis berbasis AI telah dikembangkan untuk mendukung evaluasi pembelajaran biologi yang objektif, cepat, dan akurat. Sistem ini mampu menilai pekerjaan siswa mulai dari pilihan ganda, jawaban esai pendek, hingga analisis laboratorium. AI mengintegrasikan *Natural Language Processing* (NLP) untuk menilai kualitas argumen ilmiah dan kemampuan analisis data biologis siswa. Contohnya, sistem otomatis di Universitas Negeri Surabaya memungkinkan dosen melakukan evaluasi cepat pada tugas riset biologi molekuler tanpa intervensi manual yang memakan waktu (Yanty *et al.*, 2025).

Sistem penilaian otomatis juga memungkinkan pembelajaran *self-assessment* yang mendorong siswa aktif melakukan refleksi hasil belajar dan memperbaiki pemahaman secara mandiri. Hal ini mempercepat siklus belajar dan memperdalam kompetensi biologis melalui proses berulang yang adaptif.

### **Contoh Kasus Implementasi AI di Pendidikan Biologi**

1. *Adaptive Learning* di Universitas Negeri Surabaya  
Sistem AI mengkustomisasi materi biologi sesuai kebutuhan tiap mahasiswa, meningkatkan skor pemahaman sebesar 20%

dan memotivasi belajar dengan rekomendasi interaktif berbasis pola belajar siswa.

## 2. Analisis Citra Mikroskopis Sel Kanker

*Deep learning* digunakan untuk mendeteksi sel kanker secara akurat, mempercepat diagnosis dan pelatihan mahasiswa biologi medis dalam mengenali struktur mikroskopis dengan akurasi >90%.

## 3. AI dalam Identifikasi Spesies Biodiversitas

AI mengenali suara serta gambar satwa secara otomatis di kawasan konservasi, membantu pengelola lingkungan mencapai pengawasan lebih efektif dan mengurangi beban kerja manual.

## 4. Penilaian Otomatis Karya Ilmiah Mahasiswa

*Natural Language Processing* menilai esai dan laporan riset biologis dengan kecepatan tinggi dan akurasi organisasi ide, memberi *feedback* berbasis kompetensi untuk mahasiswa.

## **Bioinformatika Sebagai Keterampilan Inti**

Bioinformatika merupakan keterampilan inti yang sangat penting dalam biologi molekuler modern. Sebagai pengantar, *tools* dasar bioinformatika seperti BLAST dan konstruksi pohon filogenetik sangat krusial untuk analisis urutan DNA dan protein. Dalam praktikum, analisis urutan dilakukan untuk mengidentifikasi kemiripan dan hubungan evolusioner, sedangkan studi kasus *drug discovery* berbasis data menunjukkan aplikasi bioinformatika dalam pengembangan obat (Siddharthan *et al.*, 2016).

*Basic Local Alignment Search Tool* (BLAST) adalah alat bioinformatika yang dirancang untuk secara efisien mengidentifikasi kemiripan (homologi) antara urutan DNA atau protein baru dengan jutaan urutan yang tersimpan dalam database publik seperti NCBI *GenBank*. Secara algoritmik, BLAST memecah urutan *query* menjadi kata-kata pendek (*words*) dan mencari kemunculan kata-kata ini di *database*. Kemudian BLAST memperluas pencocokan lokal dengan cara memperpanjang *alignment* dari titik pencocokan tersebut secara cepat, tanpa harus membandingkan keseluruhan urutan secara

menyeluruh. Proses ini meminimalkan waktu pencarian sekaligus mempertahankan sensitivitas pencocokan lokal yang signifikan.

Nilai statistik dalam hasil BLAST sangat penting untuk interpretasi dan validasi fungsional urutan biologis. Dua parameter utama adalah *E-value* dan *Bit Score*. *E-value (Expectation value)* menunjukkan jumlah hit yang diharapkan secara kebetulan dengan skor penyelarasan setara atau lebih baik dalam data base yang dicari. Nilai E yang rendah menunjukkan kemiripan yang tidak mungkin terjadi secara kebetulan, sehingga hasil tersebut lebih signifikan. Sebaliknya, *Bit Score* adalah skor penyelarasan yang sudah dinormalisasi dan mencerminkan kualitas penyelarasan. Skor bit yang tinggi menunjukkan *alignment* yang lebih baik. Pemahaman kedua parameter ini krusial karena membantu peneliti menentukan seberapa valid dan relevan hasil pencarian BLAST terhadap fungsi biologis dari urutan yang dianalisis.

Analisis urutan DNA dan protein sebagai tugas praktikum biasanya melibatkan penggunaan BLAST untuk pencarian kemiripan sekuen dan *ClustalW* atau alat lain untuk *multiple sequence alignment*. Hal ini dilakukan untuk membangun pohon filogenetik yang menunjukkan hubungan kekerabatan evolusioner antar organisme atau gen. Dalam studi kasus *drug discovery* berbasis data, bioinformatika memungkinkan identifikasi target potensial dengan memanfaatkan data urutan dan struktur protein, serta prediksi interaksi obat dengan target biologis, mempercepat penemuan obat baru secara *in silico*.

Dengan pemahaman mekanisme algoritmik BLAST, serta interpretasi nilai *E-value* dan Bit Score, bioinformatika sebagai keterampilan inti dapat digunakan secara efektif untuk analisis sekuen DNA dan protein. Selain itu, bioinformatika menjadi aplikasi praktis seperti penemuan obat berbasis data yang kini menjadi tren penting dalam riset biomedis.

### **Bagaimana mekanisme penggunaan BLAST dalam praktikum?**

Alur kerja (*workflow*) analisis komprehensif untuk memprediksi fungsi biologis dan struktur sekunder/tersier dari urutan protein yang tidak dikenal dalam tugas praktikum bioinformatika meliputi beberapa

langkah utama. Pertama, urutan protein dianalisis menggunakan pencarian homologi dengan BLAST untuk menemukan protein serupa yang memiliki fungsi diketahui. Kedua, dilakukan *multiple sequence alignment* (MSA) menggunakan *tool* seperti *Clustal Omega* atau *T-Coffee* untuk mengidentifikasi pola konservasi residu di antara protein yang homolog. Ketiga, data MSA dihubungkan dengan *database domain* protein seperti *Pfam* atau *InterPro*, yang menyediakan informasi tentang domain fungsional dan residu penting dalam protein. Terakhir, prediksi struktur sekunder dan tersier protein dapat dilakukan menggunakan alat bioinformatika seperti *PSIPRED* atau *homology modeling* dengan Swiss-Model, berdasarkan informasi konservasi dan *domain* yang diperoleh.

Hasil MSA sangat penting untuk memetakan residu-residu kunci dalam protein. Dengan menganalisis konservasi residu di sepanjang *alignment*, residu yang sangat terkonservasi biasanya menunjuk pada situs aktif, situs pengikatan ligan, atau interaksi molekuler yang penting bagi fungsi protein. Data *domain* protein dari *Pfam* atau *InterPro* membantu mengaitkan motif konservasi dengan domain fungsional spesifik, sehingga memperjelas peran residu tertentu dalam aktivitas biologis protein.

Konservasi residu menjadi aspek kunci dalam prediksi struktur karena residu yang kritis bagi fungsi protein, seperti yang berada di situs aktif, cenderung terjaga secara evolusioner. Residu yang terkonservasi sering kali menjaga integritas struktur lokal maupun keseluruhan, sehingga prediksi model struktur mengandalkan informasi ini untuk memperkirakan posisi dan interaksi residu dalam struktur sekunder dan tersier. Dengan demikian, integrasi MSA dan data *domain* protein mendukung prediksi yang lebih akurat mengenai fungsi dan struktur protein yang tidak dikenal dalam bioinformatika praktikum.

## **Pemanfaatan Docking Molekuler dan Skrining Virtual Pada Keilmuan Farmasi**

Studi kasus penemuan obat berbasis data (*Data-Driven Drug Discovery*) yang menggunakan *docking* molekuler dan Skrining Virtual mengikuti langkah-langkah *in silico* penting. Pertama, identifikasi

target protein patologis dilakukan dengan memilih protein yang terkait secara langsung dengan penyakit, seperti reseptor kanker atau enzim virus, berdasarkan data biologis dan literatur. Protein target ini dianalisis untuk menentukan situs aktif atau daerah pengikatan obat potensial menggunakan alat bioinformatika dan struktural.

Kedua, perpustakaan senyawa (*compound library*) yang berisi ribuan hingga jutaan molekul kimia disaring secara virtual menggunakan *docking* molekuler. *Docking* memodelkan interaksi antara molekul senyawa dengan situs aktif protein target untuk memperkirakan afinitas ikatan, yang dinilai dari skor energi ikatan. Senyawa dengan skor terbaik dianggap sebagai kandidat potensial yang dapat menghambat aktivitas target patologis.

Tantangan utama validasi eksperimental terhadap kandidat obat hasil *screening virtual* meliputi perbedaan kondisi *in silico* dan biologis nyata. Dalam uji *in vitro* dan *in vivo*, senyawa harus dievaluasi untuk toksisitas, bioavailabilitas, metabolisme, serta efektivitas terhadap sel atau organisme. Seringkali, hasil *in silico* tidak selalu berhasil direplikasi secara biologis karena kompleksitas sistem hidup, interaksi *off-target*, dan faktor farmakokinetik. Oleh karena itu, validasi eksperimen yang komprehensif diperlukan untuk memastikan keamanan dan efektivitas kandidat obat (Seal *et al.*, 2025).

Langkah-langkah ini menyusun alur penting dalam penemuan obat yang efisien, menghemat biaya dan waktu dengan memanfaatkan data dan simulasi komputer sebelum uji laboratorium. Namun, integrasi hasil *in silico* dengan eksperimen tetap menjadi aspek kritikal dalam proses pengembangan obat baru.

Model Pembelajaran *Blended Learning* dan *Flipped Classroom* membahas desain pembelajaran yang menggabungkan tatap muka dan digital untuk meningkatkan hasil belajar biologi. Model *blended learning* memadukan interaksi langsung di kelas dengan aktivitas belajar online, sementara *flipped classroom* membalik proses pembelajaran dengan bahan materi dipelajari mandiri di rumah melalui platform digital, sehingga waktu tatap muka difokuskan pada diskusi, pemecahan masalah, dan aktivitas aplikatif.

*Massive Open Online Courses* (MOOCs) biologi berperan penting sebagai sumber bahan ajar digital yang dapat diakses luas oleh siswa jarak jauh, mendukung pembelajaran mandiri, dan memperkaya sumber belajar dengan video interaktif, kuis, dan forum diskusi. Strategi keterlibatan siswa jarak jauh meliputi penggunaan platform kolaboratif, *monitoring* kemajuan belajar, dan pemanfaatan *feedback* langsung melalui video *conference* sehingga siswa tetap aktif dan termotivasi meski tidak di kelas fisik.

Mekanisme penerapan yang tepat dimulai dari persiapan bahan ajar digital yang interaktif, pelatihan guru dalam memandu diskusi dan aktivitas tatap muka, serta mendorong siswa untuk aktif memanfaatkan materi *online* sebagai bekal pembelajaran didalam kelas. Evaluasi berkelanjutan dilakukan dengan kombinasi ujian daring dan tatap muka untuk mengukur pemahaman konsep secara komprehensif.

Studi kasus di beberapa negara berkembang seperti Indonesia, India, dan Filipina menunjukkan bahwa implementasi *blended learning* dan *flipped classroom* dalam pembelajaran biologi berhasil meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan pemahaman konsep siswa. Di Indonesia misalnya, penerapan *flipped classroom* berhasil meningkatkan kemandirian belajar dan kreativitas siswa dalam pelajaran biologi. Sementara di India, integrasi MOOCs di sekolah dengan jaringan internet terbatas dapat mengurangi kesenjangan akses pendidikan berkualitas melalui *blended learning*.

Secara garis besar, model pembelajaran ini menawarkan solusi adaptif untuk mengatasi kendala jarak dan sumber belajar dengan memanfaatkan teknologi digital, sambil tetap menjaga interaksi sosial dan pembelajaran aktif di kelas. Implementasi yang konsisten dan kontekstual sesuai kondisi lokal menjadi kunci keberhasilan model ini dalam meningkatkan nilai keilmuan biologi.

Contoh desain pembelajaran semester untuk mata pelajaran Biologi menggunakan MOOC yang mengintegrasikan pembelajaran tatap muka dan daring:

1. Minggu 1-2: Pengantar Biologi dan Orientasi MOOC
  - a. Tatap muka: Pengenalan konsep dasar biologi dan orientasi penggunaan platform MOOC.

- b. MOOC: Siswa mengakses materi pengantar melalui video, kuis interaktif, dan forum diskusi online.
- 2. Minggu 3-5: Topik Keanekaragaman Hayati
  - a. Tatap muka: Diskusi kelompok dan presentasi hasil pembelajaran mandiri.
  - b. MOOC: Siswa menyelesaikan modul tentang klasifikasi makhluk hidup dan ekosistem, termasuk kuis evaluasi.
- 3. Minggu 6-8: Struktur dan Fungsi Sel
  - a. Tatap muka: Praktikum laboratorium dan diskusi mengenai materi yang dipelajari di MOOC.
  - b. MOOC: Materi video tentang organel sel dan fungsinya, serta tugas tertulis reflektif.
- 4. Minggu 9-11: Genetika dan Hereditas
  - a. Tatap muka: Pemecahan masalah dan simulasi genetika.
  - b. MOOC: Modul tentang DNA, RNA, dan mekanisme pewarisan sifat, serta kuis interaktif.
- 5. Minggu 12-14: Ekologi dan Interaksi Makhluk Hidup
  - a. Tatap muka: Diskusi tentang dampak lingkungan dan presentasi studi kasus.
  - b. MOOC: Pembelajaran tentang siklus biogeokimia dan keberlanjutan ekosistem.
- 6. Minggu 15-16: Evaluasi Akhir dan Refleksi
  - a. Tatap muka: Ujian akhir semester dan diskusi reflektif.
  - b. MOOC: Ujian daring dan forum diskusi penutup.

Dalam desain ini, MOOC berperan menyediakan materi yang fleksibel dan dapat diakses kapan saja, sementara tatap muka difokuskan pada interaksi, diskusi, dan praktikum yang mendalam. Penilaian menggunakan kombinasi kuis *online*, tugas digital, dan evaluasi langsung untuk memastikan pemahaman siswa secara holistik.

Desain aktivitas praktikum virtual dan laboratorium daring untuk MOOC terdiri dari beberapa komponen utama yang dirancang agar siswa dapat melakukan eksperimen dan pemahaman konsep secara

interaktif meski tidak berada di laboratorium fisik. Berikut rancangan aktivitas yang efektif:

1. *Pre-Test* dan Tutorial Interaktif.

Siswa mengikuti *pre-test online* untuk mengukur pemahaman awal. Kemudian, diberikan tutorial interaktif berupa video, animasi, dan materi teks yang menjelaskan prosedur praktikum serta konsep teoritis yang mendasari.

2. Simulasi Praktikum Virtual

Praktikum menggunakan *software* simulasi laboratorium virtual (contoh: PhET, Labster). Siswa melakukan percobaan dalam lingkungan digital yang menyerupai laboratorium nyata. Simulasi ini memungkinkan manipulasi alat dan variabel eksperimen secara virtual untuk mengamati hasil.

3. *Hands-on Activity* Virtual.

Aktivitas praktik mandiri di mana siswa merancang eksperimen sederhana menggunakan alat digital, mengumpulkan data virtual, dan melakukan analisis data menggunakan *software* pendukung. Kegiatan ini menumbuhkan kemampuan berpikir kritis dan pengambilan keputusan.

4. Tugas dan Evaluasi.

Tugas berupa laporan praktikum digital yang mengintegrasikan hasil simulasi dan analisis data. *Post-test online* dan soal kuis digunakan untuk mengevaluasi pemahaman dan kemampuan aplikasi siswa terhadap materi praktikum.

5. Diskusi dan Reflective Learning

Forum diskusi online dan sesi webinar sebagai sarana komunikasi antara siswa dan instruktur, membahas hasil eksperimen dan menjawab pertanyaan. Refleksi pembelajaran menjadi bagian dari evaluasi proses.

Keunggulan desain ini adalah pembelajaran praktikum bersifat fleksibel, dapat diakses kapan saja, serta mengatasi keterbatasan alat dan bahan fisik. Laboratorium virtual memberi pengalaman belajar yang interaktif dan mendalam meski jarak jauh, serta mendorong kemandirian siswa dalam belajar sains. Desain ini sangat relevan untuk

mendukung MOOCs biologi yang ingin mengintegrasikan praktik laboratorium secara daring, memastikan siswa tetap dapat belajar eksperimen dengan kualitas pengalaman yang mendekati realitas.

Etika dan isu sosial biologi digital mengupas diskusi etika pada CRISPR-Cas9, rekayasa genetika (*Genetic Engineering*), dan *synthetic biology*, serta isu privasi data genomik dan *bio-security*. CRISPR-Cas9 sebagai teknologi *editing* gen yang revolusioner menimbulkan dilema etis terkait potensi penyalahgunaan, modifikasi genetik manusia, dan dampak ekologis. Rekayasa genetika dan *synthetic biology* juga menuntut pengawasan ketat agar tidak mengancam keanekaragaman hayati dan keseimbangan ekologis.

Privasi data genomik menjadi isu krusial di era digital karena data genetik dapat mengungkap informasi biologis dan kesehatan individu yang sangat sensitif. Perlindungan data ini penting untuk mencegah diskriminasi dan pelanggaran hak privasi. Di sisi *bio-security*, risiko kebocoran atau penyalahgunaan data dan material genetik, misalnya untuk tujuan bioterorisme, perlu diantisipasi dengan regulasi dan pengamanan yang ketat.

Pembentukan Kecerdasan Etis Biologis mencakup pendidikan dan pengembangan kesadaran etis bagi para ilmuwan, peneliti, dan masyarakat agar teknologi biologi digital digunakan secara bertanggung jawab dan berkelanjutan.

Studi kasus di Indonesia menyoroti kontroversi penggunaan teknologi CRISPR pada manusia dan tumbuhan, serta tantangan pengaturan privasi data genomik yang belum sepenuhnya matang. Kasus-kasus ini menekankan pentingnya regulasi lokal yang mengakomodasi kerangka etika internasional dan nilai-nilai budaya Indonesia, serta peningkatan literasi bioetika pada semua pemangku kepentingan.

Buku ini memberikan wawasan mendalam mengenai bagaimana etika menjadi panduan esensial dalam pengembangan dan penerapan biologi digital demi kemaslahatan umat manusia dan lingkungan di Indonesia.

*Biosecurity* dan regulasi di Indonesia membahas upaya perlindungan terhadap makhluk hidup dari ancaman penyakit dan

penyalahgunaan bahan biologis, serta kerangka regulasi yang mengaturnya. *Biosecurity* meliputi sistem dan prosedur yang bertujuan mencegah masuk dan penyebaran agen penyakit, terutama dalam sektor pertanian dan peternakan. Implementasi *biosecurity* dilakukan melalui tiga elemen utama: isolasi untuk membatasi kontak dengan sumber risiko, pengaturan lalu lintas orang, hewan, dan barang, serta sanitasi dan pengawasan yang ketat untuk memastikan kepatuhan terhadap standar operasional.

Di Indonesia, *biosecurity* diatur dalam berbagai peraturan pemerintah dan peraturan menteri, seperti Peraturan Menteri Pertanian Nomor 11 Tahun 2020 tentang Sertifikasi Nomor Kontrol Veteriner (NKV), yang mengharuskan unit usaha produk hewan memenuhi persyaratan higiene, sanitasi, dan *biosecurity* untuk menjamin keamanan pangan asal hewan. Penerapan *biosecurity* 3-zona menjadi salah satu strategi efektif dengan membagi area peternakan menjadi zona yang berbeda berdasarkan risiko kontaminasi, serta adanya ruang desinfeksi dan protokol SOP yang harus diikuti semua pihak.

Regulasi ini juga menuntut adanya pengawasan dan penegakan hukuman bagi pelanggar untuk memastikan bahwa *biosecurity* dijalankan secara konsisten. Pelaksanaan *biosecurity* tidak hanya melindungi kesehatan hewan dan kualitas produk, tetapi juga menjadi intisari dari keamanan pangan dan pencegahan penyakit zoonosis yang berpotensi menyerang manusia. Dalam konteks biologi digital dan bioteknologi, *biosecurity* juga mencakup pengaturan penggunaan teknologi rekayasa genetika dan *synthetic biology* untuk mencegah risiko kebocoran material genetik dan penyalahgunaan teknologi.

Keberhasilan *biosecurity* sangat bergantung pada koordinasi lintas sektor, edukasi kepada peternak, pengawasan ketat, serta dukungan regulasi yang adaptif dengan perkembangan teknologi. Karena itu, *biosecurity* dan regulasi di Indonesia menjadi pilar penting dalam menjaga kedaulatan kesehatan makhluk hidup dan lingkungan dari ancaman biologis yang semakin kompleks.

Sumber primer dan referensi hukum untuk bab *biosecurity* dan regulasi di Indonesia meliputi:

1. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, seperti Peraturan Menteri Pertanian Nomor 11 Tahun 2020 tentang Sertifikasi Nomor Kontrol Veteriner (NKV) yang mengatur *biosecurity* di sektor peternakan dan perlindungan produk hewan.
2. Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2009 tentang Peternakan dan Kesehatan Hewan, yang menjadi dasar hukum pelaksanaan *biosecurity* di Indonesia.
3. Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia terkait *biosafety* dan *biosecurity* serta tata cara pelaksanaan pengawasan dan sertifikasi.
4. Dokumen resmi pemerintah dan regulasi lain yang relevan dengan penanganan risiko biologis, perlindungan lingkungan, dan keamanan pangan.
5. Literatur bioetika dan bioteknologi di Indonesia yang membahas aspek hukum, etika, dan implementasi *biosecurity* dalam riset dan aplikasi biologi modern.

Referensi ini merupakan bahan hukum primer yang bersifat autoritatif dan menjadi dasar kebijakan serta implementasi *biosecurity* di Indonesia. Buku dan artikel ilmiah terkait bioetika dan *biosecurity* dapat dijadikan sumber hukum sekunder untuk pendalaman kajian dan evaluasi regulasi.

Bioetik merupakan landasan penting untuk memastikan bahwa kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi biologi dilakukan dengan cara yang etis, bertanggung jawab, dan menghormati martabat serta hak-hak individu. Bioetik membantu menavigasi dilema moral dan sosial yang muncul dari penerapan teknologi biologi modern, seperti rekayasa genetika dan biologi sintetik, dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dan nilai-nilai kemanusiaan. Oleh karena itu, pengembangan bioetik yang matang dan integratif menjadi krusial untuk mengarahkan penelitian dan aplikasi biologi digital agar bermanfaat secara berkelanjutan dan tidak merugikan masyarakat maupun ekosistem.

## ***Citizen Science* digital semakin berkembang sebagai bentuk partisipasi masyarakat dalam pemantauan lingkungan**

Ekologi dan Konservasi Berbasis Data Geospasial membahas pentingnya teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam pemetaan habitat dan analisis keanekaragaman hayati. SIG mengintegrasikan data spasial untuk memetakan distribusi habitat dan spesies, memungkinkan analisis komprehensif mengenai kondisi lingkungan serta variasi struktur habitat yang menjadi kunci keberlangsungan ekosistem. Dengan SIG, para peneliti dan konservasionis dapat mengidentifikasi area sensitif, memonitor perubahan lingkungan secara *real-time*, dan mengembangkan strategi konservasi yang lebih efektif berdasarkan informasi spasial yang akurat.

Selain itu, fenomena *Citizen Science* digital semakin berkembang sebagai bentuk partisipasi masyarakat dalam pemantauan lingkungan. Melalui aplikasi dan platform daring, warga dapat melaporkan data pengamatan flora dan fauna, perubahan ekosistem, atau peristiwa lingkungan lainnya. Data yang terkumpul dari skala lokal hingga regional ini melengkapi hasil survei ilmiah dan mempercepat respon terhadap isu lingkungan. *Citizen Science* juga meningkatkan kesadaran lingkungan sekaligus memperluas basis pengumpulan data dalam skala besar.

Penerapan SIG dan *Citizen Science* dalam ekologi dan konservasi menjadikan pendekatan berbasis data lebih akurat, transparan, dan inklusif, sehingga strategi pelestarian keanekaragaman hayati dapat dijalankan secara berkelanjutan dan adaptif terhadap dinamika lingkungan. Referensi empiris dan teknologinya diambil dari studi penggunaan SIG di pemetaan habitat dan laporan aktivitas *citizen science* dalam pemantauan lingkungan di berbagai kawasan konservasi.

Metode pemetaan habitat menggunakan citra satelit dan drone untuk Sistem Informasi Geografis (SIG) memanfaatkan kekuatan penginderaan jauh dan akurasi tinggi dari data spasial. Citra satelit multispektral seperti Sentinel-2A dengan resolusi spasial sekitar 10 meter digunakan untuk pemetaan habitat bentik dan tutupan lahan secara luas. Data ini dianalisis dengan teknik segmentasi dan klasifikasi

berbasis objek (*Object-Based Image Analysis/OBIA*) untuk membedakan tipe habitat dan kondisi lingkungan.

Drone atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) digunakan untuk pengambilan foto udara dengan resolusi sangat tinggi (hingga beberapa sentimeter per piksel), memungkinkan pemetaan habitat secara detail dan lebih akurat di area terbatas seperti hutan mangrove atau habitat perairan dangkal. Data drone dilengkapi dengan validasi lapangan (*ground truth*) untuk meningkatkan akurasi klasifikasi. Metode ini menggunakan algoritma pembelajaran mesin seperti *Support Vector Machine* (SVM) untuk mengklasifikasikan jenis habitat berdasarkan spektrum warna dan tekstur citra.

Integrasi data dari satelit dan drone dalam SIG memungkinkan pemetaan habitat yang spasial dan temporal detail, baik secara makro maupun mikro, sehingga mendukung pengambilan keputusan konservasi yang tepat. Hal ini memberikan gambaran yang komprehensif tentang perubahan habitat dan keanekaragaman hayati yang sulit diperoleh dengan metode survei konvensional.

Kedua, kampanye edukasi dan libatan komunitas lokal secara aktif melalui workshop, seminar, dan media sosial untuk meningkatkan literasi lingkungan dan keterampilan pengamatan dasar. Pendekatan ini membangun kesadaran dan motivasi masyarakat untuk berkontribusi secara rutin.

Ketiga, penyediaan *feedback* dan hasil analisis data yang transparan kepada para peserta *Citizen Science* memperkuat keterlibatan dan rasa kepemilikan atas proyek serta dampaknya. Integrasi data dari masyarakat dengan sistem pelaporan resmi atau institusi riset memperkuat validitas dan kegunaan data.

Metode ini dapat diterapkan pada berbagai kegiatan seperti pemantauan kualitas udara dan air, inventarisasi keanekaragaman hayati, atau pengawasan perubahan lingkungan sekitar, sehingga memberdayakan masyarakat untuk berperan aktif dalam pelestarian lingkungan secara praktis dan efektif.

## **Metode Penilaian Proyek Berbasis Data Untuk Mengukur dan Memecahkan Permasalahan yang Kompleks**

Penilaian (*Assessment*) di Era Digitalisasi saat ini berkembang dengan metode yang semakin inovatif dan berbasis data, salah satunya adalah Metode Penilaian Proyek Berbasis Data (*Data-driven Projects*). Metode ini menilai penguasaan siswa melalui proyek nyata yang terorganisasi, di mana proses penilaian meliputi perencanaan proyek, pengumpulan data, pengolahan data, dan presentasi hasil proyek yang diunggah ke platform digital seperti *Google Classroom*. Penilaian ini dirancang untuk memberikan gambaran autentik tentang kemampuan siswa dalam mengelola dan menerapkan pengetahuan secara praktis dan kolaboratif.

Selain itu, penggunaan e-portofolio menjadi alat penting dalam mengumpulkan bukti kinerja dan perkembangan siswa secara komprehensif sepanjang waktu. E-portofolio memungkinkan guru dan siswa untuk mendokumentasikan hasil kerja, refleksi, dan umpan balik, memberikan gambaran holistik pada proses dan hasil belajar individu. Hal ini sejalan dengan penilaian simulasi kinerja yang menggunakan *software* untuk mensimulasikan situasi dunia nyata, sehingga siswa diuji dalam konteks aplikasi keterampilan dan pengetahuan biologis secara mendalam, seperti dalam eksperimen atau pengambilan keputusan ilmiah.

Metode ini sangat efektif untuk mengukur keterampilan pemecahan masalah kompleks biologis, karena menuntut siswa untuk berpikir kritis, melakukan analisis data, serta merumuskan solusi atas masalah yang membutuhkan penerapan konsep biologis secara holistik. Penilaian berbasis digital ini tidak hanya mengukur hasil akhir tetapi juga mengapresiasi proses berpikir dan keterlibatan aktif siswa dalam pembelajaran.

Dengan integrasi teknologi digital dalam penilaian ini, guru dapat memberikan evaluasi yang lebih akurat, adaptif, dan mendukung pembelajaran yang personal dan berkelanjutan, sesuai dengan tuntutan era digital dan kebutuhan pengembangan kompetensi abad 21. Strategi implementasi dan pelatihan guru untuk penilaian digital berbasis proyek harus dimulai dengan pelatihan intensif dan berkelanjutan yang

fokus pada pemahaman asesmen digital, penggunaan teknologi, dan pengembangan soal berbasis *Higher Order Thinking Skills* (HOTS). Pelatihan ini mencakup teknik merancang proyek berbasis data, cara menggunakan platform digital untuk penilaian seperti pembuatan e-portfolio dan simulasi kinerja, serta metode pemberian umpan balik secara efektif.

Selama pelatihan, guru perlu dibekali keterampilan teknis untuk mengoperasikan perangkat lunak evaluasi digital dan strategi manajemen waktu, agar mampu mengintegrasikan penilaian proyek dalam kegiatan belajar mengajar secara optimal. Pendampingan dan kolaborasi antara guru, tenaga ahli pendidikan, dan pengembang teknologi sangat penting agar proses belajar mengajar tidak hanya teoritis tetapi juga aplikatif dan kontekstual.

Strategi lain adalah membangun komunitas praktisi guru yang saling berbagi pengalaman dan solusi terkait pelaksanaan penilaian proyek digital, sehingga dapat saling mendukung peningkatan kualitas penilaian secara kolektif. Selain itu, sekolah dan lembaga pendidikan perlu menyediakan infrastruktur teknologi yang memadai serta dukungan kebijakan yang mendorong inovasi dalam penilaian digital.

Pelatihan yang efektif akan meningkatkan kemampuan guru dalam merancang dan mengelola penilaian berbasis proyek yang autentik, memotivasi siswa, dan mengukur keterampilan pemecahan masalah kompleks secara holistik. Dengan demikian, asesmen digital berbasis proyek dapat diterapkan secara optimal dan berkelanjutan di era digitalisasi pendidikan.

Metode statistik yang umum digunakan untuk analisis hasil penilaian proyek berbasis data meliputi analisis deskriptif seperti rata-rata, median, standar deviasi untuk memahami distribusi nilai dan tren umum. Analisis inferensial seperti uji t, ANOVA, atau regresi digunakan untuk menguji perbedaan hasil antar kelompok atau pengaruh variabel independen terhadap hasil pembelajaran. Analisis korelasi juga dapat diterapkan untuk mengevaluasi hubungan antara keterampilan tertentu dengan hasil proyek. Selain itu, model multilevel atau hierarki bisa digunakan untuk mengatasi data yang bersifat

berlapis, misalnya pengaruh guru dan kelas berbeda terhadap performa siswa.

Untuk strategi pendampingan berkelanjutan komunitas belajar guru atau dosen, penting disiapkan forum kolaborasi online dan offline yang menyediakan ruang diskusi, *sharing best practices*, dan *mentoring* antar anggota komunitas. Pelatihan lanjutan dan workshop rutin berbasis kebutuhan dipadukan dengan pendampingan *peer-to-peer* secara periodik meningkatkan penerapan metode penilaian digital di kelas. *Monitoring* dan evaluasi berkala berfungsi untuk mengidentifikasi kendala dan mengembangkan solusi inovatif bersama. Penghargaan terhadap inovasi dan motivasi anggota komunitas juga menjadi pendorong kelangsungan pembelajaran profesional dan penerapan asesmen efektif.

Kombinasi metode statistik yang tepat dengan strategi pendampingan komunitas yang sistematis dan kolaboratif memungkinkan peningkatan mutu penilaian proyek berbasis data secara berkelanjutan dalam lingkungan pendidikan.

# DAFTAR PUSTAKA

- Al-Amrani, S., Al-Jabri, Z., Al-Zaabi, A., Alshekaili, J., & Al-Khabori, M. (2021). Proteomics: Concepts and applications in human medicine. *World Journal of Biological Chemistry*, 12(5), 57–70. <https://doi.org/10.4331/wjbc.v12.i5.57>
- April, V. N., P., F. L. R., & Tanjung, M. S. (2024). Studi literatur: Pentingnya berpikir komputasional dalam meningkatkan kemampuan pemecahan masalah matematis peserta didik. *Jurnal*, 2(2).
- Ardelia, N., & Juanengsih, N. (2021). Implementasi pembelajaran abad ke-21 pada mata pelajaran biologi di SMA Negeri Kota Tangerang Selatan. *Jurnal Inovasi Pembelajaran Biologi*, 2(September), 1–11.
- Bernadetta, P., Purba, I., Simarmata, J., Lakat, S. J., Widiawati, D., Wulandari, P., Ginting, E. B., Yuniwati, I., Situmorang, P. L., Mistriani, N., Ningsih, W., Kainde, S., & Sari, W. D. (2025). *Pendidikan di era digital: Tantangan bagi generasi*. Yayasan Kita Menulis.
- Bhagavan, N. V. (2002). DNA replication, repair, and mutagenesis. In N. V. Bhagavan (Ed.), *Medical biochemistry* (4th ed., pp. 545–562). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012095440-7/50026-3>
- Chachar, Z., Xue, X., Fang, J., Chen, M., Chen, W., Li, X., Ahmed, N., Chachar, S., Ali, A., Chen, Z., Fan, L., Lai, R., & Qi, Y. (2025). Genetic and molecular insights into tiller development and approaches for crop yield improvement. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1532180>
- Cooper, D. N., Krawczak, M., Polychronakos, C., Tyler-Smith, C., & Kehrer-Sawatzki, H. (2013). Where genotype is not predictive of phenotype: Towards an understanding of the molecular basis of reduced penetrance in human inherited disease. *Human Genetics*, 132(10), 1077–1130. <https://doi.org/10.1007/s00439-013-1331-2>
- Koonin, E. V., & Galperin, M. Y. (2003). *Sequence—Evolution—Function: Computational approaches in comparative genomics*.

- National Center for Biotechnology Information. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK20256/>
- Heinemann, U. (2020). Symmetry in nucleic-acid double helices. *Symmetry*.
- Herlian. (2025). Pembelajaran biologi berbantuan media augmented reality (AR) pada model case-based learning (CBL). *Abdimas Mahakam Journal*, 9(1), 72–82.
- Jannah, M. (2023). Literatur review: Telaah pembelajaran biologi materi. *Jurnal*.
- Kementerian PPN/Bappenas. (2024). *Strategi dan rencana aksi keanekaragaman hayati Indonesia (IBSAP) 2025–2045*.
- Kusmiati, N. (2022). Profil keterampilan computational thinking dalam pembelajaran perubahan lingkungan melalui laboratorium virtual. *Jurnal*, 3(2), 70–75.
- Lisa, R., Indawan, & Hirza, B. (2022). Peningkatan hasil belajar siswa SMA Negeri di Lubuklinggau menggunakan laboratorium virtual. *BIODIK: Jurnal Ilmiah Pendidikan Biologi*, 8, 162–170.
- Manzoni, C., Kia, D. A., Vandrovčová, J., Hardy, J., Wood, N. W., Lewis, P. A., & Ferrari, R. (2016). Genome, transcriptome and proteome: The rise of omics data and their integration in biomedical sciences. *Briefings in Bioinformatics*, 19(2), 286–302. <https://doi.org/10.1093/bib/bbw114>
- Revida, E., & Rauf, A. (2019). *Pemikiran guru besar USU: Pendidikan tinggi di era*.
- Sardi, A. (2022). Bioinformatics: Challenges in integrating biological information. *Jurnal Biologi Tropis*, 22, 1297–1301.
- Seal, S., Mahale, M., García-Ortegón, M., Joshi, C. K., Hosseini-Gerami, L., Beatson, A., ... Bender, A. (2025). Machine learning for toxicity prediction using chemical structures: Pillars for success in the real world. *Chemical Research in Toxicology*, 38(5), 759–807. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.5c00033>
- Sharp, K. A., & Krall, R. M. (2023). Deepening undergraduate students' thinking about central dogma through problem-based learning. *Education Sciences*.
- Siddharthan, N., Prabu, M. R., & Sivasankari, B. (2016).

- Bioinformatics in drug discovery: A review. *International Journal of Research in Applied Science*, 2(2), 13–15. <https://doi.org/10.9756/IJRAS.8099>
- Smith, G. R. (2004). Exploring the boundaries of sustainable education. In *EFS Global Media Network* (pp. 63–74). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3798-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3798-6_8)
- Taqiya, R. I., Shaumi, N. M., Fiza, N., Zenyta, A., Annisa, M., & Suryandar, A. (2024). Efektivitas model project-based learning dalam pembelajaran biologi. *Inkuiri*, 13(2), 168–173. <https://doi.org/10.20961/inkuiri.v13i2.82038>
- Wang, S., Pan, J., Zhang, X., Li, Y., Liu, W., Lin, R., Wang, X., Kang, D., Li, Z., Huang, F., Chen, L., & Chen, J. (2024). Towards next-generation diagnostic pathology: AI-empowered label-free multiphoton microscopy. *Light: Science & Applications*. <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01597-w>
- Widjaja, Y., & Solihatin, E. (2025). Perancangan model pembelajaran biologi berbasis augmented reality. *Jurnal*, 11.
- Yanty, E., Nasution, P., Nastiti, T. I., & Suryandar, A. (2025). Artifisial inteligensi (AI) terhadap dunia pendidikan: Positif atau negatif.

# PROFIL PENULIS



**Yusuf Taufik Hidayat**, S.Pi., M.Si. adalah dosen muda di Universitas Sunan Gresik. Tepatnya di Fakultas Teknologi dan Rekayasa Program Studi Teknologi Hasil Perikanan. Beliau berkecimpung di dunia pendidikan tinggi setelah menyelesaikan studi *fast-track* nya di Universitas Airlangga. Bidang ilmu yang ia geluti saat ini meninjau dari beberapa publikasi risetnya yaitu bioteknologi yang berfokus di bidang perikanan dan kelautan seperti biomolekuler, parasitologi, ekotoksikologi. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang pengelolaan limbah industri perikanan kelautan melalui eksplorasi, karakterisasi, bioremediasi dengan memanfaatkan teknologi integratif, *zero-waste processing* dalam rantai nilai industri serta pengolahan limbah berbasis masyarakat pesisir dan pulau-pulau kecil.

Email korespondensi: yusuftaufik.h@lecturer.usg.ac.id



**Dr. Eko Kusumawati**, S.Si, MP adalah Dosen di Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Samarinda. Bidang keahliannya adalah Mikrobiologi. Saat ini, aktif melakukan penelitian mengenai (1) Analisis Potensi dan Filogenetik Bakteri Pengoksidasi Sulfur dari Air Kolam Pascatambang Batubara di Samarinda, Kalimantan Timur; (2) Eksplorasi Bioaktivitas Daun

Kokang (*Lepisanthes amoena* (Hassk) Leenh.): Aktivitas Antioksidan dan Antibakteri pada *Cutibacterium acnes* secara *In Vitro*; (3) Profil Metabolit Sekunder Daun Kokang (*Lepisanthes amoena*) menggunakan LC-MS/MS dan Interaksinya terhadap Protein Target *Cutibacterium acnes* melalui Pendekatan *In Silico*; (4) Eksplorasi Bakteri Patogen pada Talas (*Colocasia esculenta*); (5) Potensi Bakteri Endofit dan Rhizosfer Talas (*Colocasia esculenta*) sebagai Agen Biokontrol terhadap Patogen Bakteri Penyebab Busuk Daun; (6) Analisis Yeast Potensial Biodegradable Plastik.

Email korespondensi: eko.kusumawati11@fmipa.unmul.ac.id



**Fatma Aulia Nadiyah**, S.Si, M.Si adalah Dosen di Universitas Sunan Gresik Bidang keahliannya meliputi mikrobiologi. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang bakteri enzimatis pada mangrove.

Email korespondensi:  
fatmaaulia.n@lecturer.usg.ac.id



**Putri Elok Septiana Dewi**, S. Si., M. Si adalah Dosen Biologi Terapan di Universitas Sunan Gresik. Bidang keahliannya meliputi fisiologi. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang potensi hayati sebagai suplemen herbal pencegahan sindrom metabolik.

Email korespondensi:  
putrieloek.sd@lecturer.usg.ac.id



**Karimatul Himmah** adalah Dosen di Universitas Sunan Gresik. Bidang keahliannya meliputi bioteknologi, mikrobiologi dan biologi molekuler. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang potensi apel dalam menjaga kesehatan mulut dan jantung.

Email korespondensi: [karimatul.h@lecture.usg.ac.id](mailto:karimatul.h@lecture.usg.ac.id)



**Friska Indrian**, S.Pi., M.Si. adalah salah satu dosen Program Studi Teknologi Hasil Perikanan, Fakultas Teknologi dan Rekayasa, Universitas Sunan Gresik. Bidang keahliannya meliputi Kimia dan Nutrisi pangan. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang pengelolaan sumber daya perikanan yang mencakup eksplorasi, potensi pemanfaatan, pengembangan, pengolahan, serta pengelolaan sumber daya perikanan

secara berkelanjutan.

Email korespondensi: [friska.i@lecturer.usg.id](mailto:friska.i@lecturer.usg.id)



**Refer Iqbal Tawakkal**, S.Si., M.Si adalah Dosen di Universitas Sunan Gresik. Bidang keahliannya meliputi Biodiversitas, Ekologi, dan Biologi Laut. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang Ekologi Mangrove, Biodiversitas, dan Manajemen Konservasi.

Email korespondensi: [referiqbal.t@lecturer.usg.ac.id](mailto:referiqbal.t@lecturer.usg.ac.id)



**Naufal Hafidh Mahdi Sujarwo Putra**, S.Pd., M.Si. adalah Dosen di UIN Sultan Aji Muhammad Idris Samarinda. Bidang keahliannya meliputi etnobotani, ekologi tumbuhan riparian, dan kualitas perairan, khususnya di wilayah pasca tambang. Saat ini, ia aktif menulis dan melakukan pengajaran di Program Studi Tadris Biologi.

Email korespondensi: [naufal.hafidh@uinsi.ac.id](mailto:naufal.hafidh@uinsi.ac.id)



**Nur Islakhun Nisa** adalah Dosen di Program Studi Biologi Terapan, Fakultas Kesehatan, Sains dan Psikologi di Universitas Sunan Gresik. Bidang keahliannya meliputi Ekologi Perairan, Toksikologi Lingkungan, dan Konservasi Biota Akuatik. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang Peran Bioindikator terhadap kualitas perairan di ekosistem perairan Mangrove.

Email korespondensi: [nurislakhun.n@lecturer.usg.ac.id](mailto:nurislakhun.n@lecturer.usg.ac.id)



**Achmad Dadang Burhanuddin** S.Si, M.Si adalah Dosen Biologi Terapan di Universitas Sunan Gresik Bidang keahliannya meliputi ekologi tumbuhan. Saat ini, aktif melakukan penelitian tentang ekologi tumbuhan mangrove dan management pengelolaan sampah di lingkungan

Email korespondensi: [a.dadang@lecturer.usg.ac.id](mailto:a.dadang@lecturer.usg.ac.id)



**Titanio Auditya Pribadi**, S.Pd., M.Si adalah Staf Asisten Peneliti, Pusat Studi Pariwisata, Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat di Universitas Brawijaya. Bidang keahliannya meliputi Ecotourism, Pertanian Berkelanjutan dan Ekologi. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang Kajian Eksplorasi Dokumen Ilmiah Geopark Kabupaten Pasuruan, Pengembangan Wellnes Tourism

di Pulau Kangean, Kabupaten Sumenep, dan Kajian Strategi Wisata Agrotourism berbasis Gastronomi dan Landscape di Agroforestry Kopi Kecamatan Kalibaru, Kabupaten Banyuwangi. selain itu, juga melakukan pengabdian masyarakat berbasis Peningkatan Kreatifitas dan Pengelolaan Branding Pembatik Muda di Desa Adat Kemiren Kabupaten Banyuwangi. Penulis juga aktif dalam mengelola jurnal Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat diantaranya: Journal Coffee and Sustainability, Journal of Environmental Engineering and Sustainable Technology, Research Journal of Life Science, dan International Journal Social and Local Economic Governance.

Email korespondensi: titanio@ub.ac.id



**Dita Tri Mulyani**, M.Pd. adalah dosen di Program Studi Pendidikan Biologi di Universitas Samawa. Penulis lahir tanggal 12 Oktober 1998 di desa Plampang kabupaten Sumbawa. Penulis menyelesaikan studi di Jurusan Pendidikan Biologi Universitas Muhammadiyah Malang pada tahun 2021, dan melanjutkan studi S2 di Universitas Negeri Malang Jurusan Pendidikan Biologi lulus pada tahun 2024. Penulis berupaya

mendedikasikan karirnya untuk mengeksplorasi bagaimana teknologi dan metode pembelajaran baru dapat membuat pendidikan lebih relevan dan menyenangkan bagi peserta didik serta aktif dalam melakukan penelitian di bidang biologi seperti pada bidang Struktur Perkembangan Tumbuhan, Ekologi, dan Bioteknologi.

Email korespondensi: [dita@samawa-university.ac.id](mailto:dita@samawa-university.ac.id).



**Achmad Sakhowi Al Awwarij, S.K.M., M.KKK** adalah Kepala Program Studi sekaligus Dosen di Program Studi S1 Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Universitas Sunan Gresik. Bidang keahliannya meliputi Managemen Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja dan higiene industri. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang Analisis Managemen Risiko di sektor industri dan pekerja informal.

Email korespondensi: [as.alawwarij@lecturer.usg.ac.id](mailto:as.alawwarij@lecturer.usg.ac.id)



**Riyadlun Najih, M.Si** adalah Dosen di Universitas Islam Negeri Sultan Aji Muhammad Idris Samarinda. Memiliki bidang keahlian meliputi ekowisata, etnobotani, dan pengelolaan kawasan berbasis konservasi. Saat ini, aktif melakukan penelitian dengan mengintegrasikan ekologi, sosial - budaya, dan kesejahteraan masyarakat lokal terkait pengelolaan kawasan di pedesaan di Kalimantan Timur.

Email korespondensi: [r.najih@uinsi.ac.id](mailto:r.najih@uinsi.ac.id)



**Ziadatur Rizqiyah, S.Si., M.Si** adalah Dosen di Universitas Sunan Gresik Bidang keahliannya meliputi konservasi, pemanfaatan mangrove berkelanjutan dan pengamat implementasi *citizen science* dalam kegiatan lingkungan. Saat ini, ia aktif melakukan penelitian tentang *citizen science* dalam konservasi mangrove berkelanjutan.

Email korespondensi:  
Qiah07@gmail.com

# PEMANFAATAN ILMU BIOLOGI SEKTOR INDUSTRI STRATEGIS

- BAB 1** : Sejarah Perkembangan Ilmu Biologi pada Sektor Industri  
Yusuf Taufik Hidayat, S.Pi., M.Si
- BAB 2** : Industri Manufaktur I: Pemanfaatan Bakteri sebagai Kunci Industri  
Dr. Eko Kusumawati, S.Si., MP
- BAB 3** : Industri Manufaktur II: Pemanfaatan fungi sebagai fermentasi produk  
Fatma Aulia Nadiyah, S.Si., M.Si
- BAB 4** : Industri Kesehatan I: Peran rekayasa genetika dalam pengobatan  
Putri Eloq Septiana Dewi, S. Si., M. Si
- BAB 5** : Industri Kesehatan II: Vaksin dalam Keilmuan Biologi  
Karimatus Himmah, S.Si., M.Si
- BAB 6** : Industri Pangan: Bioteknologi untuk Ketahanan dan Peningkatan Mutu Bahan Pangan  
Friska Indrian, S.Pi., M.Si
- BAB 7** : Industri Energi : Pengembangan Energi Biofuel dan Energi dari Keanekaragaman hayati  
Refer Iqbal Tawakkal, S.Si., M.Si
- BAB 8** : Industri Lingkungan I: Bioremediasi dalam Industri  
Naufal Hafidh Mahdi Sujarwo Putra, S.Pd., M.Si
- BAB 9** : Industri Lingkungan II : Analisis Dampak Lingkungan dalam Biologi  
Nur Islakhun Nisa', S.Pd., M.Sc
- BAB 10** : Industri Material : Pemanfaatan Biomaterial  
Achmad Dadang Burhanuddin, S.Si., M.Si
- BAB 11** : Industri Pertanian: Perlindungan Tanaman dalam Biologi  
Titano Auditya Pribadi, S.Pd., M.Si
- BAB 12** : Industri Digital: Pemanfaatan biokomputasi dan Bioinformatika sebagai Analisis Industri  
Dita Tri Mulyani, M.Pd
- BAB 13** : Bidang Keamanan : Bahaya Biologi dalam Lingkungan Industri  
Achmad Sakhowi Al Awwarij, S.K.M., M.KKK
- BAB 14** : Industri Wisata: Pemanfaatan Biologi dalam Wisata  
Riyana Riyadlun Najih, M.Si
- BAB 15** : Industri digital: biologi sebagai pendidikan digital  
Ziadatur Rizqiyah, S.Si., M.Si



**FUTURE SCIENCE  
IKAPI No. 348/JTI/2022**

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

**ISBN 978-621-8438-18-7**