

KIMIA RAMAH LINGKUNGAN

I Wayan Tanjung Aryasa

Khoirul Ngibad

Isran Asnawi

Hijratur Rahmi

Kasta Gurning

Aliyah Fahmi

Sinardi

Rismul Trianto Salawali

Bambang Suhartawan

Andar Kusnanto

Fitri Junianti

Eka Cahya Muliawati



GETPRESS INDONESIA

KIMIA RAMAH LINGKUNGAN

Penulis :

I Wayan Tanjung Aryasa
Khoirul Ngibad
Isran Asnawi
Hijratur Rahmi
Kasta Gurning
Aliyah Fahmi
Sinardi
Rismul Trianto Salawali
Bambang Suhartawan
Andar Kusnanto
Fitri Junianti
Eka Cahya Muliawati

ISBN :

Editor : Mila Sari, M.Si.

Penyunting: Yuliatr Novita, M.Hum.

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

Penerbit: CVGETPRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi:

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tengah, Padang, Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, September 2023

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

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan judul Kimia Ramah Lingkungan dapat diselesaikan dengan kerjasama tim penulis. Kimia Ramah Lingkungan merupakan buku yang memberikan pemahaman mengenai cara mendesain produk kimia yang ramah lingkungan. Buku ini berisikan bahasan mengenai pengertian *green chemistry*, prinsip *green chemistry*, limbah (produksi, problem, dan pencegahan), katalis dan *green chemistry*, pelarut organik yang *green chemistry*, sumber daya dapat diperbarui, rancangan proses kimia berbasis *green chemistry*, sumber-sumber energi alternatif, pengenalan sistem manajemen lingkungan (*environmental management system*), nanoteknologi, biodegradasi, dan polimer nanomaterial pada tekstil antibakteri sebagai material ramah lingkungan.

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

Padang, September 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	viii
BAB 1 PENGERTIAN <i>GREEN CHEMISTRY</i>	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Sejarah <i>Green Chemistry</i>	2
1.3 Definisi <i>Green Chemistry</i>	2
1.4 Tren dari <i>Green Chemistry</i>	3
1.5 Prinsip Dasar <i>Green Chemistry</i>	4
1.6 <i>Green Analytical Chemistry</i>	6
1.7 Keuntungan <i>Green Chemistry</i>	8
1.7.1 Keuntungan Bidang Kesehatan	8
1.7.2 Keuntungan Bidang Lingkungan	8
1.7.3 Ekonomi	8
1.8 Kerugian <i>Green Chemistry</i>	8
DAFTAR PUSTAKA	10
BAB 2 PRINSIP <i>GREEN CHEMISTRY</i>	11
2.1 Pendahuluan	11
2.2 Dua Belas Prinsip <i>Green Chemistry</i>	13
2.2.1 <i>Prevent Waste</i>	14
2.2.2 Atom Economy	15
2.2.3 <i>Less Hazardous Synthesis</i>	16
2.2.4 <i>Designing Safer Chemicals</i>	17
2.2.5 <i>Safer Solvents and Auxiliaries</i>	18
2.2.6 <i>Design for Energy Efficiency</i>	19
2.2.7 <i>Use of Renewable Feedstocks</i>	19
2.2.8 <i>Reduce Derivatives</i>	20
2.2.9 <i>Catalysis</i>	21
2.2.10 <i>Design for Degradation</i>	22
2.2.11 Real-time Analysis for Pollution Prevention	23
2.2.12 <i>Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention</i>	24
DAFTAR PUSTAKA	26
BAB 3 LIMBAH (<i>PRODUKSI, PROBLEM, DAN PENCEGAHAN</i>)	27
3.1 Pengertian Limbah	27
3.2 Sumber, Jenis, dan Karakteristik Limbah	28
3.2.1 Jenis Limbah Berdasarkan Sumbernya	29
3.2.2 Jenis Limbah Berdasarkan Wujudnya	31
3.2.3 Jenis Limbah Berdasarkan Senyawa	32
3.2.4 Jenis Limbah Berdasarkan Tingkat Bahaya	35
3.3 Permasalahan Limbah	36

3.4 Solusi Permasalahan Limbah.....	38
3.4.1 Pengelolaan Limbah Melalui Kebijakan Pemerintah.....	38
3.4.2 Edukasi dan Sosialisasi.....	40
3.4.3 Penerapan Konsep 5R oleh Individu, Masyarakat, dan Industri.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	44
BAB 4 KATALIS DAN <i>GREEN CHEMISTRY</i>.....	47
4.1 Pendahuluan	47
4.2 Katalis	48
4.2.1 Konsep Katalis.....	48
4.2.2 Konsep Katalisis	50
4.2.3 Jenis-Jenis Reaksi Katalitik	51
4.3 <i>Green Chemistry</i>	53
4.3.1 Prinsip <i>Green Chemistry</i>	55
4.2.2 Faktor Lingkungan, Utilisasi Atom dan Peran Katalisis	58
DAFTAR PUSTAKA.....	62
BAB 5 PELARUT ORGANIK YANG <i>GREEN CHEMISTRY</i>.....	63
5.1 Pendahuluan	63
5.2 Pelarut Organik.....	64
5.2.1 Gliserol.....	67
5.2.2 Dimetil Karbonat.....	68
5.2.3 Superkritis CO ₂	70
5.3 Aplikasi Pelarut Organik <i>Green Chemistry</i>	71
5.2.3 Aplikasi Pelarut Gliserol dan Derivatnya	71
5.3.2 Aplikasi Pelarut Dimetil Karbonat dan Derivatnya	74
5.3.3 Aplikasi Pelarut Superkritis CO ₂	76
DAFTAR PUSTAKA.....	79
BAB 6 SUMBER DAYA DAPAT DIPERBARUI	83
6.1 Pendahuluan	83
6.2 Ruang Lingkup SDA	85
6.3 Apa Saja SDA yang Dapat Diperbarui.....	87
6.4 Hubungan SDA yang Dapat Diperbarui dengan Ekonomi Manusia	95
DAFTAR PUSTAKA.....	98
BAB 7 RANCANGAN PROSES KIMIA BERBASIS <i>GREEN CHEMISTRY</i>.....	101
7.1 Pendahuluan	101
7.2 Signifikansi Rancangan Proses Kimia Berbasis <i>Green Chemistry</i>	103
7.2.1 Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah	104
7.2.2 Produksi Plastik <i>Biodegradable</i>	107
7.2.3 Proses Pemurnian Air dengan Fotokatalisis	110
7.3 Kesimpulan.....	113
DAFTAR PUSTAKA.....	114
BAB 8 SUMBER-SUMBER ENERGI ALTERNATIF	117
8.1 Pendahuluan	117
8.2 Sumber Daya Energi dan Kebijakan EBT	118
8.3 Kondisi Energi Dunia Saat Ini.....	121

8.4 Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT).....	122
8.4.1 Energi Angin	123
8.4.2 Energi Surya.....	125
8.4.3 Energi Air	127
8.4.4 Energi Biomassa.....	128
8.4.5 Energi Biofuel.....	129
8.4.6 Energi Laut	134
8.4.7 Energi Panas Bumi	136
DAFTAR PUSTAKA.....	138
BAB 9 PENGENALAN SISTEM MANAJEMEN LINGKUNGAN (ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEM)	141
9.1 Pendahuluan	141
9.2 Manfaat Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan (ISO 14001).....	142
9.2.1 Perlindungan Lingkungan.....	142
9.2.2 Keuntungan Ekonomi.....	142
9.2.3 Peningkatan Image Perusahaan.....	142
9.2.4 Terjalinnnya Hubungan Baik.....	143
9.2.5 Penurunan Kerusakan Lingkungan	143
9.3 Instrumen Sistem Manajemen Lingkungan (ISO 14001).....	143
9.3.1 Kajian Lingkungan Hidup Strategis (KLHS).....	143
9.3.2 Tata Ruang.....	144
9.3.3 Baku Mutu Lingkungan	145
9.3.4 Kriteria Baku Kerusakan Lingkungan Hidup	145
9.3.5 Amdal.....	146
9.3.6 UKL-UPL.....	146
9.3.7 Perizinan.....	147
9.3.8 Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup	147
9.3.9 Peraturan Perundang-Undangan Berbasis Lingkungan Hidup.....	148
9.3.10 Anggaran Berbasis Lingkungan Hidup.....	148
9.3.11 Analisis Risiko Lingkungan Hidup.....	148
9.3.12 Audit Lingkungan Hidup.....	148
9.3.13 Instrumen Lain Sesuai Kebutuhan dan/atau Perkembangan Ilmu Pengetahuan.....	149
9.4 Komponen Sistem Manajemen Lingkungan	150
9.5 Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan	152
9.5.1 Fase 1 (Kebijakan Lingkungan)	152
9.5.2 Fase 2 (Perencanaan).....	152
9.5.3 Fase 3 (Implementasi dan Operasi)	153
9.5.4 Fase 4 (Pemeriksaan dan Tindakan Perbaikan)	155
9.5.5 Fase 5 (Kajian Manajemen)	155
9.6 Simpulan.....	156
DAFTAR PUSTAKA.....	157

BAB 10 NANOTEKNOLOGI	159
10.1 Pendahuluan	159
10.2 Nanoteknologi dan Perkembangan nya	163
10.2.1 Nano Komposit.....	163
10.2.2 Nano Kristal.....	164
10.2.3 Nano Partikel	165
10.2.4 Bahan Nano Struktur	166
10.2.5 Nanotubes	166
10.2.6 Nano katalis.....	166
10.2.7 Nano Filter	167
10.3 Hubungan Alam dengan Nanoteknologi	167
10.3.1 Proses Manipulasi Nitrogen oleh Bakteri Pada Tanaman.....	167
10.3.2 Penyimpanan Data Nano	168
10.3.3 Komputer DNA.....	168
10.3.4 Mesin yang Mandiri.....	170
10.4 Penutup	171
DAFTAR PUSTAKA.....	173
BAB 11 BIODEGRADASI	175
11.1 Pengertian	175
11.2 Mekanisme Biodegradasi	176
11.3 Faktor Biodegradasi.....	177
11.4 Aplikasi Biodegradasi.....	179
11.5 Biodegradasi Sampah Organik.....	183
DAFTAR PUSTAKA.....	185
BAB 12 POLIMER NANOMATERIAL PADA TEKSTIL	
ANTIBAKTERI SEBAGAI MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN	187
12.1 Pendahuluan	187
12.2 Klasifikasi Serat Tekstil.....	188
12.3 Proses Persiapan	190
12.4 Dampak Bagi Lingkungan.....	191
12.5 Pewarnaan yang Bertujuan Antibakteri	191
12.5.1 Tujuan Pembuatan Tekstil Antibakteri	192
12.5.2 Persyaratan Material Antibakteri.....	193
12.5.3 Metode Atau Teknik Aplikasi.....	193
12.5.4 Kimia dan Mode Aksi Agen Antibakteri Saat Ini	194
12.6 Penggunaan Nanomaterial pada Kebutuhan Tekstil	194
12.7 Implikasi.....	199
12.8 Ruang Lingkup Masa Depan	200
DAFTAR PUSTAKA.....	201
BIODATA PENULIS.....	203

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkuman dua belas prinsip Green Chemistry	15
Gambar 3.1 Klasifikasi jenis limbah	31
Gambar 3.2 (a) Jenis limbah padat perkotaan dan pemukiman; (b) limbah pertanian	33
Gambar 3.3 Struktur Kimia Senyawa Organik	35
Gambar 3.4 Jenis-jenis Plastik	37
Gambar 4.1 Perbandingan Energi Aktivasi Menggunakan dan Tanpa Menggunakan Katalis	51
Gambar 4.2 Tahapan Dasar Siklus Reaksi Katalitik	61
Gambar 4.3 Perbandingan Profil Reaksi Menggunakan Katalis dan Tidak Menggunakan Katalis	62
Gambar 4.4 Prinsip Dasar Green Chemistry	57
Gambar 4.5 Skema Hidrasi Sikloheksen Menjadi Sikloheksanol.....	57
Gambar 4.6 Efisiensi Atom Kondisi Stoikiometrik Pada Reaksi Oksidasi Alkohol	61
Gambar 5.1. Struktur Molekul Gliserol dan Beberapa Derivatnya	69
Gambar 5.2. Senyawa Organik Karbonat dan Derivatnya	71
Gambar 5.3. Penambahan Amina Aromatic Aza-Michael Tanpa Katalis dengan Pelarut Gliserol	74
Gambar 5.4. Reaksi Kondensasi Antara Benzaldehida (1 mmol), Dimedone (1 mmol) dan Malononitril (1 mmol) dengan Pelarut Gliserol Tanpa Katalis	74
Gambar 5.5. Reaksi Pembukaan Cincin Stirena Oksida Oleh p- Anisidin	76
Gambar 5.6 Transesterifikasi Trigliserida dengan Dialkil Karbonat.....	77
Gambar 5.7 Diagram Skematis Sistem Ekstraksi Kafein Dengan Menggunakan Pelarut Co ₂ Superkritis.....	79
Gambar 5.8 Reaksi Hidrogenasi Isophorone Menjadi TMCH dengan Pelarut scCO ₂ dan Katalis Pde.....	80
Gambar 6.1 Landscape Danau Toba Sumatera Utara	85
Gambar 6.2 Energi Matahari.....	90
Gambar 6.3 Energi Listrik Tenaga Angin	90
Gambar 6.4 Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	91
Gambar 6.5 Tanah	92
Gambar 6.6 Sayuran Organik.....	93
Gambar 6.7 Ternak Ayam	93
Gambar 6.8 Ternak Udang Air Tawar	94
Gambar 6.10 Pembangkit Listrik Dari Pasang Surut Air.....	95
Gambar 6.11 Energi Biomassa.....	95
Gambar 6.12 Energi Geothermal	96
Gambar 6.13 Nuklir	97
Gambar 7. 1 <i>Green Chemistry Principles</i>	104

Gambar 7. 2 Ilustrasi Proses Hydrotreating	107
Gambar 7. 3 Ilustrasi Proses Pembuatan Plastik Biodegradable	110
Gambar 7. 4 Ilustrasi Proses Fotolisis	114
Gambar 8.1 Kebijakan Energi Nasional (KEN) di Indonesia tahun 2017.	122
Gambar 8.2 PLTB Jeneponto, Sulawesi Selatan	125
Gambar 8.3 Proses Tenaga Surya Menjadi Energi Listrik	128
Gambar 8.4 Rantai Konversi Biomassa	131
Gambar 9.1 Konsep Dasar Penyusuna KLHS	146
Gambar 9.2 Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021	147
Gambar 9.3 Langkah-langkah Penyusunan AMDAL	148
Gambar 9.4 Proses Penyusunan UKL-UPL	149
Gambar 9.5 Tahapan Audit Lingkungan Hidup	152
Gambar 9.6 Siklus PDCA dalam Sistem Manajemen Lingkungan	153
Gambar 10.1 Model Atom Thompson	162
Gambar 10.2 Molekul DNA	164
Gambar 10.3 Nano Komposit	166
Gambar 10.4 Nanokristal	167
Gambar 10.5 Ilustrasi Robot Nano yang Bekerja dengan Sendirinya	173
Gambar 11.1 Interaksi Mikroorganisme dan Polimer dengan Proses Deteriorasi (a) dan Degradasi (b)	177
Gambar 11.2 Daur Biodegradasi Logam oleh Mikroorganisme	182

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Prinsip dari Green Analytical Chemistry	7
Tabel 4.1 Faktor E Pada Beberapa Industri Kimia	60
Tabel 4.2 Proses Reaksi Kimia Terbesar Berdasarkan Katalisis Heterogen.....	63
Tabel 5.1. Pelarut Organik Umum dan Karakterisasi Sifatnya	67
Tabel 5.3 Reaksi Kondensasi Antara Benzaldehida (1 mmol), Dimedone (1 mmol) dan Malononitril (1 mmol) dengan Berbagai Pelarut dan Tanpa Katalis	72
Tabel 8.1 Potensi Energi Fosil 2011-2012	120
Tabel 8.2 Potensi EBT di Indonesia	124
Tabel 8.3 Tingkatan Kecepatan Angin.....	126
Tabel 12. 1 Jenis dan Struktur Kimia Serat Tekstil Paling Umum.....	189
Tabel 12.2 Beberapa Agen Antibakteri yang Paling Umum Digunakan	195

BAB 1

PENGERTIAN *GREEN CHEMISTRY*

Oleh I Wayan Tanjung Aryasa

1.1 Pendahuluan

Kimia baru diperlukan untuk meningkatkan ekonomi manufaktur kimia dan untuk meningkatkan perlindungan terhadap lingkungan. Konsep *green chemistry* menghadirkan teknologi yang atraktif untuk ahli kimia, peneliti, dan industrialis untuk penelitian dan aplikasi kimia yang inovatif. Terutama untuk *green chemistry* yang dicirikan sebagai cara pengurangan kerusakan lingkungan yang disertai dengan bahan produksi bahan sekaligus minimalisasi dalam pembuangan limbah yang dihasilkan selama proses kimia yang berbeda.

Menurut definisi lain, *green chemistry* adalah teknik baru yang dikhususkan untuk sintesis, pemrosesan, dan penerapan bahan kimia sedemikian rupa untuk dapat meminimalkan bahaya bagi umat manusia dan lingkungan. Banyak istilah baru telah diperkenalkan terkait dengan konsep "*Green Chemistry*", seperti keefisiensi, kimia berkelanjutan, efisien atom atau ekonomi atom, intensifikasi proses dan integrasi keamanan bawaan, analisis siklus hidup dari produk, cairan ionik, stok umpan alternatif, dan "Sumber energi terbarukan". Oleh karena itu, ada kebutuhan penting untuk meningkatkan kimia sintetik dan teknik yang baik dengan bahan awal yang ramah lingkungan atau dengan merancang rute sintesis baru dengan benar sehingga dapat mengurangi penggunaan dan pembentukan zat beracun dengan menggunakan sumber energi modern.

1.2 Sejarah *Green Chemistry*

Green Chemistry muncul dari berbagai gagasan dan upaya penelitian yang ada (seperti ekonomi atom dan katalisis) pada periode menjelang tahun 1990-an, dalam rangka meningkatkan perhatian terhadap masalah-masalah polusi kimia dan penipisan sumber daya. Perkembangan *green chemistry* di Negara Eropa dan Amerika Serikat dikaitkan dengan pergeseran dalam strategi pemecahan masalah lingkungan: gerakan dari komando dan kontrol regulasi serta mandat pengurangan emisi industri di "teknologi ujung pipa", menuju pencegahan polusi aktif melalui desain inovatif dari teknologi produksi itu sendiri. Itu merupakan kumpulan konsep yang sekarang diakui sebagai *green chemistry* yang disatukan pada pertengahan hingga akhir 1990-an, bersamaan dengan adopsi istilah yang lebih luas (yang unggul atas istilah bersaing seperti kimia "bersih" dan "berkelanjutan". Di Amerika Serikat, Badan Perlindungan Lingkungan memainkan peran awal yang signifikan dalam mendorong *green chemistry* melalui program pencegahan polusi, pendanaan, dan koordinasi yang profesional. Pada saat yang sama di Inggris, para peneliti di University Of York juga berkontribusi pada pembentukan Green Chemistry Network di dalam *Royal Society Of Chemistry* dan peluncuran jurnal *Green Chemistry*.

1.3 Definisi *Green Chemistry*

Menurut definisi EPA, *Green Chemistry* didefinisikan sebagai ilmu kimia yang mendesain produk dan proses kimia yang tidak berbahaya bagi lingkungan, dengan kata lain mencegah pembentukan polusi. Produk kimia harus dibuat agar tidak tinggal di lingkungan pada aplikasi akhir produk kimia dan bahwa produk kimia dipecah menjadi komponen yang tidak berbahaya bagi lingkungan. Menghasilkan penghematan melalui sintesis yang efisien tanpa memerlukan penggunaan bahan reagen yang tidak umum, mengurangi kebutuhan energi, serta menggantikan pelarut organik dengan air, telah berhasil dicapai dalam pengaturan laboratorium dengan signifikansi yang berarti. Pada skala industri, potensi penghematan bahkan dapat mencapai jutaan.

Green Chemistry bukanlah disiplin ilmu yang terpisah, tetapi merupakan pendekatan interdisipliner yang bertanggung jawab terhadap sains, kimia, ekologi dan sosial, yang memungkinkan terjadinya kreativitas dan kemajuan penelitian yang inovatif. Sebagai bidang pendorong penelitian, *Green Chemistry* mencoba menemukan dan menjaga keseimbangan antara penggunaan sumber daya alam, ekonomi pertumbuhan dan pelestarian lingkungan.

1.4 Tren dari *Green Chemistry*

Program *Green Chemistry* untuk desain, pengembangan dan penerapan produk serta proses kimia yang dapat mengurangi atau meniadakan penggunaan atau produksi zat yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan" serta untuk mencapai tujuan utama dari program hijau dapat melalui beberapa kecenderungan yang dominan yaitu:

1. Penelitian di bidang reaksi katalitik dan biokatalitik untuk mendapatkan hasil yang sangat selektif yaitu senyawa murni tanpa pembentukan produk sampingan yang beracun.
2. Mencari bahan baku baru, tidak berbahaya dan terbarukan, seperti biomassa.
3. Merancang bahan kimia ramah lingkungan yang kurang beracun.
4. Menemukan dan menguji alternatif senyawa baru yang tidak beracun dan media reaksi terbarukan seperti air, cairan ionik dan fluida superkritis.
5. Menemukan dan menguji kondisi reaksi alternatif baru, seperti *microwave*, ultrasound dan reaksi cahaya.
6. Eksplorasi jalur alternatif untuk pemurnian dari udara dan air yang beracun untuk meningkatkan kualitasnya, seperti reaksi fotokatalitik.

Menyadari tujuan yang ditetapkan, "*Green Chemistry* berubah secara stabil pada praktik industri yang menghasilkan, mencemari, dan kemudian membersihkan, dan pada akhir abad ke-20 menjadi

hati dan jiwa ekologi industri". *Green Chemistry* merupakan janji moral bagi para ilmuwan kimia, dan bertujuan untuk menjaga keberlanjutan sumber daya alam dan lingkungan. Generasi baru ilmuwan dan teknologi yang sedang dikembangkan berfokus pada analisis ekonomi dari proses dan material yang digunakan dalam produksi dan perkembangan. Prinsip-prinsip kimia hijau atau kimia ekologis yang aman dan berkelanjutan berpusat pada penciptaan serta implementasi produk kimia dan proses yang mengurangi atau bahkan menghilangkan penggunaan serta produksi bahan berbahaya. Alih-alih hanya mengontrol risiko melalui pengendalian paparan bahan kimia berbahaya, *green chemistry* berusaha mengurangi atau potensialnya menghilangkan bahaya tersebut, dengan menolak kebutuhan akan pengendalian paparan. Jika tidak ada zat berbahaya yang digunakan atau diproduksi, maka risikonya nol dan tidak perlu dikhawatirkan menghilangkan zat berbahaya dari lingkungan atau membatasi paparan terhadap kimia hijau atau "*Green Chemistry* adalah tentang mengurangi limbah, bahan baku, risiko, energi, dampak lingkungan dan biaya".

1.5 Prinsip Dasar *Green Chemistry*

Green Chemistry umumnya didasarkan pada 12 prinsip yang dikemukakan oleh Anastas dan Warner. Saat ini, 12 prinsip *green chemistry* ini dianggap sebagai dasar untuk penghormatan terhadap pembangunan berkelanjutan. Prinsip-prinsip tersebut terdiri dari instruksi untuk mengimplementasikan produk kimia baru, sintesis baru, dan proses-proses baru seperti yang dijelaskan dibawah ini.

1. Prinsip "lebih baik mencegah daripada mengobati".

Adalah bermanfaat untuk secara apriori mencegah timbulnya limbah daripada kemudian mengolah dan membersihkan limbah.

2. Prinsip "ekonomi atom".

Rute produksi sintetik harus direncanakan dengan cara memaksimalkan penggabungan semua senyawa yang digunakan dalam proses sintesis menjadi produk yang diinginkan.

3. Prinsip "sintesis kimia yang tidak berbahaya".

Jika memungkinkan, metode sintetik seperti dicita-citakan, yang menggunakan dan menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak hanya sedikit yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

4. Prinsip "merancang bahan kimia yang lebih aman".

Bahan kimia harus dikembangkan dengan cara yang mempengaruhi fungsi yang diinginkan, sementara pada saat yang sama, sangat mengurangi toksisitasnya.

5. Prinsip "pelarut yang lebih aman dan bahan pembantu yang lebih aman".

Pengeluaran zat pembantu, seperti pelarut, zat pemisah, dan lain-lain, harus dihindari.

6. Prinsip "desain untuk efisiensi energi".

Dampak lingkungan dan ekonomi dari permintaan energi untuk proses kimia harus dianalisis yang diikuti dengan optimalisasi input energi yang dibutuhkan. Dimanapun yang memungkinkan, sintesis kimia harus dilakukan dalam kondisi proses yang ringan yaitu pada suhu dan tekanan sekitar.

7. Prinsip "bahan baku terbarukan".

Kapan pun yang memungkinkan dalam istilah teknologi dan ekonomi, proses sintetik harus menggunakan bahan mentah dan bahan baku yang terbarukan jika tidak memungkinkan, alat bantu yang tidak berbahaya harus digunakan.

8. Prinsip "reduksi derivatif".

Derivatisasi redundan, misalnya proteksi/deproteksi, penggunaan kelompok pemblokiran atau modifikasi sementara proses fisik/kimia, membutuhkan reagen tambahan dan sering memberikan kontribusi limbah tambahan. Oleh karena itu, limbah tamahan tersebut sedapat mungkin harus dihindari atau dikurangi seminimal mungkin.

9. Prinsip "katalisis".

Umumnya, reagen katalitik secara intrinsik lebih unggul daripada reagen stoikiometri sehingga katalis ini harus sebagai selektif.

10. Prinsip “degradasi”.

Produk kimia harus dirancang sedemikian rupa sehingga pada akhir masa pakainya, tidak tahan terhadap biosfer, tetapi hancur menjadi produk degradasi yang tidak beracun.

11. Prinsip “analisis waktu nyata untuk pencegahan polusi”.

Metode analitik lanjutan harus dikembangkan, yang memungkinkan pemantauan proses secara real-time dan in-line serta kontrol dengan baik sebelum zat berbahaya dihasilkan.

12. Prinsip “pencegahan kecelakaan dengan bahan kimia yang secara inheren lebih aman”.

Senyawa dan formula senyawa yang digunakan dalam proses kimia harus dipilih dengan cara yang seminimal mungkin memiliki risiko kecelakaan bahan kimia, meliputi pelepasan bahan kimia, ledakan atau pembentukan api.

1.6 Green Analytical Chemistry

Pada tahun 1999, Paul Anastas menerbitkan sebuah makalah yang mendiskusikan tentang pentingnya menggunakan 12 prinsip *Green Chemistry*, yang telah didalilkan olehnya dan John Warner pada tahun sebelumnya, dalam pengembangan metode baru dan teknik analisis, dalam rangka untuk mengurangi dampak lingkungannya (Anastas, 1999). Satu dari bidang penelitian dan pengembangan yang paling aktif di *Green Chemistry* adalah pengembangan dari metodologi analitik. Metode baru dan teknik yang mampu mengurangi dan menghilangkan penggunaan dan pembangkitan bahan berbahaya di semua tahapan analisis kimia menjadi target utama dari apa yang disebut *Green Analytical Chemistry* (Anastas, 1999; Sanseverino, 2000; Nolasco *et al.*, 2006; Guardia and Armenta, 2012). Galuszka, Migaszewski dan Namiński, pada 2013 mengadaptasi 12 prinsip-prinsip *Green Chemistry*, agar lebih sesuai dengan *Green Analytical Kimia* (Galuszka *et al.*, 2013). Dimana 12 prinsip *Green Kimia Analitik* dijelaskan pada Tabel 1.1. Prinsip-prinsip yang disarankan oleh Galuszka, Migaszewski dan Namiński (2013) terutama didasarkan pada penghapusan atau minimalisasi

penggunaan bahan kimia yaitu minimalisasi konsumsi listrik, penanganan yang benar dari residu analitik yang dihasilkan dan keselamatan operator yang lebih besar (Galuszka *et al.*, 2013).

Tabel 1.1 Prinsip dari *Green Analytical Chemistry* yang diusulkan oleh Galuszka, Migaszewski and Namiński (2013).

No	Prinsip dan Deskripsi
1	Teknik analisis langsung harus diterapkan untuk menghindari langkah perlakuan sampel
2	Ukuran dan jumlah sampel harus sekecil mungkin
3	Analisis in situ harus dilakukan
4	Integrasi proses analitis dan operasi harus dilakukan, karena dapat mempromosikan penghematan energi dan mengurangi penggunaan reagen
5	Metode otomatis dan miniatur harus dipilih
6	Derivatisasi harus dihindari karena memerlukan penggunaan reagen tambahan dan, oleh karena itu dapat menghasilkan limbah
7	Generasi volume besar limbah analitis harus dihindari dan penanganan yang benar dari limbah ini harus disediakan
8	Metode multi analit harus lebih disukai daripada metode yang menganalisis satu analit pada satu waktu
9	Penggunaan energi listrik harus diminimalkan
10	Reagen yang diperoleh dari sumber terbarukan harus lebih disukai
11	Reagen berbahaya harus dibuang
12	Keselamatan operator harus ditingkatkan

1.7 Keuntungan *Green Chemistry*

1.7.1 Keuntungan Bidang Kesehatan

- Pelepasan bahan kimia tanpa uap berbahaya yang lebih bersih ke udara sehingga menyebabkan lebih sedikit kerusakan pada paru-paru.
- Pelepasan limbah kimia cair berbahaya yang lebih bersih ke air yang mengarah ke air bersih untuk minum.
- Meningkatkan keselamatan pekerja di industri kimia, mengurangi penggunaan bahan beracun dan mengurangi potensi untuk kecelakaan.

1.7.2 Keuntungan Bidang Lingkungan

- Tumbuhan dan hewan lebih sedikit menderita akibat bahan kimia beracun yang ada di lingkungan.
- Menurunkan potensi pemanasan global, penipisan ozon dan pembentukan asap.

1.7.3 Ekonomi

- Performa yang lebih baik sehingga lebih sedikit produk yang dibutuhkan untuk mencapai fungsi yang sama.

1.8 Kerugian *Green Chemistry*

Tugas dasar *Green Chemistry* adalah mendesain seperti itu produk kimia dan proses yang dapat mengurangi atau sepenuhnya menghilangkan penggunaan atau penciptaan zat berbahaya. Prestasi ini juga mengungkapkan keterbatasan dari *Green Chemistry* yang termanifestasi dalam aspek waktu, biaya, dan kekurangan data informasi. Lebih khusus lagi, beralih dari produk yang lama atau proses konvensional menjadi produk "hijau" baru atau proses membutuhkan banyak waktu, desain atau desain ulang yang baru produk dan proses seringkali sulit dan cukup mahal dan ada juga kekurangannya adalah kesatuan tentang apa yang dianggap aman.

Keterbatasan *Green Chemistry* tercermin dalam tantangan biaya yang tinggi saat diterapkan serta kekurangan informasi yang ada. Fakta bahwa tidak ada solusi alternatif yang saat ini diketahui untuk bahan baku kimia bekas atau teknologi pengganti yang dapat menggantikan proses ramah lingkungan juga menjadi bagian dari keterbatasan tersebut. Selain itu, keterbatasan dalam hal sumber daya manusia dan keahlian juga turut menjadi aspek yang perlu diperhatikan. Bahaya yang terkait dengan peralihan ke produk dan proses yang ramah lingkungan tidak tersebar merata di seluruh rantai pasokan, dan terdapat kekurangan sumber daya untuk melanjutkan penelitian lebih lanjut.

Cairan ionik telah diidentifikasi sebagai arah masa depan dalam bidang *Green Chemistry*, meskipun ada keraguan yang semakin timbul mengenai apakah cairan ionik dapat memenuhi harapan ini dalam konteks proses sintesis kimia. Saat menerapkan 12 prinsip yang menggambarkan bahan *Green Chemistry*, cairan ionik tidak terlihat terutama untuk istilah “hijau”. Pandangan umum adalah bahwa dalam situasi kemajuan ilmiah saat ini, harapan untuk melihat penggunaan luas cairan ionik dalam sepuluh tahun ke depan mungkin tidak realistis. Meskipun diketahui bahwa cairan ionik memiliki kecenderungan rendah untuk menguap karena tekanan uapnya yang rendah, ini hanya merupakan salah satu aspek dari banyak faktor yang harus dipertimbangkan dalam mengukur keberlanjutan suatu zat. Misalnya cairan ion berbasis imidazol dan yang berbasis anion fluoro mungkin beracun tetapi tidak dapat mencapai lingkungan dengan penguapan. Isu yang muncul adalah bahwa mayoritas cairan ionik adalah larut dalam air dan memiliki potensi untuk masuk ke biosfer melalui proses penguapan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anastas, P.T., Williamson, TC.1996. Green Chemistry: Designing Chemistry.
Environment. In: ACS Symposium Series, Washington, v. 626 Anita, I.,
Ana, D., Anita M., B., dan Stanislava T. 2017. Review of 12
Principles of Green Chemistry in Practice. International
Journal of Sustainable and Green Energy, 6(3): 39-48.
- Galuszka, A., Migaszewski, Z., Namiésnik, J., 2013. Trends Anal. Chem.
50, 78–84.
- Guardia, M.D., Armenta, S., 2012. Anal. Bioanal. Chem. 404, 625–626.
- Hosam, El-Din M., S., dan Martin, K. 2018. Green Chemistry:
Introductory Chapter: Principles of Green Chemistry.
ISBN:978-953-51-3848-8, DOI10.5772/68007.
- Marco, B., Rechelo, B., Tótolí, E., Kogawa, A., and Salgado, H. 2018.
Evolution Of Green Chemistry And Its Multidimensional
Impacts: A Review. Saudi Pharmaceutical Journal. 27.
- Nolasco, F.R., Tavares, G.A., Bendassolli, J.A., 2006. Sanitary Environ.
Eng. 11, 118–124
- Sanseverino, A.M., 2000. New Chem. 23, 102–107
- Yogita, S., T., Pravin, B., C., dan Nasir, T. 2022. Green Chemistry. IJCRT,
Volume 10, Issue 1, ISSN: 2320-2882.

BAB 2

PRINSIP GREEN CHEMISTRY

Oleh Khoirul Ngibad

2.1 Pendahuluan

Di tengah meningkatnya kesadaran tentang dampak lingkungan dan kesehatan manusia yang dihasilkan dari proses dan produk kimia, *green chemistry* atau kimia hijau telah muncul sebagai pendekatan yang inovatif dan progresif dalam dunia ilmu kimia. Tujuannya adalah menciptakan proses kimia yang lebih berkelanjutan, efisien, dan aman bagi manusia serta lingkungan. Salah satu fondasi utama dalam *green chemistry* adalah dua belas prinsip *green chemistry*, yang dirumuskan oleh para ilmuwan Paul Anastas dan John Warner pada tahun 1998 (Paul et al., 1998). Prinsip-prinsip ini bertujuan untuk mengarahkan praktik-praktik kimia menuju solusi yang lebih baik, lebih hijau, dan lebih berkelanjutan. Masing-masing prinsip mengeksplorasi area kunci dalam proses kimia, dari pemilihan bahan baku hingga pengelolaan limbah, dengan fokus pada mengurangi dampak negatif dan mengoptimalkan efisiensi (Paul et al., 1998) (Clark et al., 2008).

Dalam bab ini, akan diberikan gambaran singkat tentang dua belas prinsip *green chemistry*, pembahasan setiap prinsip secara ringkas, dan pentingnya penerapan prinsip-prinsip tersebut dalam dunia kimia modern (Paul et al., 1998).

1. *Prevent Waste* (Mencegah Limbah): Prinsip ini mendorong pengembangan proses yang menghasilkan sedikit atau bahkan tanpa limbah. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan secara matang pemilihan reagen dan kondisi reaksi.
2. *Atom Economy* (Ekonomi Atom): Prinsip ini menekankan pemanfaatan atom-atom dalam bahan kimia yang dihasilkan

dengan tujuan menghindari pemborosan dan memaksimalkan penggunaan bahan baku.

3. *Less Hazardous Synthesis* (Sintesis yang Kurang Berbahaya): Prinsip ini mengajukan penggunaan reagen dan kondisi reaksi yang kurang berbahaya dan beracun sehingga dapat mengurangi risiko bagi manusia dan lingkungan.
4. *Designing Safer Chemicals* (Merancang Bahan Kimia yang Lebih Aman): Prinsip ini mengarahkan pada pengembangan molekul dan bahan kimia baru yang lebih aman yang bertujuan untuk mengurangi efek negatif terhadap manusia dan lingkungan.
5. *Safer Solvents and Auxiliaries* (Pelarut dan Bahan Bantu yang Lebih Aman): Prinsip ini mendorong penggunaan pelarut dan bahan bantu yang lebih ramah lingkungan dan lebih aman bagi kesehatan manusia.
6. *Design for Energy Efficiency* (Merancang untuk Efisiensi Energi): Prinsip ini mendorong perancangan proses kimia yang menggunakan energi secara efisien dengan cara mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca.
7. *Use of Renewable Feedstocks* (Pemanfaatan Bahan Baku Terbarukan): Prinsip ini mendukung penggunaan bahan baku yang dapat diperbarui, seperti biomassa, dalam produksi kimia untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas.
8. *Reduce Derivatives* (Mengurangi Derivatif): Prinsip ini mengajukan pengurangan penggunaan bahan kimia tambahan atau derivatif yang tidak diperlukan dalam proses sintesis.
9. *Catalysis* (Katalisis): Prinsip ini mendorong penggunaan katalis dalam proses kimia untuk meningkatkan efisiensi reaksi dan mengurangi limbah.
10. *Design for Degradation* (Merancang untuk Degradasi): Prinsip ini mengarahkan pada pengembangan produk yang dapat terurai dengan mudah setelah digunakan sehingga dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.
11. *Real-time Analysis for Pollution Prevention* (Analisis Waktu Nyata untuk Pencegahan Polusi): Prinsip ini mendorong

penggunaan teknologi analisis waktu nyata dalam proses kimia untuk pengendalian dan pencegahan polusi.

12. *Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention* (Kimia yang Lebih Aman secara Intrinsik untuk Pencegahan Kecelakaan): Prinsip ini mengajukan pengembangan bahan kimia dan proses yang intrinsik lebih aman dan mengurangi potensi kecelakaan.

Dengan mengadopsi dan menerapkan dua belas prinsip *green chemistry* tersebut, komunitas ilmu kimia dapat berkontribusi secara signifikan terhadap pengurangan dampak lingkungan dan kesehatan manusia yang dihasilkan dari praktik-praktik kimia. Penggabungan prinsip-prinsip tersebut dalam setiap tahap riset, produksi, dan penggunaan produk kimia dapat membawa dunia menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.2 Dua Belas Prinsip *Green Chemistry*

Dalam sub bab ini, dapat dilihat dua belas prinsip *Green Chemistry* sebagaimana yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Rangkuman dua belas prinsip *Green Chemistry*
Sumber : <https://www.fisheriesindia.com/2020/08/how-principles-of-green-chemistry-can.html>

2.2.1 Prevent Waste

Prinsip "*Prevent Waste*" dalam *Green Chemistry*, juga dikenal sebagai prinsip "*Minimize or Eliminate Hazardous Chemicals*", adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengubah cara kerja dalam bidang kimia agar lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Prinsip ini menekankan pada pengurangan atau bahkan eliminasi pembentukan limbah berbahaya selama proses kimia. Tujuannya adalah untuk mengurangi dampak lingkungan dan kesehatan manusia yang diakibatkan oleh limbah kimia yang berpotensi beracun atau tidak dapat terurai (Warner et al., 2004).

Penerapan prinsip "*Prevent Waste*" melibatkan beberapa strategi (Sheldon, 2005):

1. Desain Reaksi yang Selektif: Merancang reaksi kimia sedemikian rupa sehingga hanya produk yang diinginkan yang terbentuk, sementara produk samping yang tidak diinginkan diminimalkan. Hal tersebut dapat dicapai dengan memilih kondisi reaksi yang tepat, memilih katalis yang selektif, dan mengoptimalkan rasio reagen.
2. Pemilihan Reagen yang Aman: Memilih reagen yang lebih aman dan ramah lingkungan untuk digunakan dalam proses kimia. Hal ini dapat mengurangi pembentukan produk samping berbahaya dan mengurangi risiko kecelakaan kerja.
3. Penggunaan Katalis: Menggunakan katalis dapat meningkatkan efisiensi reaksi kimia dan mengurangi jumlah reagen yang dibutuhkan. Katalis membantu mempercepat reaksi tanpa dikonsumsi dalam jumlah besar, sehingga mengurangi limbah yang dihasilkan.
4. Penggunaan Bahan Baku Terbarukan: Memanfaatkan bahan baku yang dapat diperbarui dan berkelanjutan membantu mengurangi ketergantungan pada bahan baku yang terbatas. Ini juga dapat mengurangi dampak lingkungan dari ekstraksi bahan baku alam.

5. Pemisahan yang Efisien: Merancang metode pemisahan yang efisien untuk memisahkan produk dari reagen dan produk samping. Metode pemisahan yang baik dapat membantu mengurangi pembentukan limbah.

2.2.2 Atom Economy

Prinsip "*Atom Economy*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mempromosikan efisiensi dalam proses kimia dan mengurangi pembentukan limbah. Prinsip ini menekankan pada efisiensi pemanfaatan atom dalam suatu reaksi kimia yang bertujuan untuk menghasilkan produk yang diinginkan tanpa menghasilkan produk samping yang tidak diinginkan. Konsep "*Atom Economy*" mengukur sejauh mana atom-atom yang ada dalam reagen akhirnya masuk ke dalam produk yang dihasilkan. Semakin tinggi persentase atom yang terlibat dalam produk maka semakin efisien suatu reaksi kimia (Trost, 1991) (Sheldon, 2000) (Paul et al., 1998). Penerapan prinsip "*Atom Economy*" melibatkan beberapa aspek:

1. Desain Reaksi yang Efisien: Memilih reagen dan kondisi reaksi yang meminimalkan pembentukan produk samping dan menghasilkan lebih banyak produk yang diinginkan.
2. Pemilihan Reagen yang Tepat: Memilih reagen dengan cermat untuk memaksimalkan kontribusi atom-atom yang diperlukan untuk produk akhir.
3. Mengurangi Penggunaan Reagen Berlebihan: Menghindari penggunaan reagen berlebihan yang dapat meningkatkan pembentukan produk samping.
4. Penggunaan Katalis: Menggunakan katalis dapat meningkatkan efisiensi reaksi, karena katalis bekerja dengan mengaktivasi reagen dan memfasilitasi reaksi tanpa menghasilkan produk samping yang berarti.

Prinsip "*Atom Economy*" mendukung pengurangan limbah kimia dan pemanfaatan bahan baku yang lebih efisien, yang pada akhirnya berkontribusi pada keberlanjutan dalam bidang kimia.

2.2.3 Less Hazardous Synthesis

Prinsip "*Less Hazardous Synthesis*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengurangi risiko kesehatan manusia dan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses kimia. Prinsip ini mengajukan bahwa proses sintesis kimia harus dirancang sedemikian rupa sehingga menghasilkan produk dengan risiko toksisitas dan bahaya yang lebih rendah. Aspek-aspek utama dari prinsip "*Less Hazardous Synthesis*" meliputi (Paul et al., 1998) (Sheldon, 2005):

1. **Pemilihan Reagen Aman:** Memilih reagen yang lebih aman dan kurang beracun untuk mengurangi risiko paparan manusia dan dampak lingkungan. Reagen beracun atau berbahaya harus dihindari atau digantikan dengan alternatif yang lebih aman.
2. **Pemilihan Kondisi Reaksi yang Lebih Aman:** Memilih kondisi reaksi yang meminimalkan pembentukan produk samping berbahaya atau toksik. Ini dapat mencakup penggunaan suhu dan tekanan yang lebih rendah.
3. **Pengurangan Penggunaan Reagen Berbahaya:** Mengurangi atau menghindari penggunaan reagen berbahaya yang dapat menghasilkan limbah beracun atau produk samping berbahaya.
4. **Penggunaan Katalis yang Ramah Lingkungan:** Menggunakan katalis yang lebih ramah lingkungan untuk mengurangi penggunaan reagen berbahaya atau mengurangi kondisi reaksi yang berpotensi membentuk produk berbahaya.

Prinsip "*Less Hazardous Synthesis*" bertujuan untuk mengurangi risiko kesehatan dan dampak lingkungan yang dihasilkan oleh proses kimia, sambil tetap memungkinkan produksi produk yang diinginkan.

2.2.4 Designing Safer Chemicals

Prinsip "*Designing Safer Chemicals*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dan risiko kesehatan manusia yang dihasilkan dari bahan kimia. Prinsip ini menekankan pentingnya merancang molekul dan bahan kimia baru sedemikian rupa sehingga lebih aman bagi manusia dan lingkungan. Aspek utama dari prinsip "*Designing Safer Chemicals*" meliputi (Paul et al., 1998) (Anastas et al., 2003):

1. Perancangan Bahan Kimia yang Kurang Toksik: Merancang molekul dan bahan kimia dengan struktur yang kurang beracun atau tidak memiliki efek merugikan bagi manusia atau lingkungan. Hal ini mencakup menghindari bahan kimia dengan grup fungsional yang dapat menghasilkan produk degradasi berbahaya.
2. Perancangan Molekul yang Mudah Terurai: Merancang bahan kimia yang dapat terurai secara alami dan tidak mengakibatkan residu yang berbahaya dalam lingkungan.
3. Mengurangi Bioakumulasi: Merancang bahan kimia yang memiliki kemampuan rendah untuk terakumulasi di tubuh organisme hidup, sehingga mengurangi potensi dampak jangka panjang pada ekosistem.
4. Menghindari Bahan Kimia Persisten: Menghindari penggunaan bahan kimia yang sangat persisten di lingkungan dan sulit terurai.

Prinsip "*Designing Safer Chemicals*" berfokus pada prinsip pencegahan dan meminimalkan dampak dari bahan kimia sejak awal dalam proses desain.

2.2.5 Safer Solvents and Auxiliaries

Prinsip "*Safer Solvents and Auxiliaries*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dan risiko kesehatan manusia yang dihasilkan dari penggunaan pelarut dan bahan bantu (*auxiliaries*) dalam proses kimia. Prinsip ini mendorong penggunaan pelarut dan bahan bantu yang lebih aman dan ramah lingkungan. Aspek utama dari prinsip "*Safer Solvents and Auxiliaries*" meliputi (Paul et al., 1998) (Sheldon, 2005):

1. Pemilihan Pelarut Ramah Lingkungan: Memilih pelarut yang lebih ramah lingkungan dan kurang beracun untuk mengurangi dampaknya pada lingkungan dan kesehatan manusia. Hal ini termasuk menghindari penggunaan pelarut yang dapat berkontribusi pada polusi udara atau air.
2. Pengurangan Penggunaan Pelarut Berbahaya: Mengurangi atau menghindari penggunaan pelarut yang berbahaya atau beracun, serta memilih pelarut yang dapat diuraikan dengan mudah.
3. Pemilihan Bahan Bantu yang Lebih Aman: Memilih bahan bantu (*auxiliaries*) yang lebih aman dan memiliki dampak minimal terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.
4. Pengurangan Ketergantungan pada Pelarut yang Berbahaya: Mengurangi ketergantungan pada pelarut berbahaya yang mungkin berdampak negatif selama produksi, penggunaan, dan pembuangan.

Prinsip "*Safer Solvents and Auxiliaries*" berfokus pada pilihan yang lebih bijaksana dalam menggunakan pelarut dan bahan bantu dalam proses kimia, dengan tujuan mengurangi dampak negatif yang terkait dengan penggunaan zat-zat tersebut.

2.2.6 Design for Energy Efficiency

Prinsip "*Design for Energy Efficiency*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dalam proses kimia. Prinsip ini mendorong pengembangan proses kimia yang menggunakan energi dengan lebih efisien, sehingga mengurangi konsumsi energi dan dampak lingkungan yang terkait. Aspek utama dari prinsip "*Design for Energy Efficiency*" meliputi (Paul et al., 1998) (Sheldon, 2005) (Clark et al., 2008):

1. **Pemilihan Kondisi Reaksi yang Efisien:** Memilih kondisi reaksi yang memungkinkan reaksi berlangsung dengan lebih cepat atau pada suhu yang lebih rendah. Ini dapat mengurangi konsumsi energi yang diperlukan untuk memanaskan atau mengatur suhu reaksi.
2. **Penggunaan Katalis:** Menggunakan katalis yang efisien dapat mempercepat reaksi kimia tanpa memerlukan suhu atau tekanan yang tinggi, sehingga mengurangi konsumsi energi.
3. **Penggunaan Energi Terbarukan:** Memanfaatkan sumber energi terbarukan, seperti energi surya atau energi angin, dalam proses kimia untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang berkontribusi pada emisi gas rumah kaca.
4. **Pengurangan Kehilangan Energi:** Mengurangi kehilangan energi selama proses kimia, misalnya melalui isolasi yang lebih baik atau penggunaan peralatan yang lebih efisien.

Prinsip "*Design for Energy Efficiency*" mendorong inovasi dalam desain proses kimia yang menghasilkan lebih sedikit limbah dan lebih efisien dalam penggunaan energi.

2.2.7 Use of Renewable Feedstocks

Prinsip "*Use of Renewable Feedstocks*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk meningkatkan keberlanjutan dalam industri kimia. Prinsip ini mendorong penggunaan bahan baku atau

feedstock yang dapat diperbarui atau regeneratif dalam proses kimia, mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas dan tidak dapat diperbarui. Aspek utama dari prinsip "*Use of Renewable Feedstocks*" meliputi (Paul et al., 1998) (Clark et al., 2008):

1. Pemanfaatan Sumber Daya Terbarukan: Memanfaatkan sumber daya alam yang dapat diperbarui, seperti biomassa, tanaman, dan limbah organik, sebagai bahan baku dalam produksi kimia.
2. Reduksi Ketergantungan pada Bahan Baku Fosil: Mengurangi penggunaan bahan baku fosil yang dapat menghasilkan limbah dan emisi berbahaya, dengan menggantinya dengan bahan baku terbarukan.
3. Konversi Limbah menjadi *Feedstock*: Mengubah limbah atau produk samping dari industri lain menjadi bahan baku dalam proses kimia, mendorong konsep ekonomi sirkular.
4. Mengurangi Jejak Karbon: Menggunakan sumber daya terbarukan dapat membantu mengurangi jejak karbon dan dampak perubahan iklim yang terkait dengan produksi kimia.

Prinsip "*Use of Renewable Feedstocks*" mendukung transisi menuju ekonomi berkelanjutan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang dapat diperbarui untuk memenuhi kebutuhan industri kimia.

2.2.8 Reduce Derivatives

Prinsip "*Reduce Derivatives*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengurangi pembentukan limbah dan efek negatif dalam proses kimia. Prinsip ini mendorong untuk merancang proses sintesis kimia yang menghasilkan produk akhir langsung, mengurangi penggunaan bahan kimia tambahan atau derivatif yang tidak diperlukan. Aspek utama dari prinsip "*Reduce Derivatives*" meliputi (Paul et al., 1998) (Clark et al., 2008):

1. Pengurangan Langkah Sintesis: Merancang proses sintesis yang mengurangi langkah-langkah yang tidak perlu, sehingga mengurangi penggunaan reagen tambahan dan limbah yang dihasilkan.
2. Penghindaran Penggunaan Grup Perlindungan: Menghindari penggunaan grup perlindungan (protecting groups) yang dapat menambah langkah sintesis dan menghasilkan limbah tambahan.
3. Pemilihan Reagen yang Lebih Selektif: Memilih reagen yang lebih selektif untuk merangsang reaksi yang menghasilkan produk langsung, menghindari pembentukan produk samping atau intermediat yang tidak diperlukan.
4. Pemilihan Rute Sintesis yang Lebih Sederhana: Memilih rute sintesis yang lebih sederhana dan langsung untuk menghasilkan produk akhir, mengurangi kompleksitas dan limbah yang dihasilkan.

Prinsip "*Reduce Derivatives*" mendukung efisiensi dalam proses kimia dengan mengurangi jumlah langkah dan bahan kimia tambahan yang diperlukan, sehingga menghasilkan produk akhir dengan dampak lingkungan yang lebih rendah.

2.2.9 *Catalysis*

Prinsip "*Catalysis*" atau "Katalisis" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang mengedepankan penggunaan katalis dalam proses kimia untuk meningkatkan efisiensi reaksi dan mengurangi limbah yang dihasilkan. Katalis adalah zat yang meningkatkan laju reaksi kimia tanpa dikonsumsi dalam reaksi tersebut. Penggunaan katalis dalam *Green Chemistry* mendukung berbagai aspek keberlanjutan, termasuk pengurangan penggunaan bahan kimia berbahaya dan energi. Aspek utama dari prinsip "*Catalysis*" meliputi (Paul et al., 1998) (Sheldon, 2005) :

1. Peningkatan Kecepatan Reaksi: Katalis memungkinkan reaksi kimia berlangsung dengan lebih cepat dan efisien

dibandingkan reaksi tanpa katalis. Ini dapat mengurangi waktu reaksi dan meningkatkan produktivitas.

2. Penggunaan Reagen yang Lebih Sedikit: Katalis memungkinkan reaksi berlangsung dengan jumlah reagen yang lebih sedikit, mengurangi penggunaan bahan kimia dan limbah yang dihasilkan.
3. Pengurangan Energi yang Diperlukan: Katalis dapat mengurangi energi yang diperlukan untuk mencapai kondisi reaksi tertentu, karena reaksi dapat berlangsung pada suhu dan tekanan yang lebih rendah.
4. Pemilihan Katalis yang Efisien: Memilih katalis yang selektif dan efisien membantu mengarahkan reaksi menuju produk yang diinginkan, menghindari produk samping yang tidak diinginkan.
5. Prinsip "Catalysis" dalam *Green Chemistry* berfokus pada pemanfaatan katalis untuk mempercepat reaksi kimia, mengurangi limbah, dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan.

2.2.10 Design for Degradation

Prinsip "*Design for Degradation*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk merancang bahan kimia yang dapat terurai dengan mudah setelah digunakan, mengurangi dampak lingkungan dan akumulasi limbah. Prinsip ini mendorong pengembangan produk yang memiliki siklus hidup yang lebih berkelanjutan dengan mengutamakan degradabilitas dan kemampuan terurai. Aspek utama dari prinsip "*Design for Degradation*" meliputi (Paul et al., 1998) (Anastas et al., 2003) (Clark et al., 2008):

1. Pemilihan Bahan yang Terurai dengan Mudah: Memilih bahan baku yang dapat terurai dengan cepat dan alami setelah digunakan, mengurangi akumulasi limbah yang berbahaya.
2. Desain Produk dengan Siklus Hidup yang Berkelanjutan: Merancang produk dengan mempertimbangkan apa yang

akan terjadi dengan produk setelah digunakan, sehingga produk dapat terurai dengan aman tanpa meninggalkan residu berbahaya.

3. Menghindari Bahan yang Sulit Terurai: Menghindari penggunaan bahan kimia yang sulit terurai dan dapat mengakibatkan akumulasi di lingkungan.
4. Pertimbangan Pengaruh Produk Terdegradasi: Memahami dampak produk terdegradasi terhadap ekosistem dan kesehatan manusia untuk memastikan bahwa produk-produk tersebut tidak menghasilkan residu yang berbahaya.
5. Prinsip "*Design for Degradation*" mendukung pengembangan produk yang lebih ramah lingkungan dengan mempertimbangkan akhir siklus hidup produk tersebut.

2.2.11 Real-time Analysis for Pollution Prevention

Prinsip "*Real-time Analysis for Pollution Prevention*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dengan menerapkan teknologi analisis waktu nyata dalam proses kimia. Prinsip ini mendorong penggunaan metode analisis yang dapat memberikan informasi langsung tentang kondisi reaksi, sehingga memungkinkan pengendalian proses dan pencegahan polusi. Aspek utama dari prinsip "*Real-time Analysis for Pollution Prevention*" meliputi (Paul et al., 1998) (Hessel et al., 2014) (Clark et al., 2008):

1. Pemantauan Proses Secara Langsung: Menggunakan teknologi analisis yang memungkinkan pemantauan langsung terhadap parameter reaksi, seperti suhu, tekanan, pH, dan konsentrasi reagen.
2. Pengendalian dan Penyesuaian Proses: Dengan memantau kondisi reaksi secara langsung, proses kimia dapat dikendalikan dengan lebih baik. Ini memungkinkan untuk mengambil tindakan korektif atau penyesuaian kondisi reaksi jika diperlukan.

3. Pencegahan Polusi: Dengan mendeteksi perubahan atau masalah dalam proses segera, tindakan dapat diambil untuk mencegah pembentukan produk samping atau polutan yang tidak diinginkan.
4. Efisiensi yang Ditingkatkan: Penggunaan teknologi analisis waktu nyata dapat meningkatkan efisiensi proses, menghindari pembentukan limbah atau produk samping yang tidak diinginkan.

Prinsip "*Real-time Analysis for Pollution Prevention*" berfokus pada pencegahan polusi melalui pemantauan dan pengendalian proses yang lebih akurat dan responsif.

2.2.12 *Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention*

Prinsip "*Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention*" dalam *Green Chemistry* adalah salah satu dari dua belas prinsip utama yang bertujuan untuk mengurangi risiko kecelakaan dan dampak yang dihasilkan dari proses kimia. Prinsip ini mendorong pengembangan bahan kimia dan proses yang intrinsik lebih aman dan mengurangi potensi kecelakaan. Aspek utama dari prinsip "*Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention*" meliputi (Paul et al., 1998) (Kletz, 1996):

1. Pemilihan Bahan yang Lebih Aman: Memilih bahan kimia yang lebih aman dengan karakteristik yang lebih stabil dan kurang berpotensi menyebabkan kecelakaan atau reaksi yang tidak terkendali.
2. Mengurangi Bahaya melalui Desain: Merancang bahan kimia yang secara alami memiliki bahaya yang lebih rendah, seperti menghindari bahan kimia yang mudah teroksidasi atau berpotensi meledak.
3. Mengurangi Kecelakaan Risiko: Dengan merancang proses yang lebih aman, risiko kecelakaan dapat dikurangi, termasuk risiko reaksi berbahaya atau kebocoran bahan kimia.
4. Mengurangi Penggunaan Bahan Berbahaya: Penggunaan bahan kimia yang intrinsik lebih aman

dapat mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya atau berpotensi merusak.

Prinsip "*Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention*" berfokus pada pencegahan kecelakaan dan risiko yang dapat terjadi akibat karakteristik kimia dan proses tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). *Peer reviewed: design through the 12 principles of green engineering*. ACS Publications.
- Clark, J. H., & Macquarrie, D. J. (2008). *Handbook of green chemistry and technology*. John Wiley & Sons.
- Hessel, V., Kralisch, D., & Kockmann, N. (2014). *Novel process windows: innovative gates to intensified and sustainable chemical processes*. John Wiley & Sons.
- Kletz, T. A. (1996). Inherently safer design: the growth of an idea. *Process Safety Progress*, 15(1), 5–8.
- Paul, A., Warner, T., & John, C. (1998). Green chemistry: theory and practice. *Oxford [England], New York Oxford Univ Press*, 11, 1394013941.
- Sheldon, R. A. (2000). Atom efficiency and catalysis in organic synthesis. *Pure and Applied Chemistry*, 72(7), 1233–1246.
- Sheldon, R. A. (2005). Green solvents for sustainable organic synthesis: state of the art. *Green Chemistry*, 7(5), 267–278.
- Trost, B. M. (1991). The atom economy—a search for synthetic efficiency. *Science*, 254(5037), 1471–1477.
- Warner, J. C., Cannon, A. S., & Dye, K. M. (2004). Green chemistry. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(7–8), 775–799. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.006>

BAB 3

LIMBAH (PRODUKSI, PROBLEM, DAN PENCEGAHAN)

Oleh Isran Asnawi

3.1 Pengertian Limbah

Akumulasi jumlah limbah mengalami tren kenaikan oleh peningkatan populasi dan industrialisasi dalam kurun waktu yang singkat. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), total sampah nasional pada tahun 2021 mencapai 68,5 juta ton dan jumlah ini diestimasikan akan semakin meningkat. Limbah muncul akibat aktivitas manusia, industri, dan alam. Misalkan, setiap perumahan dan pemukiman menghasilkan limbah setiap harinya dikarenakan aktivitas rumah tangga dan pekerjaan sehari-hari. Contoh lain adalah di bidang industri, yang dalam hal ini setiap proses industri tidak hanya menghasilkan produk tapi juga menghasilkan limbah.

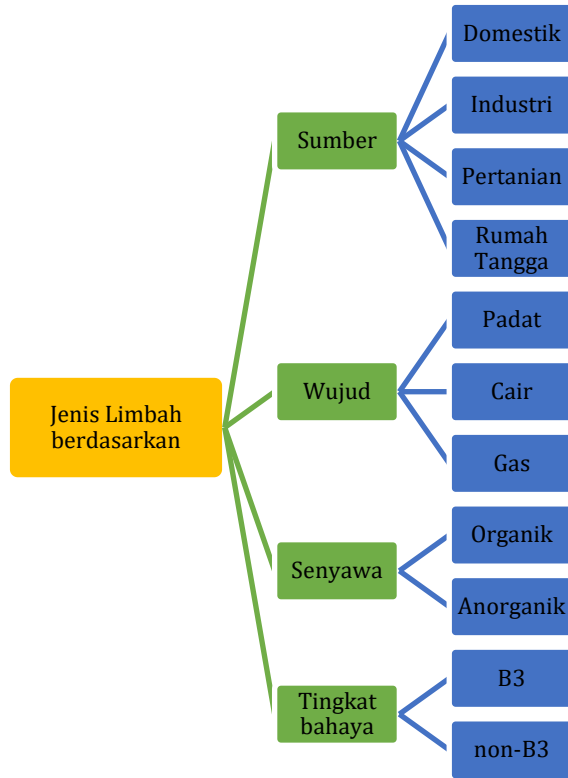
Akumulasi berlebihan terhadap jumlah ini dapat membahayakan ekosistem dan manusia yang berdampak pada menurunnya kualitas air dan udara, serta mempengaruhi keanekaragaman hayati. Permasalahan limbah saat ini menjadi masalah besar bagi dunia. Sehingga para saintis dan ahli teknologi berlomba-lomba memilih metode yang cocok untuk pengolahan limbah. Para petinggi pemerintahan juga berusaha menerapkan berbagai kebijakan terhadap pengelolaan limbah.

Menurut UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah adalah limbah adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan (Pemerintah Republik Indonesia, 2009). Sedangkan menurut *United Nations Environment Programme* (UNEP), limbah adalah bahan yang bukan produk utama (produk yang diproduksi untuk pasar) yang tidak digunakan lebih lanjut oleh produsen dalam hal tujuan produksi, transformasi atau konsumsinya sendiri, dan akan dibuang (tidak memiliki nilai ekonomi). Selain itu, menurut *American Chemical Society* (ACS), limbah adalah bahan atau benda yang tidak diinginkan atau tidak lagi diperlukan dan biasanya dihasilkan sebagai hasil sampingan dari proses atau aktivitas manusia.

Berdasarkan definisi yang telah disebutkan, terdapat beberapa kesamaan bahwa limbah adalah bahan, sisa, atau hasil samping dari berbagai aktivitas manusia yang tidak diinginkan dan tidak memiliki nilai ekonomi. Limbah dapat berasal dari produksi industri, pertanian, perikanan, peternakan, jasa, rumah tangga, dan/atau aktivitas manusia lainnya. Selain itu, limbah juga dapat berasal dari aktivitas alam, misalnya peristiwa bencana alam.

3.2 Sumber, Jenis, dan Karakteristik Limbah

Semakin besar aktivitas manusia, maka semakin besar jumlah limbah yang dihasilkan. Sehingga tidak dapat dipungkiri berbagai aktivitas manusia dapat memunculkan limbah. Beberapa referensi mengklasifikasikan jenis limbah berdasarkan sumber, wujud, senyawa, dan sifat (Gambar 3.1).



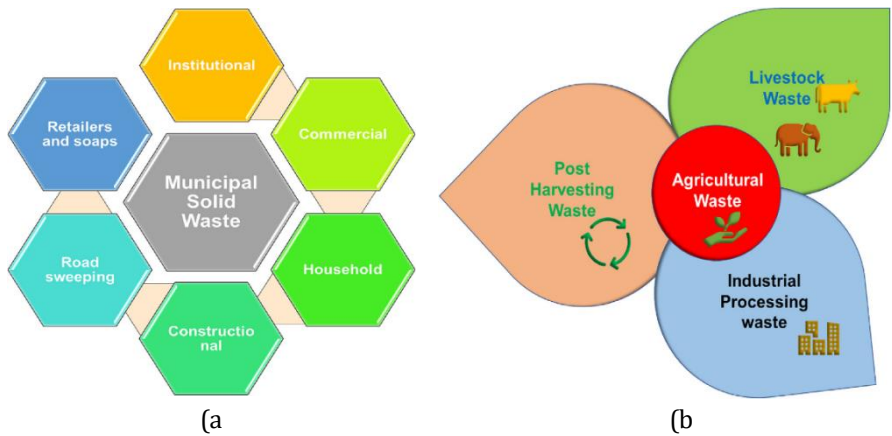
Gambar 3.1 Klasifikasi jenis limbah
(Sumber: dokumentasi pribadi)

3.2.1 Jenis Limbah Berdasarkan Sumbernya

Berdasarkan kajian oleh (Mishra *et al.*, 2023), jenis limbah ditinjau dari sumber dan asal muasalnya antara lain:

- 1) Limbah domestik dan perkotaan: limbah ini dapat berasal dari perumahan, perkantoran, rumah sakit, sekolah, perhotelan, dan pusat perniagaan. Beberapa contoh limbah dari perkotaan adalah plastik, kertas, sisa makanan, kardus, kaca, dan kaleng.

- 2) Limbah pertanian dan pangan: contohnya antara lain sisa tanaman, buah atau sayuran yang terbuang, ampas tebu, jerami, tempurung kelapa, batang tanaman, kulit buah, kotoran hewan, pupuk kandang, bangkai tubuh hewan, tulang belulang, kulit hewan, dan masih banyak lagi.
- 3) Limbah Industri: limbah industri adalah limbah yang merupakan hasil samping dari pemrosesan bahan baku menjadi produk utama. Jenis limbah industri sangat beragam tergantung proses industri yang dilakukan. Limbah industri dapat berupa wujud padat, cair, dan gas. Contoh limbah padat industri adalah residu hasil peleburan, limbah penambangan bijih, dan abu hasil pembakaran. Contoh limbah cair industri adalah limbah yang mengandung logam berat (Hg, Pb, Cr, Cd, As, Cu, dll), senyawa organik dan anorganik, serta senyawa kimia lainnya yang merusak lingkungan. Contoh limbah gas industri adalah emisi gas buang hasil proses yang mengandung karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), hidrokarbon (HC), ozon, metana (CH_4), dan partikulat.
- 4) Limbah rumah tangga: contoh limbah padat rumah tangga adalah sampah sisa makanan yang telah membusuk, sedangkan contoh limbah cair rumah tangga adalah limbah hasil cucian yang mengandung deterjen dan fosfat.



Gambar 3.2 (a) Jenis limbah padat perkotaan dan pemukiman; (b) limbah pertanian

(Sumber: Mishra *et al.*, 2023)

3.2.2 Jenis Limbah Berdasarkan Wujudnya

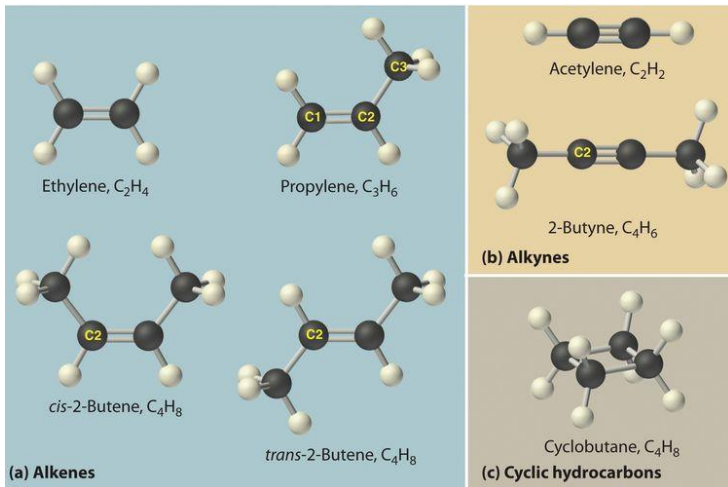
Pengelolaan atau pengolahan limbah akan lebih mudah dilakukan dengan mengetahui wujudnya. Limbah berdasarkan wujud diklasifikasikan menjadi limbah padat, cair, dan gas. Masing-masing jenis limbah ini memiliki karakteristik dan tipe pengolahan yang berbeda. Limbah padat adalah limbah yang berwujud padat. Secara umum limbah padat juga disebut sebagai sampah. Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat produksi sampah yang tinggi. Contoh sampah atau limbah padat yang umum dihasilkan dari hasil aktivitas manusia antara lain plastik, kaca, kaleng kertas, serbuk besi, serbuk kayu, kotoran hewan, sisa tanaman, bangkai hewan, dan abu hasil pembakaran.

Limbah cair adalah limbah yang berada dalam fasa cair. Limbah cair dihasilkan dari pemukiman, proses industri, pertanian, dan rumah tangga. Limbah cair memiliki karakteristik yang dapat menjadi dasar dalam pengelolaan dan pengolahannya agar dapat mengurangi tingkat bahaya dan dampak buruk yang ditimbulkan. Karakteristik limbah cair meliputi parameter fisika, kimia, dan biologi. Parameter fisika kualitas limbah cair meliputi parameter kekeruhan dan *Total Suspended Solid* (TSS)). Parameter kimia kualitas limbah cair meliputi pH, *Total Dissolved Solid* (TDS), logam berat, BOD, COD, dan senyawa anorganik. Parameter biologi kualitas limbah cair meliputi jumlah bakteri dan jamur (Asnawi, 2023). Limbah gas adalah limbah yang berada dalam fase gas dan biasanya dihasilkan dari proses pembakaran dan emisi gas buang proses industri. Contohnya limbah dari cerobong asap suatu pabrik pengolahan yang mengandung karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), hidrokarbon (HC), ozon, metana (CH_4), dan partikulat matter.

3.2.3 Jenis Limbah Berdasarkan Senyawa

Limbah berdasarkan jenis senyawaan kimia diklasifikasikan menjadi limbah organik dan limbah anorganik. Pengklasifikasian limbah ini didasarkan pada struktur kimia dari limbah tersebut. Dengan mengetahui struktur kimia dari limbah tersebut, maka dapat diketahui karakteristik limbah dan penanganannya. Limbah organik adalah limbah yang didominasi oleh kandungan senyawa organik. Secara terminologi, senyawa organik adalah senyawa kimia yang mengandung unsur karbon (C) dan biasanya juga mengandung unsur hidrogen (H), serta sering kali unsur oksigen (O), dan nitrogen (N). Karbon adalah unsur inti yang membedakan senyawa organik dari senyawa anorganik (gambar 3.3). Senyawaan organik memiliki struktur yang sangat beragam, dari sederhana hingga sangat kompleks. Senyawa organik dapat ditemukan di berbagai bagian tubuh makhluk hidup. Limbah organik pada umumnya berasal dari hayati atau makhluk hidup,

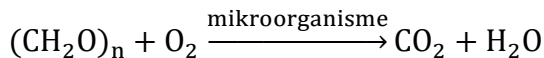
misalkan sisa makanan yang membusuk, dedaunan, ranting pohon, bangkai hewan, dan kotoran hewan (Saeni, 1989).



Gambar 3.3 Struktur Kimia Senyawa Organik

(Sumber: (Anonim, 2020))

Limbah organik dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme melalui proses dekomposisi atau komposisi. Dalam proses ini, mikroorganisme menguraikan limbah organik dengan bantuan oksigen (*aerob*) menjadi senyawa-senyawa sederhana seperti air, karbon dioksida, dan nutrisi yang bisa digunakan kembali oleh lingkungan. Reaksi kimia penguraian senyawa organik dengan bantuan mikroorganisme adalah sebagai berikut:



Limbah anorganik adalah limbah yang didominasi oleh kandungan senyawa anorganik. Secara terminologi, senyawa anorganik adalah senyawa kimia yang tidak mengandung unsur karbon-hidrogen (C-H) dalam struktur molekulnya. Senyawa anorganik terdiri dari unsur-unsur yang umumnya dianggap

sebagai unsur anorganik, seperti logam, non-logam, dan unsur yang ditemukan dalam mineral dan senyawa anorganik lainnya. Senyawa anorganik melibatkan interaksi antara unsur-unsur tersebut dalam berbagai macam bentuk dan struktur. Limbah anorganik berasal dari non-hayati atau yang tidak berasal dari organisme hidup. Limbah anorganik dapat meliputi plastik, logam, kaca, batu bata, keramik, dll.

Pada umumnya limbah anorganik sulit terurai oleh mikroorganisme, sehingga dapat bertahan lama dan terakumulasi di lingkungan. Plastik dan beberapa logam adalah contoh limbah anorganik yang bisa sangat persisten. Limbah anorganik, terutama jenis yang tidak mudah terurai, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan bahkan akumulasi dalam ekosistem. Plastik adalah salah satu contoh limbah anorganik yang banyak dihasilkan. Plastik dapat mengancam kehidupan laut karena jumlah timbulannya tidak dapat diurai oleh mikroorganisme. Terdapat berbagai jenis plastik berdasarkan jenis material penyusunnya. Jenis-jenis tersebut dipaparkan pada gambar 3.4. material jenis plastik ini perlu diketahui sebagai acuan dalam penggunaan dan pengelolaan limbah plastik.



Gambar 3.4 Jenis-jenis Plastik
(Sumber: (Anonim, 2015))

3.2.4 Jenis Limbah Berdasarkan Tingkat Bahaya

Berdasarkan tingkat bahaya limbah diklasifikasikan menjadi limbah B3 dan limbah non-B3. B3 merupakan singkatan dari Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Sifat bahaya yang dimaksud pada adalah potensi bahaya limbah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Limbah B3 adalah limbah yang mengandung bahan-bahan berbahaya atau beracun dalam bentuk kimia atau fisik. Limbah B3 dapat berupa senyawa beracun, reaktif, korosif, mudah terbakar, atau memiliki sifat infeksius. Contoh limbah B3 meliputi limbah medis, limbah kimia laboratorium, limbah elektronik yang mengandung logam berat, baterai, dan abu hasil pembakaran yang dapat berdampak pada kesehatan. Limbah B3 memiliki potensi menyebabkan bahaya serius terhadap kesehatan manusia dan lingkungan jika tidak dikelola dengan benar. Limbah B3 dapat mengakibatkan pencemaran tanah, air, dan udara, serta merusak ekosistem dan mengancam makhluk hidup. Limbah B3 diatur pada kebijakan Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3. Dalam kebijakan tersebut dicantumkan bahwa kegiatan pengelolaan limbah B3 meliputi pengurangan, penyimpanan, pengangkutan, pemanfaatan, pengolahan, dan penimbunan.

Limbah non-B3 adalah limbah yang umumnya tidak mengandung bahan-bahan berbahaya dan beracun atau memiliki tingkat bahaya yang lebih rendah dari limbah B3. Contoh limbah non-B3 meliputi limbah rumah tangga seperti sampah dapur, kertas, plastik, limbah konstruksi non-berbahaya, dan limbah kayu yang tidak terkontaminasi. Limbah non-B3 cenderung memiliki dampak yang lebih rendah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia jika dibandingkan dengan limbah B3. Namun pengelolaan limbah non-B3 tetap perlu diperhatikan karena apabila terdapat dalam jumlah berlebih maka dapat berdampak negatif pada ekologi lingkungan.

3.3 Permasalahan Limbah

Beberapa tahun terakhir, produksi sampah di Indonesia telah mencapai tingkat yang signifikan. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) Indonesia pada tahun 2020, total produksi sampah di Indonesia mencapai sekitar 67,8 juta ton per tahun. Angka ini termasuk sampah rumah tangga, sampah komersial, sampah industri, dan sampah lainnya. Selain itu, total timbunan limbah B3 yang dihasilkan di Indonesia adalah mencapai 60 juta ton pada tahun 2021 (KLHK, 2021) (Azzahra, 2020).

Limbah dapat menyebabkan pencemaran dan kerusakan lingkungan. Limbah yang tidak dikelola dengan baik dapat mencemari udara, air, dan tanah, serta merusak ekosistem dan keanekaragaman hayati. Emisi gas buang dari industri, kendaraan bermotor, dan pembakaran limbah dapat mencemari udara dengan polutan seperti nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), karbon monoksida (CO), dan partikulat matter (PM). Data kualitas udara kota Jakarta per tanggal 25 Agustus 2023 adalah AQI = 111 (berdasarkan $\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10}). Nilai ini tergolong sebagai kualitas udara yang kurang dari standar seharusnya (*poor*) dan dapat memberi dampak buruk terhadap kesehatan penduduk kota Jakarta terutama pada saluran pernapasan (Air Quality Index, 2023). Limbah cair dari industri, rumah tangga, dan pertanian yang terbuang ke sungai, danau, atau laut dapat mencemari air dengan bahan kimia beracun, nutrisi berlebih (eutrofikasi), dan zat-zat lain yang merusak kualitas air. Contohnya adalah pencemaran air oleh bahan kimia seperti merkuri, arsenik, atau limbah deterjen. Salah satu contoh kasus permasalahan limbah yang berdampak pada lingkungan perairan adalah kondisi sungai citarum, Jawa Barat. Sungai Citarum memiliki potensi ekonomi, ekologi dan sosial yang sangat penting di Jawa Barat. Namun berdasarkan hasil pemantauan kualitas air yang telah dilakukan, kualitas air sungai citarum mengalami penurunan. Potensi beban pencemaran senyawa organik tahun 2020 pada bagian hulu sungai mencapai 130,936 ton BOD per hari (Bukit and Yusuf, 2002).

Pantai-pantai di Indonesia tercemar oleh limbah plastik, terutama di daerah perkotaan dan pariwisata. Plastik sekali pakai seperti kemasan makanan dan minuman menjadi sumber utama pencemaran. Menurut (Jambeck *et al.*, 2015), diperkirakan bahwa Indonesia adalah penyumbang kedua terbesar limbah plastik ke laut setelah Tiongkok. Pada tahun 2015, Indonesia membuang sekitar 1,3 juta ton sampah plastik ke laut. Menurut sebuah penelitian yang diterbitkan dalam jurnal "*Nature Communications*" pada tahun 2020, Indonesia merupakan negara keenam terbesar yang menyumbang sampah plastik ke laut (Lebreton *et al.*, 2017). Laporan dari Ellen MacArthur Foundation menyebutkan bahwa pada tahun 2025, Indonesia bisa menjadi penyumbang terbesar limbah plastik ke laut jika tidak dilakukan tindakan yang berkelanjutan (Naf'an *et al.*, 2020).

Berdasarkan pemaparan di atas tentang permasalahan limbah, dapat disimpulkan bahwa limbah tidak hanya berdampak langsung pada lingkungan tetapi juga secara langsung terhadap kesehatan manusia. Pemaparan terhadap limbah berbahaya dan polutan lingkungan dapat mengakibatkan masalah kesehatan jangka pendek maupun jangka panjang. Limbah beracun atau berbahaya dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia yang tinggal di sekitar lokasi pembuangan limbah atau yang terpapar langsung. Gangguan pernapasan menjadi salah satu penyakit yang diakibatkan oleh pencemaran udara oleh limbah gas. Hal ini menyebabkan masalah pernapasan seperti asma, bronkitis, dan infeksi saluran pernapasan. Partikulat matter dan polutan udara lainnya dapat merusak jaringan paru-paru dan memicu peradangan. Paparan bahan kimia berbahaya dalam limbah padat maupun cair juga dapat berdampak pada kulit, contohnya iritasi kulit, dermatitis, atau bahkan reaksi alergi pada kulit. Tidak hanya itu, limbah juga dapat berdampak pada masalah kesehatan reproduksi. Bahan kimia beracun dalam limbah dapat memiliki dampak negatif pada sistem reproduksi manusia, menyebabkan gangguan hormon, kelainan reproduksi, atau kesulitan dalam konsepsi (infertilitas) (Giusti, 2009).

Dampak buruk limbah dapat menyebabkan risiko kanker, saraf, dan toksik. Beberapa bahan kimia dalam limbah dianggap bersifat karsinogenik (zat yang dapat menyebabkan kanker). Pemaparan

jangka panjang terhadap limbah beracun dapat meningkatkan risiko perkembangan kanker tertentu. Dampak buruk limbah juga dapat menjurus pada gangguan sistem saraf. Bahan kimia neurotoksin dalam limbah dapat mempengaruhi sistem saraf manusia, menyebabkan gangguan neurologis seperti masalah kognitif, gangguan perilaku, dan gangguan neurologis lainnya. Logam berat pada limbah cair dapat bersifat toksik dan menyebabkan kematian. Akumulasi jumlah logam berat dalam darah dapat menghambat fungsi darah untuk transpor zat ke seluruh sehingga dapat menyebabkan kematian (World Health Organization, 2015).

3.4 Solusi Permasalahan Limbah

Permasalahan limbah yang telah dipaparkan sebelumnya menginisiasi tindakan yang perlu dilakukan untuk meminimalisir dampak buruk limbah terhadap lingkungan dan kesehatan. Beberapa tindakan sebagai solusi permasalahan limbah dijelaskan sebagai berikut:

3.4.1 Pengelolaan Limbah Melalui Kebijakan Pemerintah

Pengelolaan limbah mencakup serangkaian kegiatan yang bertujuan untuk mengurangi dampak buruk limbah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Kegiatan-kegiatan ini melibatkan berbagai tahap, mulai dari pengurangan di sumbernya hingga pemantauan dampak limbah yang dihasilkan. Kegiatan pengelolaan limbah meliputi pengurangan, penyimpanan, pengumpulan, pengangkutan, pemanfaatan, pengolahan, dan/atau penimbunan. Kebijakan pemerintah Indonesia terkait pengelolaan limbah telah mengalami perkembangan seiring waktu, dengan tujuan untuk mengurangi dampak buruk limbah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Berikut adalah beberapa kebijakan pemerintah Indonesia terkait pengelolaan limbah yang telah dilakukan antara lain :

- 1) Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Undang-undang ini mengatur tentang perlindungan, pengelolaan, dan pemulihan lingkungan hidup, termasuk pengelolaan limbah. Undang-undang ini mendorong pengurangan, pemanfaatan kembali, dan daur ulang limbah serta penanganan limbah berbahaya dan beracun.

- 2) Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga. Peraturan ini mengatur tentang pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenisnya, termasuk pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pembuangan sampah.
- 3) Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Peraturan ini mengatur tentang pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), meliputi penghasiian, pengangkutan, pengelolaan, dan pemantauan limbah B3.
- 4) Rencana Aksi Nasional Pengurangan Limbah Plastik Laut. Indonesia memiliki rencana aksi untuk mengurangi limbah plastik laut yang mencakup beberapa strategi, seperti pembatasan penggunaan plastik sekali pakai, peningkatan daur ulang, dan penanganan limbah plastik di daerah pesisir.
- 5) Gerakan Nasional Indonesia Bersih dari Sampah 2020-2025. Gerakan ini bertujuan untuk mewujudkan Indonesia yang bersih dari sampah melalui aksi konkret seperti edukasi masyarakat, kampanye pengurangan plastik sekali pakai, dan pengembangan infrastruktur pengelolaan sampah.
- 6) Inisiatif Daerah Bebas Sampah. Beberapa daerah di Indonesia telah menginisiasi program Daerah Bebas Sampah yang berfokus pada pengurangan sampah, daur ulang, dan pemanfaatan energi dari limbah. Upaya ini telah dilakukan di Solo, Malang, Bali, Surabaya, Makassar, dan Bogor.

Hukum dan kebijakan yang ada dibuat untuk mengikat manusia secara individu dan kelompok. Hukum dan kebijakan yang ada tidak akan memiliki arti apabila tidak ditegakkan. Pengelolaan limbah yang baik memerlukan kerjasama antara pemerintah, industri, masyarakat, dan sektor terkait lainnya untuk mencapai tujuan minimalisasi dampak buruk limbah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

3.4.2 Edukasi dan Sosialisasi

Telah dipaparkan sebelumnya bahwa timbulnya limbah disebabkan oleh aktivitas manusia. Manusia sebagai makhluk individual adalah penyumbang limbah itu sendiri. Permasalahan ini memicu pentingnya untuk memupuk kesadaran manusia sebagai makhluk individu untuk meminimalisir dampak buruk limbah. Upaya untuk memupuk kesadaran manusia dalam perannya meminimalisir dampak buruk limbah dapat dilakukan melalui kegiatan sosialisasi dan edukasi.

Edukasi dan sosialisasi membantu meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan limbah yang baik. Ketika masyarakat mengerti dampak buruk limbah terhadap lingkungan dan kesehatan, mereka lebih cenderung untuk mengambil langkah-langkah pencegahan. Dengan adanya sosialisasi dan edukasi ini, masyarakat dapat mempelajari cara-cara praktis untuk mengurangi pembentukan limbah, melakukan pemilahan sampah, dan mendaur ulang. Pengetahuan ini dapat mendorong perubahan perilaku yang lebih ramah lingkungan. Dengan adanya perubahan perilaku, maka hal ini dapat mendorong partisipasi masyarakat dalam upaya meminimalisir dan mengelola limbah. Dengan melibatkan masyarakat dalam program pengelolaan limbah, mereka merasa memiliki tanggung jawab dalam menjaga kebersihan lingkungan.

Ketergantungan pada bahan sekali pakai juga menjadi permasalahan terhadap pengendalian jumlah limbah, terutama limbah padat. Gaya hidup masyarakat yang sering menggunakan bahan sekali pakai sulit untuk diatasi sebab hal ini telah menjadi

budaya dalam kehidupan sehari-hari. Contoh bahan sekali pakai antara lain kantong plastik, gelas sekali pakai, piring sekali pakai, pakaian sekali pakai, sulit untuk di. Budaya bahan sekali pakai menyebabkan peningkatan jumlah limbah plastik dan non-biodegradable yang sulit terurai di alam. Dengan demikian, sosialisasi dan edukasi juga perlu dilakukan untuk mengubah pola pikir masyarakat untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan sekali pakai.

Beberapa kegiatan konkrit sosialisasi dan edukasi sebagai upaya meminimalisir dampak buruk limbah yang telah dilakukan di Indonesia adalah sebagai berikut :

- 1) Kampanye Pengurangan Plastik Sekali Pakai
- 2) Program Edukasi di Sekolah
- 3) Pelatihan Pemilahan Sampah di Masyarakat
- 4) Kampanye Lestarian Lingkungan Bersama Selebriti
- 5) Gerakan Pengurangan Pemakaian Kantong Plastik
- 6) Kampanye Daur Ulang dan Kreasi dari Limbah
- 7) Program Pemberdayaan Ekonomi Berbasis Limbah
- 8) Pameran dan Festival Lingkungan
- 9) Program "Kampung Bersih"
- 10) Kampanye Pemilahan Sampah Rumah Tangga

3.4.3 Penerapan Konsep 5R oleh Individu, Masyarakat, dan Industri

Prinsip pengelolaan limbah yang umum dikenal oleh masyarakat adalah konsep 3R, yaitu *reduce*, *reuse*, dan *recycle*. Konsep ini populer dikalangan masyarakat pada tahun 90-an yang awalnya diinisiasi oleh pemerintah Jepang yang kemudian diadopsi oleh Kementerian Lingkungan Hidup. Konsep ini kemudian mendapatkan banyak perhatian dari masyarakat, lembaga non-pemerintah, dan swasta sebagai upaya mengurangi dampak negatif limbah melalui kegiatan kampanye, sosialisasi, dan edukasi.

Konsep 3R kini diadaptasi menjadi menjadi konsep 5R dengan pengembangan upaya pengolahan yang lebih kompleks. 5R ini adalah *reduce, reuse, recycle, recover, dan repair*. Konsep 5R ini digagas oleh Kementerian Perindustrian sebagai upaya menciptakan indonesia bersih yang sejalan dengan *circular economy* dan program Making Indonesia 4.0 (Finaka, Nurhanisah and Putra, 2019). Istilah 5R ini tidak hanya digunakan untuk terminologi sampah atau limbah padat, tapi juga berlaku untuk limbah jenis lain, terutama limbah industri. Lima R dalam konsep 5R meliputi:

- 1) *Reduce*, adalah mengurangi jumlah limbah yg dihasilkan dengan mengurangi jumlah pemakaian atau konsumsi bahan. Contoh *reduce* adalah pengurangan penggunaan kemasan plastik sebagai pembungkus makanan minuman agar tidak menambah jumlah sampah plastik yang menyebabkan permasalahan lingkungan. Hal ini dapat dilakukan dengan penggunaan tas kain untuk menyimpan barang bawaan untuk mengurangi penggunaan plastik yang hanya sekali pakai. Contoh *reduce* di industri adalah mengontrol penggunaan bahan baku produksi agar diperoleh limbah seminim mungkin.
- 2) *Reuse*, adalah menggunakan kembali limbah dengan fungsi yang sama di awal tanpa melalui proses pengolahan. Contoh *reuse* di kehidupan sehari-hari adalah botol air yang sudah dipakai dapat digunakan kembali sebagai wadah minuman dengan fungsi yang sama untuk menyimpan air.
- 3) *Recycle*, menggunakan kembali limbah melalui proses pengolahan tertentu dengan fungsi yang berbeda dengan fungsi awal. Contoh *recycle* adalah penggunaan limbah tempurung kelapa dan ampas tebu untuk diolah menjadi briket arang yang akan digunakan sebagai bahan bakar kebutuhan rumah tangga. Contoh lain *recycle* adalah sampah organik rumah tangga diolah menjadi pupuk kompos untuk menyuburkan tanaman.

Selain itu, sampah organik rumah tangga juga dapat diolah menjadi gas metana (CH_4) melalui proses fermentasi anaerob.

- 4) *Recovery*, adalah memperoleh kembali melalui proses pengolahan tertentu agar limbah yang dihasilkan dapat digunakan kembali dengan fungsi yang sama dengan fungsi awal. Contoh *recovery* adalah perolehan kembali material kayu dan baja pada konstruksi bangunan yang sudah tidak digunakan lagi atau telah dibongkar. Material ini dapat diolah kembali untuk digunakan dalam proyek pembangunan dengan fungsi yang sama.
- 5) *Repair*, adalah melakukan perbaikan terhadap limbah agar digunakan kembali dengan fungsi yang sama dengan fungsi awal. Contoh *repair* adalah memperbaiki barang elektronik yang telah rusak agar dapat digunakan kembali dengan fungsi yang sama dengan tujuan memperpanjang masa pakai barang tersebut.

Beberapa referensi mengganti huruf R yang ke-5 (*repair*) menjadi *remove* (pemusnahan). Hal ini disesuaikan dengan upaya pengolahan yang cocok dengan jenis dan karakteristik limbah. *Remove* adalah menghancurkan atau memusnahkan limbah dengan metode tertentu agar tidak merusak lingkungan. Contohnya *remove* adalah proses insinerasi limbah padat yang dilakukan melalui pembakaran pada suhu tinggi agar mengurangi massa dan volume limbah.

DAFTAR PUSTAKA

- Air Quality Index (2023) *Jakarta Indeks Kualitas Udara (AQI): PM2.5, PM10 polusi udara waktu-nyata di Indonesia, AQI*. Available at: <https://www.aqi.in/id/dashboard/indonesia/jakarta> (Accessed: 27 August 2023).
- Anonim (2015) *Jenis dan Tipe Plastik, Arah Environment*. Available at: <https://arahenvironmental.com/jenis-dan-tipe-plastik/> (Accessed: 27 August 2023).
- Anonim (2020) *Organic Chemistry, Libretexts Chemistry*. Available at: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry (Accessed: 27 August 2023).
- Asnawi, I. (2023) 'Parameter Kualitas Air', in *Analisis Kualitas Lingkungan*. Indonesia: Get Press Indonesia, pp. 101–121.
- Azzahra, T. A. (2020) *Menteri LHK: Timbunan Sampah di Indonesia Tahun 2020 Capai 67,8 Juta Ton*, *Detik News*. Available at: <https://news.detik.com/berita/d-5046558/menteri-lhk-timbunan-sampah-di-indonesia-tahun-2020-capai-678-juta-ton> (Accessed: 27 August 2023).
- Bukit, N. T. and Yusuf, I. a. (2002) 'Beban Pencemaran Limbah Industri Dan Status Kualitas Air Sungai Citarum', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 3(39), pp. 98–106.
- Finaka, A. W., Nurhanisah, Y. and Putra, G. D. (2019) *Prinsip 5R Untuk Ciptakan Indonesia Bersih, Indonesia Baik.id*. Available at: <https://indonesiabaik.id/infografis/prinsip-5r-untuk-ciptakan-indonesia-bersih#> (Accessed: 24 August 2023).
- Giusti, L. (2009) 'A review of waste management practices and their impact on human health', *Waste Management*, 29(8), pp. 2227–2239. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.028>.
- Jambeck, J. R. *et al.* (2015) 'Plastic waste inputs from land into the ocean', *Science*, 347(6223), pp. 768–771.

- KLHK, K. B. H. M. (2021) *Refleksi KLHK 2021: Capaian Pengelolaan Sampah, Limbah Dan B3*. Available at: <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaranpers/6344/refleksi-klhk-2021-capaian-pengelolaan-sampah-limbah-dan-b3> (Accessed: 4 July 2023).
- Lebreton, L. C. M. *et al.* (2017) 'River plastic emissions to the world's oceans', *Nature communications*, 8(1), p. 15611.
- Mishra, K. *et al.* (2023) 'Waste-to-chemicals: Green solutions for bioeconomy markets', *Science of the Total Environment*, 887(December 2022), p. 164006. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164006.
- Nafan, S. M. *et al.* (2020) 'Rencana Aksi Nasional Memerangi Sampah Laut Sebagai Bentuk Implementasi SDGs 14: Kehidupan di Bawah Laut', *Jurnal ISIP: Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik*, 17(2), p. 95. doi: 10.36451/j.isip.v17i2.50.
- Pemerintah Republik Indonesia (2009) *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Indonesia.
- Saeni, M. S. (1989) *Kimia Lingkungan*. Bogor: IPB Press.
- World Health Organization, R. O. for E. (2015) *Waste and human health: evidence and needs: WHO meeting report 5–6 November 2015: Bonn, Germany*. World Health Organization. Regional Office for Europe.

BAB 4

KATALIS DAN *GREEN CHEMISTRY*

Oleh Hijratur Rahmi

4.1 Pendahuluan

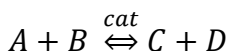
Proses reaksi kimia selama ini menghasilkan limbah dalam kondisi beragam dimulai dari batas aman hingga berbahaya. Hal ini tentunya menjadi *concern* berbagai pihak untuk segera menyelesaikan akibat yang ditimbulkan dari proses kimia tersebut. Beragam upaya dilakukan agar reaksi kimia yang dilakukan dapat menggunakan bahan ramah lingkungan begitu juga dengan limbah yang dihasilkan agar dapat tidak membahayakan lingkungan sekitar. Istilah *green chemistry* atau kimia hijau yang belakangan marak digunakan merupakan salah satu bentuk upaya yang dilakukan untuk menciptakan reaksi yang ramah lingkungan dan bersifat *sustainable* atau berkesinambungan. Keadaan ini tidak hanya mendukung pelaksanaan reaksi kimia yang bersifat ramah lingkungan akan tetapi juga mendukung untuk menghasilkan limbah yang lebih ramah terhadap alam serta tidak mencemari lingkungan sekitar. Menurut Prof. Dr. Hartati, M.Si, perkembangan dalam industri kimia harus dibarengi dengan upaya perlindungan lingkungan, salah satunya dengan menerapkan prinsip *green chemistry* (Unair, 2021). Pada konsep *green chemistry*, pemakaian bahan dan reagen kimia dalam suatu reaksi kimia yang berpotensi menghasilkan limbah yang dapat mencemari lingkungan dikurangi atau sedapat mungkin untuk diganti. Penggunaan katalis dalam suatu reaksi kimia menjadi alternatif utama untuk memperpendek rute reaksi dan menurunkan tingkat limbah yang dihasilkan (Utomo, 2010). Oleh karenanya, aktivitas *green chemistry* menjadi suatu upaya untuk menggunakan bahan dasar dan katalis yang ramah lingkungan, menjadikan reaksi yang lebih efisien, meminimalisir limbah berbahaya dan menghindari

penggunaan reagen bersifat toksik atau berbahaya bagi lingkungan sekitar demi menjaga lingkungan lebih baik.

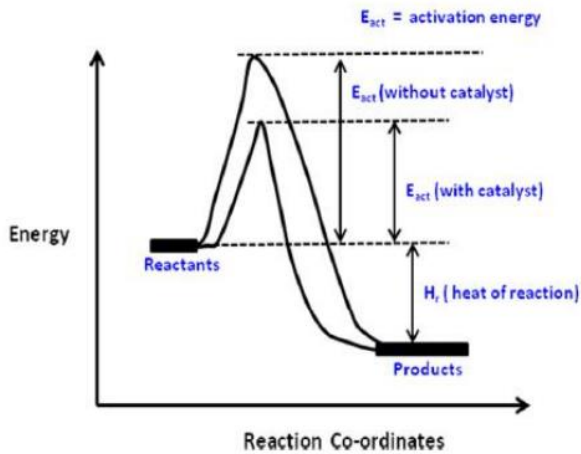
4.2 Katalis

4.2.1 Konsep Katalis

Katalis merupakan senyawa kimia yang mempercepat laju suatu reaksi kimia yang dicampurkan dalam jumlah yang lebih rendah secara stoikiometri (antara 10^{-6} dan 10^{-1}) dan secara teori tidak terlibat dalam reaksi. Katalis memiliki fungsi untuk membantu terjadinya reaksi dengan mengikat reaktan dan menurunkan energi keadaan transisi (Kosinov, 2020). Reaksi kimia yang menggunakan katalis disebut dengan reaksi katalitik. Dalam proses reaksi, katalis dituliskan seperti berikut ini:



Katalis tidak mempengaruhi termodinamika suatu reaksi akan tetapi katalis dapat mengubah jalur reaksi, misalnya kinetika reaksi yang dapat berubah dengan menurunkan energi keadaan transisi dan mempercepat laju reaksi satu kali maupun yang timbal balik. Data karakteristik menggunakan katalis yaitu TOF (*turnover frequency*) dan TON (*turnover number*). Karakteristik penting lainnya dari sebuah katalis adalah selektivitas katalis. Perbedaan katalis yang digunakan dapat menghasilkan perbedaan distribusi produk dari senyawa reaktan yang sama. Oleh karena itu, penting untuk memahami karakter dari senyawa reaktan dan katalis yang akan digunakan agar proses reaksi dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan, efektif, dan efisien.



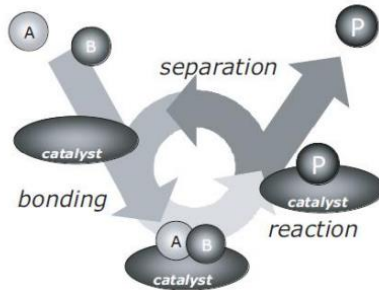
Gambar 4.1 Perbandingan Energi Aktivasi Menggunakan dan Tanpa Menggunakan Katalis
(Sumber : Asst. Professor. A. Al Mosawi)

Katalis merupakan senyawa yang sangat berpengaruh dalam industri kimia. Hampir sekitar 85-90% dalam proses industri kimia menggunakan proses katalitik. Katalis digunakan dalam empat sektor utama ekonomi dunia yang melibatkan proses katalitik yaitu (Chorkendorff and Niemantsverdriet, 2003):

- Produksi bahan bakar transportasi dan energi; seperti bensin, solar, minyak pemanas dan bahan bakar minyak
- Produksi bahan kimia dan polimer; contoh plastic, karet sintetis, kain dan kosmetik
- Produksi energi yang bebas polusi dari sumber energi terbarukan seperti gas Hidrogen untuk bahan bakar sel dan bahan bakar transportasi dari biomassa
- Pencegahan polusi dengan menghindari pembentukan limbah (produk samping yang tidak diinginkan seperti CO_x , SO_x , NO_x)
- Farmasi dan industri makanan

4.2.2 Konsep Katalisis

Katalis mempercepat reaksi kimia dengan membentuk ikatan terhadap molekul yang bereaksi kemudian saat terbentuk produk, katalis terlepas dan tidak berubah sehingga dapat digunakan kembali untuk reaksi selanjutnya. Gambaran reaksi katalitik antara dua molekul terlihat seperti gambar berikut ini.



Gambar 4.2 Tahapan Dasar Siklus Reaksi Katalitik
(Sumber : Asst. Professor. A. Al Mosawi)

Siklus dimulai dari ikatan antar molekul A dan B ke katalis. A dan B kemudian bereaksi dalam bentuk senyawa kompleks sehingga menghasilkan produk P yang terikat pada katalisator. Pada langkah akhir, P terpisah dari katalis sehingga meninggalkan reaksi siklus dan katalis tetap tinggal seperti keadaan awal. Namun tidak semua reaksi akan berjalan berhasil seperti teori tersebut. Ada beberapa kondisi yang akan menyebabkan kombinasi katalis dengan reaktan atau produk tidak akan berhasil, seperti keadaan berikut:

- Jika ikatan antara reaktan dan katalis terlalu lemah, hampir tidak akan ada konversi A dan B menjadi produk P
- Jika ikatan antara katalis dan salah satu reaktan juga kuat, katalis sebagian besar akan diisi dengan reaktan kuat tersebut dan reaktan lainnya tidak di dalam produk
- Jika A dan B keduanya membentuk ikatan yang kuat dengan katalis, situasi perantara dengan A atau B pada katalis mungkin sangat stabil sehingga reaksi menjadi tidak mungkin terjadi, dan energi aktivasi untuk

membentuk P pada katalis terlalu tinggi. Katalisator dapat diracuni oleh (salah satu) reaktan

- Dengan cara yang sama, produk P mungkin terikat terlalu kuat pada katalis saat proses pemisahan terjadi. Dalam hal ini produk meracuni katalis (Kakaei, Esrafil and Ehsani, 2019).

4.2.3 Jenis-Jenis Reaksi Katalitik

- Katalisis asam dan basa
Biasanya terjadi dalam reaksi kimia organik seperti hidrolisis ester dan reaksi katalisis logam transisi homogen seperti proses Monsanto.
- Elektrokatalisis
Katalisis transfer rantai elektron atau katalisis transfer rantai atom.
- Foto katalisis
Sebuah reaksi induksi yang menggunakan Cahaya sebagai katalisnya.
- Katalisis redox
Katalisis reduksi atau oksidasi. Katalisis jenis ini dapat didapat dalam sebuah reaksi dengan fasa homogen (reagen kimia, fotokimia, biologi) atau heterogen menggunakan katalis redok organik, inorganik atau organometalik.
- Katalisis Homogen
Proses reaksi yang semua senyawa terlibat larut dalam fase cair termasuk katalis, molekul kompleks logam transisi, logam golongan utama, lantanida atau aktinida. Keuntungan dari katalisis ini adalah laju yang sangat tinggi, minim zat beracun, selektivitas tinggi, kondisi normal, dan mekanisme cenderung diketahui. Kekurangannya adalah katalis ini sulit untuk dipisahkan di akhir reaksi sehingga menimbulkan permasalahan biaya (harga katalis dan kelangkaan katalis), sulit memperoleh kondisi awal katalis, jangka penggunaan

lebih singkat serta adanya masalah lingkungan (pencemaran produk karena adanya produk samping).

➤ Katalisis Heterogen

Katalis tidak terlarut dalam reaksi dan mudah untuk difiltrasi atau dipisahkan dari reaksi akhir. Katalis ini dapat dipanaskan dalam suhu tinggi jauh melampaui suhu yang dapat didukung oleh katalis homogen. Keuntungan menggunakan katalis ini adalah dapat digunakan kembali, dapat digunakan dalam waktu yang lama, dan lebih murah dibandingkan katalis homogen. Katalis ini sensitive terhadap racun, selektivitas lebih rendah, membutuhkan energi yang tinggi selama proses reaksi, dan proses mekanisme reaksi cenderung sulit dipahami.

➤ Katalisis Support

Katalis homogen diimmobilisasi pada sebuah support/ pendukung yang bertujuan untuk mendapatkan keuntungan dari sifat ringan, efisien, dan selektivitas terhadap reaksi dan pemisahan yang mudah terhadap katalis di akhir reaksi.

➤ Katalisis metallodendritik

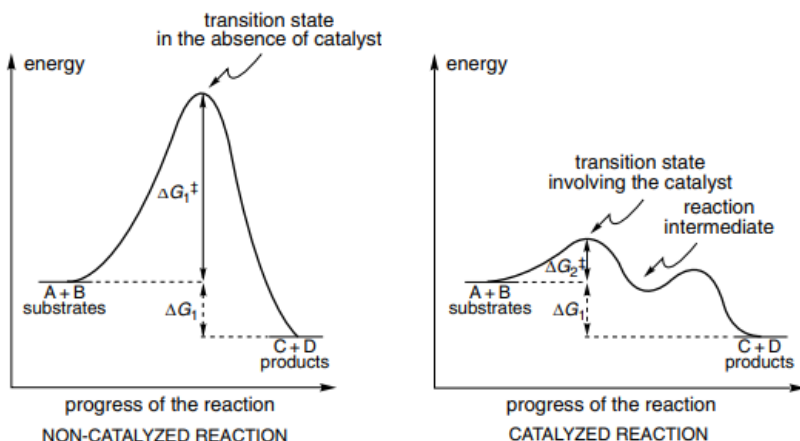
Katalis dipasang di dalam atau di pinggiran dendrimer yang memungkinkan katalisis homogen, tetapi katalis metallodendritik mudah dipisahkan dari endapan, ultrafiltrasi menggunakan membran.

➤ Katalisis dua fasa

Katalis homogen dilarutkan dalam air yang dikenali oleh gugus fungsi pelarut air ke ligan yang bertujuan untuk memisahkan katalis dalam fase air dengan dekantasi produk organik pada akhir reaksi.

➤ Katalisis enzimatik

Katalisis oleh enzim sangat efisien, tetapi juga sangat kompleks dan sulit dipahami (Didier, 2011).



Gambar 4.3 Perbandingan Profil Reaksi Menggunakan Katalis dan Tidak Menggunakan Katalis
(Sumber : (Didier, 2011))

Perkembangan katalis yang membawa keefektifan, efisien dan selektivitas yang tinggi mengarahkan kepada penggunaan katalis yang ramah lingkungan. Usaha untuk meningkatkan katalis dalam proses katalisis ini dinamakan aspek kimia hijau atau *green chemistry*.

4.3 Green Chemistry

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang begitu meningkat, memberikan pengaruh pula terhadap perkembangan industri. Produksi pembuatan berbagai barang diiringi dengan proses yang semakin canggih. Sebagian besar proses produksi hanya berfokus kepada hasil produksi, waktu yang dihabiskan dan *cost* yang dikeluarkan. Proses pembuatan produk kimia tersebut cenderung tidak memperhatikan hal yang berkaitan dengan sumber daya yang berkelanjutan dan dampak terhadap lingkungan. Akan tetapi, saat ini telah ada kelompok-kelompok yang memperhatikan hal tersebut bertujuan untuk mengatasi masalah yang ditimbulkan dan memberikan kemajuan di bidang industri kimia. Permasalahan

tersebut diselesaikan dengan pokok ide yang dinamakan *green chemistry* atau kimia hijau atau kimia ramah lingkungan.

Konsep *green chemistry* sendiri bukanlah hal yang baru-baru ini terpikirkan oleh para ilmuwan. Sejak bermulanya evolusi di bidang industri kimia, para ilmuwan sudah mempersiapkan diri untuk menggunakan prinsip ini dalam formulasinya terutama sejak berkembangnya proses katalitik heterogen petrokimia di tahun 1930-an. Awal tahun 1990-an, beberapa jurnal saintifik telah secara khusus melakukan penelitian di bidang kimia hijau dan mulai menerbitkan penelitian dan artikel terkait bidang ini. Saat ini, hampir semua penerbit besar telah memiliki jurnal khusus membahas terkait kimia ramah lingkungan atau berkelanjutan serta penerbitan buku juga dilakukan untuk membantu pendidikan dan penelitian (Török and Dransfield, 2018).

Menurut US EPA (*Environmental Protection Agency*), kimia hijau merupakan penggunaan bahan kimia dan proses kimiawi yang bertujuan untuk mencegah polusi (pencemaran), dan merancang produk kimia serta proses yang lebih ramah lingkungan (Sidjabat, 2018). *Green chemistry* berkaitan dengan hampir semua bidang kimia seperti kimia organik, kimia anorganik, biokimia, dan kimia analitik. Konsep ini mengarah kepada pengaplikasiannya di bidang industri. Beberapa metode yang dianggap sebagai sintesis yang *sustainable* dikembangkan jauh lebih awal dari konsep *green chemistry*. Teknologi kimia hijau dapat dikelompokkan menjadi beberapa hal berikut berdasarkan hal yang digunakannya:

1. Jalur sintesis alternatif
2. Kondisi reaksi alternatif
3. Penggunaan bahan kimia yang lebih aman (Sidjabat, 2018).

4.3.1 Prinsip *Green Chemistry*

Prinsip-prinsip utama dasar *green chemistry* awalnya ditetapkan oleh Paul Anastas dan John Warner tahun 1998 seperti terlihat di Gambar 4.5 di bawah ini.

1. It is better to prevent waste than to treat or clean up waste after it is formed.
2. Synthetic methods should be designed to maximize the incorporation of all materials used in the process into the final product.
3. Wherever practicable, synthetic methodologies should be designed to use and generate substances that possess little or no toxicity to human health and the environment.
4. Chemical products should be designed to preserve efficacy of function while reducing toxicity.
5. The use of auxiliary substances (e.g. solvents, separation agents, etc.) should be made unnecessary wherever possible and, innocuous when used.
6. Energy requirements should be recognized for their environmental and economic impacts and should be minimized. Synthetic methods should be conducted at ambient temperature and pressure.
7. A raw material or feedstock should be renewable rather than depleting wherever technically and economically practicable.
8. Unnecessary derivatization (blocking group, protection/deprotection, temporary modification of physical/chemical processes) should be avoided whenever possible.
9. Catalytic reagents (as selective as possible) are superior to stoichiometric reagents.
10. Chemical products should be designed so that at the end of their function they do not persist in the environment and break down into innocuous degradation products.
11. Analytical methodologies need to be developed further to allow for real-time in-process monitoring and control prior to the formation of hazardous substances.
12. Substances and the form of a substance used in a chemical process should be chosen so as to minimize the potential for chemical accidents, including releases, explosions, and fires.

Gambar 4.4 12 Prinsip Dasar *Green Chemistry*
(Sumber :Tang, Smith and Poliakoff, 2005)

Setelah diamati, Tang dan kawan-kawannya memberikan sedikit pengubahan terhadap prinsip dasar tersebut dengan membuatnya menjadi akronim yang hanya terdiri dari dua atau tiga kata demi kemudahan dalam memahami dan mengingatnya. Akronim tersebut dikenal dengan nama “PRODUCTIVELY” yang artinya yaitu sebagai berikut (Tang, Smith and Poliakoff, 2005):

- **Prevent wastes**
- **Renewable materials**
- **Omit derivatization steps**
- **Degradable chemical products**
- **Use safe synthetic methods**
- **Catalytic reagents**
- **Temperature, pressure ambient**
- **In-Process monitoring**
- **Very few auxiliary substances**
- **E-factor, maximize feed in product**
- **Low toxicity of chemical products**
- **Yes it's safe**

Pada konsep tersebut, dapat dibahasakan sebagai berikut:

1. Lebih mengedepankan usaha mencegah timbulnya limbah dibandingkan usaha untuk menangani limbah setelah proses produksi
2. Efisiensi atom
3. Mengurangi pemakaian bahan kimia yang berbahaya atau racun
4. Mendesain produk yang ramah lingkungan
5. Meningkatkan usaha penggunaan pelarut dan bahan kimia lain yang tidak berbahaya
6. Mendesain pemakaian energi yang efisien
7. Mengutamakan penggunaan baha dasar yang dapat diperbaharui
8. Melakukan proses sintesis yang relative lebih pendek
9. Mengutamakan reaksi katalisis dibandingkan reaksi stoikiometri
10. mendesain produk yang dapat didaur ulang
11. melakukan metode analitik pada usaha pencegahan polusi
12. minimalisasi potensi kecelakaan kerja(Utomo, 2010).

Oleh karena setiap produk melibatkan bahan kimia di dalam persiapan maupun produksinya, maka perlu dilakukan pengubahan baik dari segi persiapan maupun produksi tersebut. Hal tersebut dipersiapkan agar produksi dengan mengedepankan teknologi berkelanjutan serta penggunaan bahan ramah lingkungan dapat tercipta. Demi mendukung upaya tersebut berjalan secara global bukan hanya sebatas penelitian di laboratorium tetapi menjangkau ke produksi industri, maka Anastas dan Zimmerman mengembangkan seperangkat prinsip yang mirip di bidang teknik (Török and Dransfield, 2018). Prinsip tersebut adalah (Tang *et al.*, 2008):

- I – Inherently non-hazardous and safe
- M- Minimize material diversity
- P- Prevention instead of treatment
- R- Renewable material and energy inputs
- O- Output-led design
- V- Very simple
- E- Efficient use of mass, energy, space and time
- M- Meet the need
- E- Easy to separate by design
- N- Networks for exchange of local mass and energy
- T- Test the life cycle of the design
- S- Sustainability throughout product life cycle

Istilah *green chemistry* yang lebih disukai oleh industri adalah teknologi berkesinambungan (*sustainable technologies*) yang merupakan tujuan dari kimia hijau itu sendiri. Teknologi berkesinambungan bertujuan untuk mempertahankan keadaan alam atau mengurangi kerusakan yang diakibatkan oleh industri yang menggunakan bahan kimia sehingga alam dapat terjaga hingga masa depan yang akan datang.

4.2.2 Faktor Lingkungan, Utilisasi Atom dan Peran Katalisis

Beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam meminimalisir limbah pada suatu proses kimia adalah faktor lingkungan (*E-Factor*), efisiensi atom (*Atom Efficiency*), dan peran katalisis (Sidjabat, 2018).

1. Faktor Lingkungan (*E-Factor*)

Faktor lingkungan dikemukakan oleh Roger Sheldon yang menyatakan bahwa faktor lingkungan (*e-factor*) merupakan massa limbah yang dihasilkan terhadap massa produk yang diinginkan dalam berbagai segmen industri kimia. Semakin kecil nilai *e-factor* yang dihasilkan, maka akan semakin baik karena artinya semakin sedikit limbah yang dihasilkan. *E-factor* merupakan faktor yang diterima secara umum dan digunakan dalam industri kimia dan farmasi (Török and Dransfield, 2018). Berikut contoh faktor E pada beberapa industri kimia.

Tabel 4.1 Faktor E Pada Beberapa Industri Kimia

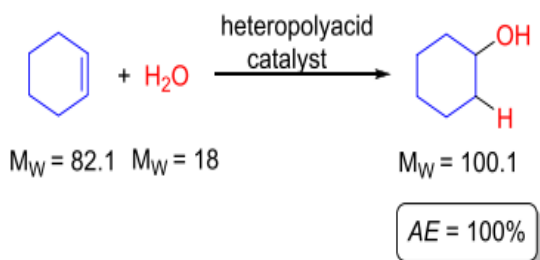
Sumber:(Utomo, 2010)

No	Segmen Industri	Produk (ton) ^{a)}	Limbah (kg/kg produk) ^{b)}
1	Pemurnian minyak	10 ⁶ – 10 ⁸	<1
2	<i>Bulk chemical</i>	10 ⁴ – 10 ⁶	<1 – 5
3	<i>Fine chemical</i>	10 ² – 10 ⁴	5 - >50
4	Farmasi	10 – 10 ²	25 - >100

- Volume produk per tahun
- Semua yang dihasilkan kecuali produk yang diinginkan (termasuk garam anorganik, hilangnya pelarut dan lainnya)(Utomo, 2010).

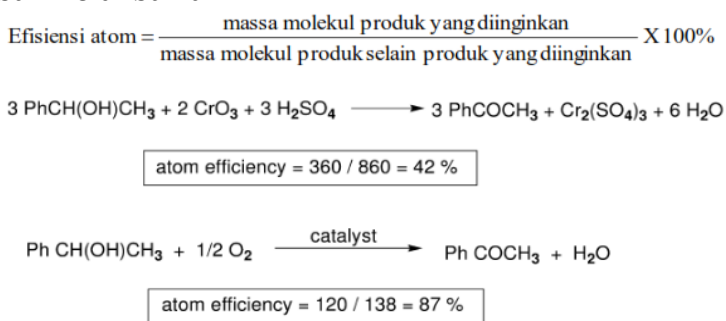
2. Efisiensi Atom

Efisiensi atom didefinisikan pertama kali oleh Trost tahun 1991 yaitu sebagai rasio massa molar produk yang diinginkan terhadap massa molar semua hasil reaksi pada reaksi stoikiometrik. Efisiensi atom diasumsikan sebagai hasil 100% sehingga dapat digunakan untuk menilai suatu reaksi pada tingkat teoritis. Perhatikan Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Skema Hidrasi Sikloheksen Menjadi Sikloheksanol; proses efisiensi atom 100%
(Sumber : (Tang, Smith and Poliakoff, 2005))

Pada gambar di atas terlihat AE yang bernilai 100% artinya tidak ada produk samping yang dihasilkan pada reaksi tersebut sehingga hasil yang didapatkan bernilai 100%. Perhitungan efisiensi atom dapat dilihat pada contoh Gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.6 Efisiensi Atom Kondisi Stoikiometrik Pada Reaksi Oksidasi Alkohol
(Sumber: (Utomo, 2010))

3. Katalisis

Reaksi katalisis tidak hanya membantu reaksi berlangsung dengan cepat akan tetapi juga membantu menghasilkan produk dengan selektivitas yang lebih tinggi. Rute reaksi katalitik seringkali dapat didisain berdasarkan material yang digunakan dalam reaksi sehingga reaksi dapat berjalan lebih efisien dan meminimalisir limbah yang dihasilkan. Tabel 4.2 memberikan contoh proses terbesar yang menggunakan katalis heterogen.

Tabel 4.2 Proses Reaksi Kimia Terbesar Berdasarkan Katalisis Heterogen

Reaksi	Katalis
Katalitik minyak mentah	Zeolit
Hidrotreating minyak mentah	Co-Mo, Ni-Mo, Ni-W
Pembentukan Nafta (ke bensin)	Pt, Pt-Re, Pt-Ir
Alkilasi	H ₂ SO ₄ , HF, Asam padat
Polimerisasi etilen, propilen	Cr, TiCl _x /MgCl ₂
Epoksidasi etilen ke etilen oksida	Ag
Vinil klorida (etilen+Cl ₂)	Cu (sebagai klorida)
Pembentukan uap metana menjadi CO+H ₂	Ni
Reaksi perubahan air-gas	Fe(oksida), Cu-ZnO
Methanation	Ni
Sintesis ammonia	Fe
Oksidasi ammonia menjadi NO dan HNO ₃	Pt-Rh

Reaksi	Katalis
Akilonitril dari propilen dan ammonia	Bi-Mo, Fe-Sb (oksida)
Hidrogenasi minyak sayur	Ni
Asam sulfat	V (oksida)
Oksidasi CO dan hidrokarbon	Pt, Pd
Reduksi NO _x	Rh, vanadium oksida

(Sumber: (Kakaei, Esrafil and Ehsani, 2019))

DAFTAR PUSTAKA

- Chorkendorff, I. and Niemantsverdriet, J. W. (2003) 'Introduction to Catalysis', *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics*, pp. 1–21. doi: 10.1002/3527602658.ch1.
- Didier, A. (2011) 'Organometallic Chemistry and Catalysis'.
- Kakaei, K., Esrafil, M. D. and Ehsani, A. (2019) 'Introduction to Catalysis', *Interface Science and Technology*, 27, pp. 1–21. doi: 10.1016/B978-0-12-814523-4.00001-0.
- Kosinov, N. (2020) 'Lecture: Concepts of Catalysis II', 13(9), pp. 1–17. doi: 10.9790/5736-1309010117.
- Sidjabat, O. (2018) 'Pengembangan Teknologi Bersih dan Kimia Hijau dalam Meminimalisasi Limbah Industri', *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi*, 42(1), pp. 45–50.
- Tang, S. L. Y., Smith, R. L. and Poliakoff, M. (2005) 'Principles of green chemistry: Productively', *Green Chemistry*, 7(11), pp. 761–762. doi: 10.1039/b513020b.
- Tang, S. Y. *et al.* (2008) 'The 24 Principles of Green Engineering and Green Chemistry: "IMPROVEMENTS PRODUCTIVELY"', *Green Chemistry*, 10(3), pp. 268–26. doi: 10.1039/b719469m.
- Török, B. and Dransfield, T. (2018) 'Green Chemistry: Historical Perspectives and Basic Concepts', *Green Chemistry: An Inclusive Approach*, pp. 3–16. doi: 10.1016/B978-0-12-809270-5.00001-7.
- Unair, N. (2021) 'Prof Hartati Sebut Katalis Heterogen Tunjang Green Chemistry', *News Unair*. Available at: <https://news.unair.ac.id/2021/12/08/prof-hartati-sebut-katalis-heterogen-tunjang-green-chemistry/?lang=id>.
- Utomo, M. P. (2010) 'Green Chemistry dengan Kimia Katalisis', *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA*, pp. 167–173.

BAB 5

PELARUT ORGANIK YANG *GREEN* *CHEMISTRY*

Oleh Kasta Gurning

5.1 Pendahuluan

Penerapan prinsip kimia hijau (*green chemistry*) menjadi perhatian serius bagi setiap kalangan peneliti, praktikan atau siapapun yang bersinggungan dengan bahan kimia khususnya dalam penggunaan berbagai pelarut dalam suatu reaksi. Pelarut merupakan. Penggunaan pelarut hampir di semua sektro seperti industri kilang minyak, tekstil, kimia, farmasi, dan percetakan (Amado Alviz and Alvarez, 2017). Penggunaan pelarut menjadi tantangan tersendiri dalam penerapan prinsip *green chemistry*. Tantangan yang dimaksudkan antara lain volume, prokan zat yang melarutkan zat terlarut untuk membentuk suatu laruduk yang dihasilkan, toksisitas, efisiensi energi yang ditimbulkan dalam reaksi, maupun dampak lingkungan dan pengolahannya. Oleh karena itu, pemilihan pelarut menjadi perhatian serius dan penting dalam meminimalkan toksisitas untuk kesehatan, polusi, serta ekologi dan keamanan lain sebelum digunakan (Dunn *et al.*, 2010; Simon and Li, 2012; Zhang and Cue, 2012). Misalnya dalam industri farmasi dalam mensintesis atau mengisolasi senyawa bahan farmasi aktif untuk dihasilkan seringkali membutuhkan pelarut yang berbeda-beda dan bahkan dalam jumlah besar (Amado Alviz and Alvarez, 2017; Kerton, 2009).

Pendekatan dalam penggunaan pelarut dalam reaksi dengan penerapan *green chemistry* perlu didasarkan data fisik (titik didih), data dampak siklus (data toksisitas hewan atau ekotoksitas) yang ditimbulkan penggunaan pelarut, disamping tidak mengabaikan

tujuan produk reaksi yang diharapkan (Dunn *et al.*, 2010). Data tersebut tersebut, kemudian dikelompokkan menjadi sistem penilaian. Jika masuk grade 1 (terburuk) dan grade 10 (terbaik), sehingga setiap bahan pelarut yang digunakan sudah mengarah dalam penerapan *green chemistry* (Dunn *et al.*, 2010). Hal ini juga telah diperkuat dengan kesepakatan bersama studi kolaboratif antara ahli kimia dengan industri bahwa pemilihan pelarut harus mengacu pada prosedur mempertimbangkan sifat reaksi-pelarut dan pelarut-sifat lingkungan untuk reaksi yang terjadi pada fase cair (Kerton, 2009).

Kesepakatan ini mengisyaratkan perlu mempertimbangkan reaksi yang terjadi dan dampak yang ditimbulkan kepada lingkungan dari penggunaan pelarut. Dampak yang ditimbulkan kelingkungan tentu cakupan yang luas yaitu orang yang terpapar langsung, ekosistem darat, air dan udara. Bab ini akan mengulas lebih mendalam tentang penggunaan pelarut organik yang *green chemistry* yang disertai dengan contoh sehingga dampak yang ditimbulkan minimal dan reaksi yang terjadi sesuai dengan apa yang diharapkan. Penggunaan pelarut organik seringkali memiliki sifat mudah menguap, mudah terbakar, dapat menyebabkan iritasi (mata, kulit dan sakit kepala) dan beberapa memiliki sifat karsinogenik, mutagenik dan teratogenik. Contoh pelarut organik yang bersifat karsinogenik yaitu benzena (C_6H_6) dan diklorometan (CH_2Cl_2), pelarut yang bersifat mutagenik pelarut dimethylcarbamic chloride, sedangkan pelarut organik yang menyebabkan teratogenik yaitu etilena glikol monometil eter (EGME) (Amberg *et al.*, 2015; Doe, 1984; Hofstetter *et al.*, 2003; Kerton, 2009).

5.2 Pelarut Organik

Pelarut organik merupakan pelarut penting yang banyak digunakan dalam proses keberlangsungan reaksi kimia. Selain itu dalam proses ekstraksi, pemurnian, dan juga penghilangan pengotor (proses rekristalisasi) juga banyak bergantung pada penggunaan pelarut organik. Produksi dari berbagai pelarut organik diperkirakan hampir 20 juta metrik ton (MT) per tahunnya. Konsumsi yang

berlebihan dan ketidaktepatan mempertimbangkan penggunaan pelarut organik akan dapat mengganggu kesehatan, mengganggu sistem ekologi dan tidak berkelanjutan (*non sustainability*). Meskipun demikian, penggunaan pelarut organik dengan meminimalkan dampak yang ditimbulkan menjadi bagian penting dari proses *sustainability* dengan mencermati selektivitas, keamanan, dan penanganan yang baik akan pelarut dan pengelolaan limbah yang ditimbulkan dari penggunaan pelarut tersebut (Clarke *et al.*, 2018). Beberapa pelarut organik yang lazim digunakan dalam proses rekasi kimia, sifat dan dampaknya (Tabel 5.1.) (Kerton, 2009).

Tabel 5.1. Pelarut Organik Umum dan Kakaterisasi Sifatnya
(Kerton, 2009)

Nama pelarut	Titik didih (°C)	TLV-TWA (ppm)*	Dampak	<i>Green Chemistry</i>
Metanol	64	200	Toxic, flammable	Dapat terbarukan (<i>Can be renewable</i>)
Etanol	78	1000	Irritant, flammable	Dapat terbarukan (<i>Can be renewable</i>)
Isopropanol	96	400	Irritant, flammable	
1-butanol	117	100	Harmful, flammable	
Etil asetat	76	400	Harmful, flammable	
Etil laktat	154	<i>Not yet established</i>	Irritant, flammable	Terbarukan (<i>Renewable</i>)
Tetrahidrofuran (THF)	65	200	Irritant, flammable	
2-MeTHF	80	<i>Not yet established</i>	Irritant, flammable	
Diklorometana	40	100	Toxic, harmful, suspected carcinogen	
Kloroform	61	10	Possible carcinogen	

Nama pelarut	Titik didih (°C)	TLV-TWA (ppm)*	Dampak	Green Chemistry
Toluene	110	50	Irritant, teratogen, flammable	
Heksana	68	50	Irritant, reproductive hazard, flammable	
Heptana	98	400	Irritant, flammable	
Water	100	<i>Not applicable</i>	-	Terbarukan, tidak mudah terbakar, murah (<i>Renewable, non-flammable, cheap</i>)
Karbon dioksida (cair)	<i>Not applicable</i>	5000	Compressed gas	Terbarukan, tidak mudah terbakar, murah (<i>Renewable, non-flammable, cheap</i>)
Polietilen glikol-1000 (PEG-1000)	<i>Not applicable</i>	<i>Not applicable</i>	-	Tidak toksik, menguap (<i>Non-toxic, non-volatile</i>)
1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate (Bmim PF ₆)	<i>Not applicable</i>	<i>Not yet established</i>	-	Tidak menguap (<i>Non-volatile</i>)

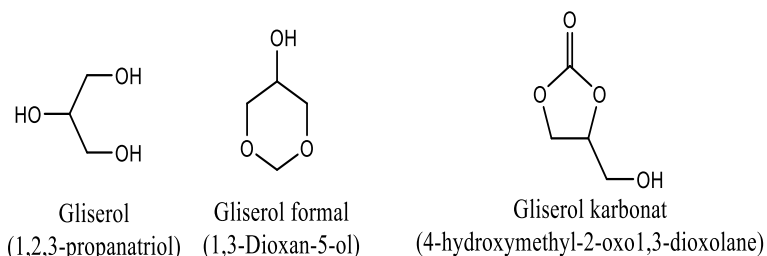
*TLV-TWA: nilai batas ambang—rata-rata tertimbang waktu dalam uap.

Ada dua belas prinsip *green chemistry* yang salah satunya penggunaan pelarut, dimana pelarut harus memenuhi kriteria memiliki sifat toksisitas rendah, tidak mudah terbakar, non-mutagenesis, non-volatilitas, memiliki ketersediaan yang luas, murah dan mudah untuk ditangani dalam proses daur ulang (Gu and Jérôme, 2010). Ahli kimia terus berupaya untuk mengatasi kekurangan dan mencari solusi penggunaan pelarut yang lebih aman serta mencari dan menawarkan jalur reaksi yang tanpa atau dengan penggunaan pelarut yang dapat memenuhi prinsip *green chemistry* (Anastas and

Eghbali, 2010). Beberapa pelarut organik yang sejalan dengan prinsip *green chemistry* dapat digunakan dalam reaksi antara lain:

5.2.1 Gliserol

Gliserol (1,2,3-propanatriol) dengan rumus molekul $C_3H_8O_3$ akhir-akhir ini mendapat perhatian khusus karena sifat yang dapat dijadikan pelarut dan juga dapat bertindak sebagai katalis dalam reaksi kimia organik (Gu and Jérôme, 2010). Gliserol dan turunannya seperti gliserol formal (1,3-dioxan-5-ol), gliserol karbonat, gliserol ester dan lain sebagainya telah diusulkan sebagai pelarut organik yang memenuhi *green chemistry* (Mousseau, 2001; Sonnati *et al.*, 2013). Struktur dari molekul gliserol dan beberapa derivatnya ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Struktur Molekul Gliserol dan Beberapa Derivatnya

Senyawa gliserol dalam bentuk murninya merupakan pelarut yang bening (tak berwarna), rasa manis, berwujud kental dan tidak berbau. Gliserol juga termasuk kedalam pelarut protik polar dengan konstanta elektrik 42,5 (pada suhu 25°C), densitas 1,26, berat molekul 92,09 g/mol, larut dalam air, alkohol berantai pendek, sedikit larut dalam pelarut organik umum seperti diklorometana, etil asetat dan tidak larut dalam pelarut hidrokarbon. Gliserol menjadi pelarut organik yang memenuhi *green chemistry* dikarenakan:

1. Kelarutan, gliserol memiliki kesamaan dengan jenis pelarut polar lain seperti air, DMSO, dan DMF yang mampu memfasilitasi pelarutan garam anorganik, asa,

basa, enzim dan persenyawaan kompleks logam transisi. Selain itu, gliserol juga dapat melarutkan senyawa organik yang sulit larut dalam air.

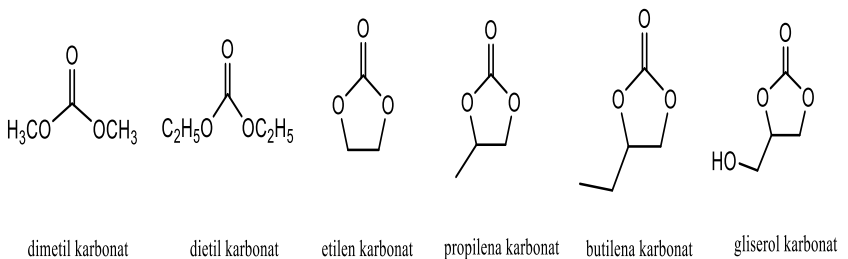
2. Volatilitas dan titik didih, gliserol bersifat tidak mudah menguap dibawah tekanan atmosfer dan memiliki titik didih yang tinggi (290°C), sehingga proses pemisahan gliserol dari produk dengan destilasi sangat dimungkinkan.
3. Keamanan, gliserol memiliki keunggulan bahwa tidak bersifat toksik atau tidak beracun. Nilai LD₅₀ gliserol sebesar 12600 mg/Kg dan dapat diuraikan secara biologi (hayati) dan tidak mudah terbakar, sehingga tidak ada perlakuan khusus selama penggunaan dan penyimpanan.
4. Ketersediaan, gliserol tersedia dalam jumlah yang banyak dan memiliki nilai ekonomis yang rendah (murah) serta banyak ditemukan di industri-industri minyak nabati, karena gliserol dapat diperoleh dari proses hidrolisis persenyawaan lipida dan merupakan produk samping dari produksi bahan bakar biodisel, produk samping dari pembuatan sabun dan dapat diperoleh dari hasil fermentasi mikroba. Disamping itu penggunaan biodisel sebagai pelarut menunjukkan efisiensi dan selektivitas yang sama atau bahkan lebih besar dibandingkan pelarut organik berbasis minyak bumi konvensional (Diaz-Alvarez *et al.*, 2014; García *et al.*, 2010; Gu and Jérôme, 2010).

5.2.2 Dimetil Karbonat

Dimetil karbonat/dimethyl carbonate (DMC) dengan rumus molekul $C_3H_6O_3$ merupakan pelarut organik yang dilaporkan memenuhi prinsip *green chemistry*. DMC termasuk pelarut aprotik nonpolar dengan memiliki kelarutan yang baik dengan air, mudah terurai atmosfer, dan tidak beracun. Pelarut ini dapat menjadi alternatif pengganti dari penggunaan pelarut metil etil keton, etil asetat, metil isobutil keton, dan

sebagian besar pelarut derivat keton (Pyo *et al.*, 2017). Penggunaan DMC telah banyak diaplikasikan baik sebagai pelarut atau bahan reaksi (reaktan) dan bahan adiktif bahan bakar dalam produksi seperti obat-obatan, pelapis, dan elektrolit baterai ion-litium (Pyo *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2014).

Dimetil karbonat termasuk pelarut organik yang memenuhi *green chemistry* antara lain (1) termasuk senyawa yang tidak beracun, (2) cairan yang mudah terbakar, berbau, dan tidak menimbulkan efek iritasi, mutagenik baik dengan kontak ataupun melalui inhalasi sehingga tidak diperlukan penanganan khusus, dan (3) menunjukkan reaktivitas reaksi kimia yang dapat disesuaikan tergantung pada kondisi reaksi produk yang diinginkan (Tundo and Selva, 2002). Disamping itu, senyawa dimetil karbonat termasuk karbonat organik yang dikelompokkan menjadi dua yaitu (1) karbonat linear termasuk dimetil karbonat (DMC) dan dietil karbonat (DEC); dan (2) karbonat siklik termasuk etilen karbonat (EC), propilena karbonat (PC), butilena karbonat (BC) dan gliserol karbonat (GC) (Santos *et al.*, 2014). Beberapa derivat dari dimetil karbonat ditunjukkan pada Gambar 5.2 dan beberapa sifat toksikologi dibandingkan dengan dimetil sulfat (DMS).



Gambar 5.2. Senyawa Organik Karbonat dan Derivatnya (Santos *et al.*, 2014).

Tabel 5.2. Perbandingan Sifat Toksikologi dan Ekotoksikologi Dimetil Karbonat (DMC) dengan Dimetil Sulfat (DMS)(Tundo and Selva, 2002)

Sifat	Dimetil karbonat (DMC)	Dimetil sulfat (DMS)
Toksisitas akut oral (tikus)	LD ₅₀ 13,8 g/kg	LD ₅₀ 440 mg/kg
Toksisitas akut per kontak (cavy)	LD ₅₀ > 2,5 g/kg	
Toksisitas akut per inhalasi (tikus)	LC ₅₀ 140 mg/L (4 h)	LC ₅₀ 1,5 mg/L (4 h)
Sifat mutagenik	Tidak	Ya
Sifat iritasi (kelinci, mata dan kulit)	Tidak	
Biodegradabilitas (OECD 301 C)	> 90% (28 hari)	Hdrolisis cepat
Toksisitas akut (ikan) (OECD 203)	*NOEC 1000 mg/L	LC ₅₀ 10-100 mg/L (96 h)
Toksisitas akut pada bakteri aerob air limbah (OECD 209)	EC ₅₀ > 1000 mg/L	

*NOEC: Konsentrasi yang tidak menghasilkan efek apapun.

5.2.3 Superkritis CO2

Superkritis CO₂ merupakan zat yang dapat dijadikan sebagai pelarut dan tidak mencemari lingkungan atau bersifat *green chemistry*. CO₂ pada suhu dan tekanan ruangan berbentuk gas dan kondisi superkritis dalam cair. Superkritis CO₂ secara umum tidak bersifat racun dan aman, tidak mudah terbakar, ramah terhadap lingkungan, murah, tidak mudah meledak, lambat secara kimia, bersifat inert, secara alami terjadi dalam bentuk gas pada suhi kamar, dan tidak menimbulkan asap (Devi *et al.*, 2020). Kondisi superkritis CO₂ dimanfaatkan sebagai pelarut dan diakhir reaksi dapat dengan mudah mendapatkan produk bebas pelarut. Molekul CO₂ termasuk molekul kecil dan linear yang dapat berdifusi dengan mudah dibandingkan pelarut organik konvensional. Hal inilah yang menjadikan molekul CO₂ dalam kondisi superkritis digunakan sebagai pengganti peran freon yang beracun dan pelarut organik tertentu. Molekul CO₂

superkritis memiliki sifat pelarut yang baik untuk ekstraksi senyawa non polar seperti persenyawaan hidrokarbon dan beberapa senyawa yang cukup polar seperti senyawa alkohol, ester, aldehida, dan keton (Cvijetko Bubalo *et al.*, 2015).

Molekul CO₂ superkritis tidak bersifat beracun sehingga dalam aplikasinya telah banyak digunakan dalam industri farmasi dan makanan, proses ekstraksi, produksi dan modifikasi partikel nano, dan proses pembentukan polimer. Cairan CO₂ superkritis menarik sebagai pelarut dikarenakan dapat menyesuaikan melalui perubahan suhu dan tekanan serta kondisi superkritis juga dengan mudah dicapai pada tekanan kritis 72,8 bar dan suhu 31,1°C (Peach and Eastoe, 2014). Keuntungan dalam penggunaan molekul CO₂ superkritis sebagai pelarut yaitu dengan mudah mengubah sifat densitas, viskositas, konstanta dielektrik sehingga dapat mempengaruhi kapasitas dan kelarutannya (Devi *et al.*, 2020).

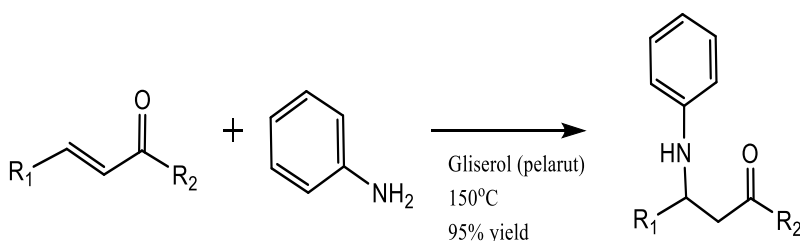
5.3 Aplikasi Pelarut Organik *Green Chemistry*

Pergunaan pelarut khususnya pelarut organik dalam reaksi kimia tidak dapat dihindari, walaupun ada beberapa reaksi dapat berlangsung tanpa pelarut. Akan tetapi dengan mempertimbangkan penerapan green chemistry dari penggunaan pelarut tersebut sangat dibutuhkan kan lebih baik dibandingkan dengan pendekatan konvensional (Kerton, 2009). Bagian sebelumnya telah mengulas beberapa pelarut organik yang memenuhi prinsip green chemistry, maka bagian ini kita akan mengulas aplikasi dari beberapa pelarut organik tersebut dalam proses reaksi.

5.2.3 Aplikasi Pelarut Gliserol dan Derivatnya

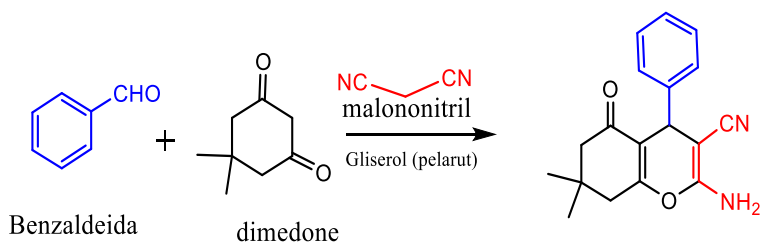
Gliserol telah berhasil ditemukan memiliki peran sebagai media (pelarut) dalam reaksi sintesis organik dengan atau tanpa bantuan katalis. Gliserol juga memiliki aplikasi lain sebagai reagen dalam reaksi kimia. Gliserol sebagai pelarut dalam reaksi penambahan aza-Michael dari amina aromatik ke keton tak

jenuh α, β tanpa katalis dengan menghasilkan produk rendemen 68-97%. Amina aromatik bereaksi baik dengan kalkon, 2-sikloheksan-1-one, 2-siklopentan-1-one dan etil vinil keton menggunakan pelarut gliserol (Gambar 5.3). Hasil ini jauh lebih baik daripada reaksi yang melibatkan pelarut dengan cairan ionik. Gliserol dari akhir reaksi juga berhasil dipisahkan dengan kromatografi flash dan dapat digunakan kembali hingga lima kali reaksi berikutnya (García *et al.*, 2010).



Gambar 5.3. Penambahan Amina Aromatik Aza-Michael Tanpa Katalis dengan Pelarut Gliserol (Ying *et al.*, 2013).

Reaksi tanpa katalis lain antara benzaldehida dengan dimedone (1, 1-Dimethyl-3,5-cyclohexanedione) dan malononitril menggunakan pelarut gliserol (Gambar 5.4) dan hasil reaksi lebih baik bila dibandingkan dengan pelarut organik lainnya (Tabel 5.3) (Safaei *et al.*, 2012).

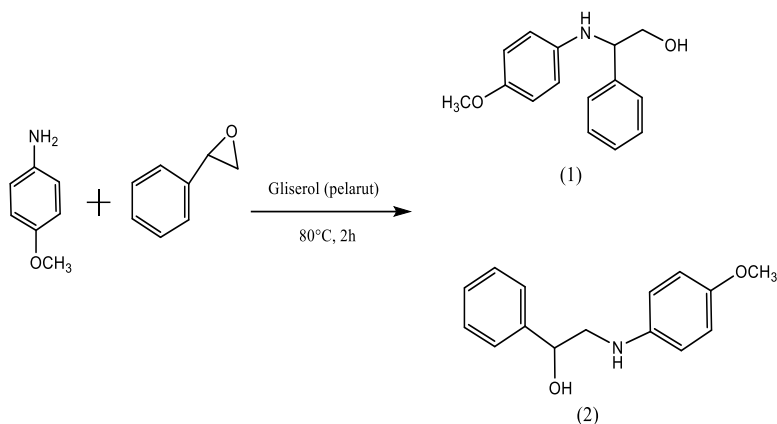


Gambar 5.4. Reaksi Kondensasi Antara Benzaldehida (1 mmol), Dimedone (1 mmol) dan Malononitril (1 mmol) dengan Pelarut Gliserol Tanpa Katalis (Safaei *et al.*, 2012).

Tabel 5.3 Reaksi Kondensasi Antara Benzaldehida (1 mmol), Dimedone (1 mmol) dan Malononitril (1 mmol) dengan Berbagai Pelarut dan Tanpa Katalis (Safaei *et al.*, 2012)

Pelarut	Temp (°C)	Waktu (menit)	Yields (%)
Toluena	80	360	< 15
DMF	80	360	< 15
DMSO	80	360	< 15
<i>n</i> -butil asetat	80	360	< 15
Etanol	80	360	48
Poli etilen glikol (PEG)	80	90	83
Air	80	90	80
Gliserol	80	60	93

Gliserol sebagai pelarut dengan peran meningkatkan selektivitas reaksi yang berlangsung dalam fase cair, menunjukkan tidak hanya efek yang menguntungkan pada laju reaksi tetapi juga dapat mempengaruhi selektivitas reaksi secara dramatis. Oleh karena itu, pengaruh pelarut pada selektivitas reaksi merupakan cara lain untuk menunjukkan pentingnya pelarut dipertimbangkan. Misalnya, reaksi pembukaan cincin *p*-anisidin dengan stirena oksida, yang umumnya dikatalisis asam lewis atau basa Bronted dapat dilakukan dengan tanpa katalis baik dalam gliserol dan air. Menariknya, dalam kondisi yang identik, regioselektivitas yang diperoleh dengan pelarut gliserol lebih tinggi daripada pelarut air (Gambar 5.5) (Gu and Jérôme, 2010).



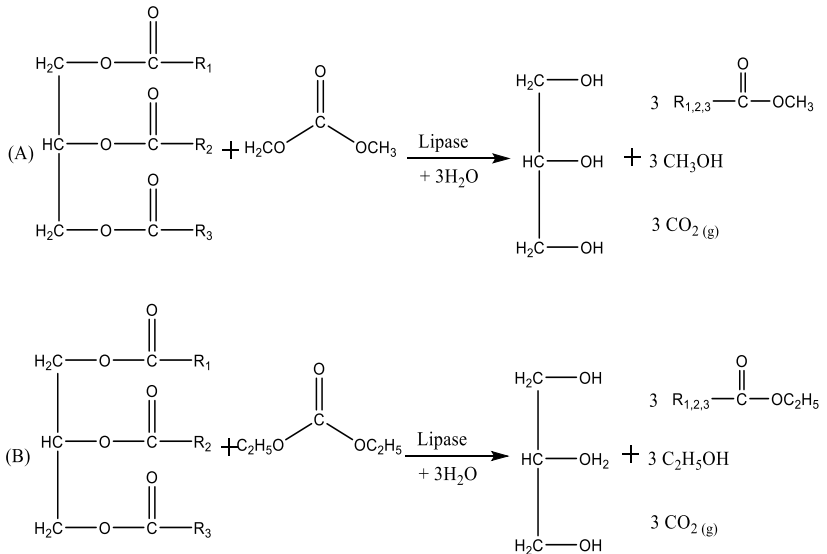
dengan gliserol, yield = 85%, 1/2 = 93/7;
dengan air, yield = 88%, 1/2 = 76/24

Gambar 5.5. Reaksi Pembukaan Cincin Stirena Oksida Oleh p-Anisidin (Gu and Jérôme, 2010).

5.3.2 Aplikasi Pelarut Dimetil Karbonat dan Derivatnya

Pelarut menjadi salah satu komponen penting sebagai media, mengontrol interaksi antara substrat reaksi melalui panas transfer dan gaya antarmolekul, dan membentuk solvat kulit di sekitar zat terlarut dalam suatu reaksi kimia. Interaksinya dengan zat terlarut memainkan peran penting untuk mencapai konversi dan selektivitas. Alkil-organik (senyawa dimetil karbonat/DCM) dikenal sebagai pelarut dalam aplikasi elektrokimia dan ekstraktif. DCM digunakan sebagai agen pemisah asam format dan bahan kimia industri dari larutan berair encer berdasarkan konstanta distribusi dan faktor pemisahan ditentukan oleh kromatografi gas di wilayah *immiscibility*. DMC telah menunjukkan kinerja ekstraksi yang baik untuk trigliserida dan sebagai pelarut ringan dalam konversi biodiesel dengan bantuan biokatalis (Pyo *et al.*, 2017). Pelarut dialkil karbonat rantai pendek seperti dimetil karbonat (DMC) sebagai akseptor asil untuk transesterifikasi minyak nabati telah berhasil digunakan. Metode transesterifikasi ini menghilangkan risiko penonaktifan enzim oleh alkohol rantai pendek, karena alkohol rantai pendek diganti dengan dialkil

karbonat rantai pendek yang menghasilkan reaksi yang tidak dapat diubah, sehingga transesterifikasi ini lebih cepat dan konversi kuantitatif lebih baik (Gambar 5.6) (Su *et al.*, 2009).



Gambar 5.6 Transesterifikasi Trigliserida dengan Dialkil Karbonat. (A) Dimetil Karbonat; (B) Dietil Karbonat (Su *et al.*, 2009).

DMC dapat diaplikasikan sebagai elektrolit dalam baterai isi ulang lithium. Elektrolit bertindak sebagai media dimana ion berdifusi dari satu elektroda ke elektroda lainnya, sehingga mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Alkil karbonat dipilih karena stabilitas anodiknya yang dapat diterima untuk katoda yang digunakan dalam baterai Li-ion, bersama dengan sifat lain seperti polaritas tinggi (yaitu, konduktivitas yang baik dari larutannya), kisaran suhu yang wajar antara titik beku dan titik didih, cukup toksisitas rendah, dan fitur keamanan yang dapat diterima. Garam Li larut dan dapat dipisahkan dalam eter atau dalam DMC dan DEC. Pelarut yang umum digunakan adalah propilena karbonat (PC), etilena karbonat (EC), dan dimetil sulfoksida (DMSO), yang semuanya mampu melarutkan beberapa garam litium. Karena viskositas yang tinggi dari pelarut ini membuat transfer ionik lambat memberikan

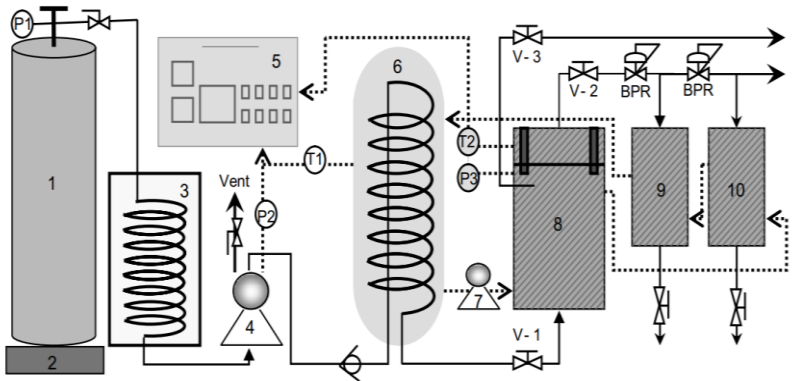
konduktivitas yang rendah, cairan elektrolit sebenarnya terdiri dari campuran empiris yang juga mengandung pelarut dengan viskositas rendah (misalnya, DMC atau metil etil karbonat) untuk meningkatkan konduktivitas elektrolit. Umumnya, dalam baterai anoda dengan bahan karbon, pelarut elektrolit mengandung 50-90% DMC untuk menjaga baterai dengan kerapatan dan konduktivitas arus tinggi, ketahanan yang baik terhadap oksidan dan reduktor, serta stabilitas jangka panjang (Pyo *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2014).

DMC memiliki reaktivitas sehingga dapat digunakan dalam transformasi gugus fungsi senyawa kimia seperti metilasi, karbonilasi, dan metoksikarbonilasi, dan dapat menggantikan agen konvensional seperti CH_3X , dimetil sulfat dan fosgen. Molekul DMC memiliki dua pusat aktif (metil dan karbonil karbon), yang reaktivitas dapat disesuaikan dengan suhu eksperimen. Secara umum diamati bahwa (i) pada suhu refluks ($90\text{ }^\circ\text{C}$), DMC bertindak sebagai agen etoksikarbonilasi oleh mekanisme $\text{B}_{\text{AC}2}$ (bimolekuler, katalis basa, pemutusan asil, substitusi nukleofilik) di mana nukleofil menyerang karbon karbonil DMC dan menghasilkan produk transesterifikasi, dan (ii) pada suhu yang lebih tinggi (biasanya $160\text{ }^\circ\text{C}$), DMC bertindak sebagai agen metilasi: mekanisme $\text{B}_{\text{AL}2}$ (bimolekuler, katalis basa, pembelahan alkil, substitusi nukleofilik) mendominasi di mana serangan nukleofilik gugus metil DMC (Pyo *et al.*, 2017).

5.3.3 Aplikasi Pelarut Superkritis CO_2

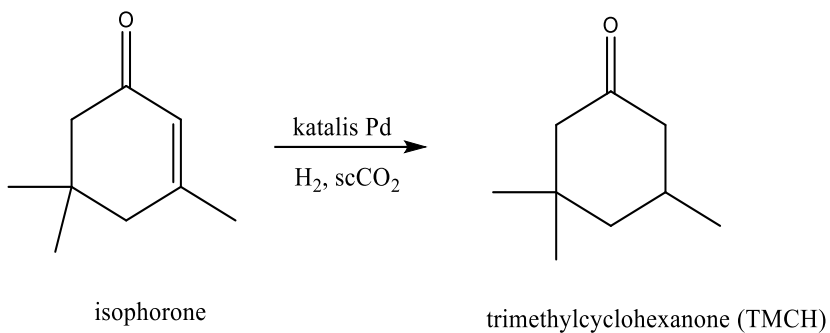
Aplikasi superkritis CO_2 (scCO_2) yang berhasil yaitu dekafeinasi biji kopi yang telah menjadi salah satu proses dekafeinasi yang paling populer. Sejumlah proses lain juga telah diterapkan dalam industri makanan mungkin karena daya ekstraksi yang relatif tinggi dibandingkan dengan pelarut kimia lainnya dan tidak bersifat racun (Han and Poliakoff, 2012). Penggunaan karbon dioksida superkritis sebagai pelarut memiliki banyak keuntungan seperti kemudahan, noneksplorisif, dan nontoksitas dan dalam proses ekstraksi selektif untuk

komponen tertentu dimungkinkan dengan mengontrol suhu dan tekanan CO₂ selama ekstraksi. Rangkaian desain alat yang digunakan dalam ekstraksi kafein dengan menggunakan superkritis ditunjukkan pada Gambar 5.7 (Lee *et al.*, 2007).



Gambar 5.7 Diagram Skematis Sistem Ekstraksi Kafein Dengan Menggunakan Pelarut CO₂ Superkritis; (1) silinder CO₂, (2) keseimbangan elektronik, (3) pendingin, (4) pompa CO₂, (5) pengontrol, (6) bak pemanas, (7) pompa sirkulasi, (8) bejana ekstraksi, (9) pemisah 1, (10) pemisah 2, V-1: katup 1, V-2: katup 2, BPR: pengatur tekanan balik; garis putus-putus: air, dan garis padat: CO₂ (Lee *et al.*, 2007).

Penggunaan scCO₂ dalam proses hidrogenasi skala industri untuk sintesis vitamin oleh Hoffman la Roche (kemudian DSM Vitamins) dan produksi trimetilsikloheksanon TMCH oleh Thomas Swan & Co Ltd yang lebih murni. Berbeda dengan kafein dalam dekafeinasi, TMCH diperoleh kembali dengan depresurisasi CO₂ yang kemudian dikompres ulang dan didaur ulang. Namun, pabrik tersebut beroperasi pada saat biaya energi meningkat dan dengan cepat menjadi terlalu mahal untuk digunakan pada hidrogenasi sederhana isoforon. Namun demikian, pabrik tersebut telah menyediakan 'tempat uji' yang sangat berharga untuk penerapan scCO₂ skala besar untuk reaksi kimia (Gambar 5.8) (Han and Poliakoff, 2012).



Gambar 5.8 Reaksi Hidrogenasi Isophorone Menjadi TMCH dengan Pelarut scCO_2 dan Katalis Pd (Han and Poliakoff, 2012).

DAFTAR PUSTAKA

- Amado Alviz, P.L. and Alvarez, A.J. (2017), "Comparative life cycle assessment of the use of an ionic liquid ([Bmim]Br) versus a volatile organic solvent in the production of acetylsalicylic acid", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 168, pp. 1614–1624, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.107.
- Amberg, A., Harvey, J.S., Czich, A., Spirkl, H.P., Robinson, S., White, A. and Elder, D.P. (2015), "Do Carboxylic/Sulfonic Acid Halides Really Present a Mutagenic and Carcinogenic Risk as Impurities in Final Drug Products?", *Organic Process Research and Development*, American Chemical Society, Vol. 19 No. 11, pp. 1495–1506, doi: 10.1021/acs.oprd.5b00106.
- Anastas, P. and Eghbali, N. (2010), "Green Chemistry: Principles and Practice", *Chemical Society Reviews*, Vol. 39 No. 1, pp. 301–312, doi: 10.1039/b918763b.
- Clarke, C.J., Tu, W.C., Levers, O., Bröhl, A. and Hallett, J.P. (2018), "Green and Sustainable Solvents in Chemical Processes", *Chemical Reviews*, American Chemical Society, Vol. 118 No. 2, pp. 747–800, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00571.
- Cvjetko Bubalo, M., Vidović, S., Radojčić Redovniković, I. and Jokić, S. (2015), "Green solvents for green technologies", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, John Wiley and Sons Ltd, Vol. 90 No. 9, pp. 1631–1639, doi: 10.1002/jctb.4668.
- Devi, B.K., Naraparaju, S., Soujanya, C. and Gupta, S.D. (2020), "Green Chemistry and Green Solvents: An Overview", *Current Green Chemistry*, Bentham Science Publishers, Vol. 7 No. 3, pp. 314–325, doi: 10.2174/2213346107999200709132815.
- Diaz-Alvarez, A.E., Francos, J., Croche, P. and Cadierno, V. (2014), "Recent Advances in the Use of Glycerol as Green Solvent for Synthetic Organic Chemistry", *Current Green Chemistry*, Bentham Science Publishers, Vol. 1 No. 1, pp. 51–65.

- Doe, J.E. (1984), *Further Studies on the Toxicology of the Glycol Ethers with Emphasis on Rapid Screening and Hazard Assessment, Environmental Health Perspectives*, Vol. 57.
- Dunn, P.J., Wells, A.S. and Williams, M.T. (2010), *Green Chemistry in the Pharmaceutical Industry*.
- García, J.I., García-Marín, H., Mayoral, J.A. and Pérez, P. (2010), "Green solvents from glycerol. Synthesis and physico-chemical properties of alkyl glycerol ethers", *Green Chemistry*, Vol. 12 No. 3, pp. 426–43, doi: 10.1039/b923631g.
- Gu, Y. and Jérôme, F. (2010), "Glycerol as a sustainable solvent for green chemistry", *Green Chemistry*, Vol. 12 No. 7, pp. 1127–1138, doi: 10.1039/c001628d.
- Han, X. and Poliakoff, M. (2012), "Continuous reactions in supercritical carbon dioxide: Problems, solutions and possible ways forward", *Chemical Society Reviews*, Vol. 41 No. 4, pp. 1428–1436, doi: 10.1039/c2cs15314a.
- Hofstetter, T.B., Capello, C. and Hungerbühler, K. (2003), "Environmentally preferable treatment options for industrial waste solvent management. A case study of a toluene containing waste solvent", *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, Institution of Chemical Engineers, Vol. 81 No. 3, pp. 189–202, doi: 10.1205/095758203765639898.
- Kerton, F.M. (2009), *Alternative Solvents for Green Chemistry*.
- Lee, S., Park, M.K., Kim, K.H. and Kim, Y.S. (2007), "Effect of supercritical carbon dioxide decaffeination on volatile components of green teas", *Journal of Food Science*, Vol. 72 No. 7, doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00446.x.
- Mousseau, J.J. (2001), "1,3-Dioxan-5-ol", *Encyclopedia of Reagents for Organic Synthesis*, pp. 1–3.

- Peach, J. and Eastoe, J. (2014), "Supercritical carbon dioxide: A solvent like no other", *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, Beilstein-Institut Zur Forderung der Chemischen Wissenschaften, Vol. 10, pp. 1878–1895, doi: 10.3762/bjoc.10.196.
- Pyo, S.H., Park, J.H., Chang, T.S. and Hatti-Kaul, R. (2017), "Dimethyl carbonate as a green chemical", *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Elsevier B.V., Vol. 5, pp. 61–66, doi: 10.1016/j.cogsc.2017.03.012.
- Safaei, H.R., Shekouhy, M., Rahmanpur, S. and Shirinfeshan, A. (2012), "Glycerol as a biodegradable and reusable promoting medium for the catalyst-free one-pot three component synthesis of 4H-pyrans", *Green Chemistry*, Vol. 14 No. 6, pp. 1696–1704, doi: 10.1039/c2gc35135h.
- Santos, B.A.V., Silva, V.M.T.M., Loureiro, J.M. and Rodrigues, A.E. (2014), "Review for the Direct Synthesis of Dimethyl Carbonate", *ChemBioEng Reviews*, Wiley-Blackwell, Vol. 1 No. 5, pp. 214–229, doi: 10.1002/cben.201400020.
- Simon, M.O. and Li, C.J. (2012), "Green chemistry oriented organic synthesis in water", *Chemical Society Reviews*, Vol. 41 No. 4, pp. 1415–1427, doi: 10.1039/c1cs15222j.
- Sonnati, M.O., Amigoni, S., Taffin De Givenchy, E.P., Darmanin, T., Choulet, O. and Guittard, F. (2013), "Glycerol carbonate as a versatile building block for tomorrow: Synthesis, reactivity, properties and applications", *Green Chemistry*, Royal Society of Chemistry, Vol. 15 No. 2, pp. 283–306, doi: 10.1039/c2gc36525a.
- Su, E., You, P. and Wei, D. (2009), "In situ lipase-catalyzed reactive extraction of oilseeds with short-chained dialkyl carbonates for biodiesel production", *Bioresource Technology*, Vol. 100 No. 23, pp. 5813–5817, doi: 10.1016/j.biortech.2009.06.077.
- Tundo, P. and Selva, M. (2002), "The chemistry of dimethyl carbonate", *Accounts of Chemical Research*, Vol. 35 No. 9, pp. 706–716, doi: 10.1021/ar010076f.

- Ying, A., Zhang, Q., Li, H., Shen, G., Gong, W. and He, M. (2013), "An environmentally benign protocol: Catalyst-free Michael addition of aromatic amines to α , β -unsaturated ketones in glycerol", *Research on Chemical Intermediates*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 39 No. 2, pp. 517–525, doi: 10.1007/s11164-012-0575-0.
- Zeng, X., Li, J. and Singh, N. (2014), "Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Taylor and Francis Inc., Vol. 44 No. 10, pp. 1129–1165, doi: 10.1080/10643389.2013.763578.
- Zhang, W. and Cue, B.W. (2012), *Green Techniques for Organic Synthesis and Medicinal Chemistry*, Wiley.

BAB 6

SUMBER DAYA DAPAT DIPERBARUI

Oleh Aliyah Fahmi

6.1 Pendahuluan

Sumber daya merupakan segala sesuatu yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia. Pada umumnya, sumber daya berdasarkan sifatnya dapat digolongkan menjadi sumber daya yang dapat diperbarui dan tak dapat diperbarui. Pada Bab ini fokus membahas tentang sumber daya yang dapat diperbarui. Sumber daya yang dapat diperbarui merupakan sumber daya yang dapat terus ada selama penggunaannya tidak dieksploitasi berlebihan. Tumbuhan, hewan, mikroorganisme, sinar matahari, angin, dan air adalah beberapa contoh sumber daya yang dapat diperbarui. Walaupun jumlahnya sangat berlimpah di alam, penggunaannya harus tetap dibatasi dan dijaga untuk dapat terus berkelanjutan.



Gambar 6.1 Landscape Danau Toba Sumatera Utara
(Sumber Pesonaindo, 2016)

Bumi terdiri dari 2 wilayah besar, yaitu daratan dan lautan. Setiap wilayah memiliki ekosistem dan memiliki peran dalam menjaga ekosistem tersebut. Ekosistem adalah bertemunya serta berinteraksinya unsur biotik dengan biotik dan unsur biotik dengan abiotik. Ekosistem di bumi terbagi menjadi 2, yaitu ekosistem daratan dan ekosistem lautan. Ekosistem daratan adalah ekosistem yang habitatnya berada di daratan.

Ekosistem daratan antara lain hutan hujan, hutan musim, ekosistem gurun, hutan taiga, ekosistem tundra, ekosistem padang rumput, dan hutan sabana. Sedangkan ekosistem air terbagi menjadi dua, yaitu ekosistem air tawar dan ekosistem air laut. Ekosistem air tawar adalah ekosistem yang berada di perairan air tawar. Ekosistem ini terdiri dari: ekosistem sungai, ekosistem danau, dan rawa-rawa. Sedangkan ekosistem air laut adalah ekosistem yang habitatnya berada di laut. Ekosistem ini antara lain ekosistem pantai, terumbu karang, dan ekosistem laut dalam. Setiap ekosistem di bumi menyimpan banyak sumber daya yang penting bagi kehidupan manusia. Sumber daya tersebut berupa sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui, dan sumber daya alam yang dapat diperbarui. Sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui adalah sumber daya hasil pelapukan fosil jutaan tahun lalu. Sedangkan sumber daya alam yang dapat diperbarui mampu berkembang biak.

Sumberdaya alam adalah segala sumber persediaan yang secara potensial dapat dimanfaatkan atau didayagunakan. Istilah ini dapat pula diartikan sebagai suatu masukan dalam suatu proses produksi sehingga menghasilkan produk lain yang lebih tinggi nilai manfaatnya. Yang menjadi fokus bahasan pada bab ini adalah sumber daya alam yang dapat diperbarui dan kontinyu karena diharapkan dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama, tidak seperti sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui karena amat sangat lama. Untuk mendapatkan minyak bumi ataupun batubara dapat membutuhkan waktu jutaan tahun untuk terbentuk dibandingkan menanam tumbuhan yang mudah untuk tumbuh.

6.2 Ruang Lingkup SDA

Sumber daya alam (SDA) merupakan segala sesuatu yang muncul secara alami yang secara umum dapat digunakan untuk pemenuhan kebutuhan manusia. Pada zaman sekarang, kemajuan IPTEK tertuju kepada eksploitasi sumber daya alam sehingga persediaannya terus berkurang secara signifikan. Sumber daya alam mutlak diperlukan untuk menunjang kebutuhan manusia, tetapi keberadaannya tersebar secara tidak merata di seluruh wilayah di Indonesia maupun di negara-negara lain di dunia. Sumber daya alam pula merupakan segala sesuatu yang tersedia di alam dan dimanfaatkan untuk kebutuhan manusia. Sumber daya alam dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Sumber daya alam yang dapat diperbarui dan;
2. Sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui.

SDA yang dapat diperbaharui meliputi air, tanah, tumbuhan, dan hewan. SDA ini harus kita jaga kelestariannya, agar tidak merusak keseimbangan ekosistem. SDA yang tidak dapat diperbaharui, contohnya barang tambang yang ada di dalam perut bumi, seperti minyak bumi, batu bara, timah, dan nikel. Selanjutnya, menurut Yakini, A (1997) dan Christanto, J (2011) dinyatakan bahwa SDA bisa pula dibedakan atau diklasifikasikan berdasarkan tipe atau jenisnya. Ada 3 (tiga) tipe SDA, yaitu:

1. **SDA yang tidak pernah habis** (*renewable-perpetual resources*): sumberdaya alam yang tidak dapat diperbaiki atau diper banyak, atau dengan kata lain sumberdaya alam tersebut hanya dapat dipakai sekali saja. Contohnya adalah lahan tambang, minyak bumi, dan fosil.
2. **SDA yang tidak dapat diperbaharui** (*non-renewable or exhaustible resources*) adalah sumberdaya alam yang dapat diperbaiki atau diperbanyak, sehingga apabila sumberdaya alam tersebut diambil atau dimanfaatkan masih dapat diperbarui, sehingga masih dapat dimanfaatkan kembali. Contohnya adalah tanah, tumbuhan, dan air., energi matahari, angin, tanah dan lain-lain.;

3. **Sumber daya alam yang memiliki sifat gabungan.** Sumber daya jenis ini mencakup pada sumber daya biologis, seperti hasil pertanian, hutan, margasatwa, padang rumput, perikanan, dan peternakan. Sumber daya alam jenis ini memiliki ciri, seperti sumber daya yang dapat diperbarui karena bantuan manusia melalui perawatan dan pengembangan. Dalam waktu-waktu tertentu, sumber daya alam ini dapat dikategorikan sebagai sumber daya alam yang tak dapat diperbarui, yaitu pemakaian yang berlebihan sehingga mencapai kepunahan. Sumber daya tanah dapat dikatakan sebagai sumber daya alam yang memiliki sifat gabungan antara sumber daya alam pulih dan tidak dapat diperbarui. Kesuburan tanah dapat terjadi karena akar tanaman dan adanya organisme-organisme yang mengeluarkan bermacam-macam nutrisi tanah untuk diserap oleh tanaman. Keadaan ini merupakan sifat dari sumber daya alam yang tak dapat diperbarui. Akan tetapi, dapat juga kesuburan tanah itu diperbarui melalui upaya-upaya manusia, seperti penggunaan pupuk, tanaman-tanaman penolong, ataupun tanamantanaman untuk pupuk hijau lainnya.

Selain itu, SDA juga dapat dibagi menjadi dua, yaitu SDA hayati dan SDA non-hayati.

1. **SDA hayati** adalah SDA yang berasal dari makhluk hidup (biotik), seperti hasil pertanian, perkebunan, pertambakan, dan perikanan. Sumber daya hayati adalah salah satu sumber daya dapat pulih atau terbarukan (*renewable resources*) yang terdiri atas flora dan fauna. Sumber daya hayati secara harfiah dapat diartikan sebagai sumber daya yang mempunyai kehidupan dan dapat mengalami kematian. Jenis-jenis sumber daya hayati di antaranya adalah pohon, ikan, rumput laut, plankton, zooplankton, fitoplankton, harimau, semut, cacing, rumput laut, terumbu karang, lamun, dan sebagainya.

2. **SDA non-hayati** adalah SDA yang berasal dari makhluk tak hidup (abiotik), seperti: air, tanah, dan barang-barang tambang. Lingkungan hidup merupakan sumber daya alam atau kekayaan alam yang sangat dibutuhkan oleh manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup yang jumlahnya sangat terbatas. Manusia selalu berupaya untuk mengeksploitasi kekayaan alam secara optimal dengan menggunakan alat sederhana atau peralatan modern. Jika pengambilan sumber daya alam secara berlebihan maka bisa menimbulkan terjadinya kelangkaan sumber daya alam untuk memenuhi kebutuhan hidup kita sehari-hari.

6.3 Apa Saja SDA yang Dapat Diperbarui

Sumber daya alam/SDA yang dapat diperbarui adalah sumber daya alam yang mampu memperbarui diri sendiri atau memiliki kuantitas yang tidak terhingga, sehingga dapat di pakai terus menerus. Sumber daya alam tidak hanya dapat dipakai sebagai energi alternatif, juga dipakai untuk kebutuhan manusia lainnya. Berikut ini adalah contoh dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui antara lain matahari, angin, air, tanah, tumbuhan, hewan, angin, ombak, pasang surut air laut, biomassa, geotermal dan nuklir. Untuk lebih detailnya dijelaskan sebagai berikut:

1. **Matahari:** Sinar matahari adalah salah satu sumber energi yang dapat dipakai terus menerus, karena jumlahnya yang tidak terbatas. Panas dari matahari di pakai untuk sumber vitamin D, fotosintesis bagi tumbuhan, mengeringkan pakaian, menghidupkan pemanas air atau pemanas ruangan. Selain itu sinar matahari mulai di pakai sebagai energi pembangkit listrik, karena jumlahnya yang tidak terbatas dan ramah lingkungan.



Gambar 6.2 Energi matahari
(Sumber Teknoaktivitas, 2017)

Energi matahari merupakan suatu sumber energi yang akan selalu ada dan tidak akan pernah habis. Energi matahari dapat digunakan terus-menerus sehingga potensial untuk dikembangkan untuk menggantikan energi dari minyak bumi yang ketersediaannya terbatas dan akan habis. Hal ini dikarenakan, energi dari matahari ini tergolong dalam renewable energi atau energi yang dapat diperbaharui.

2. **Angin:** Angin adalah udara yang bergerak Angin sering dimanfaatkan sebagai energi alternatif seperti pembangkit listrik tenaga angin, serta alat untuk sistem pengairan. Angin adalah salah satu sumber daya alam yang memiliki kuantitas yang tidak terhingga. Sehingga angin dianggap sebagai energi alternatif yang murah dan ramah lingkungan.



Gambar 6.3 Energi Listrik Tenaga Angin
(Sumber Rimbakita, 2023)

3. **Air:** Sumberdaya air mempunyai kedudukan yang strategis dalam kehidupan, karena sebagian besar reaksi kimia serta metabolisme organisme dipengaruhi oleh keberadaan air. Selain penting dalam kehidupan, air juga sangat berperan untuk menjaga keseimbangan lingkungan dan dalam mempengaruhi rona lingkungan. Air di bumi mengalami sirkulasi terus menerus secara berkala secara teratur melalui beberapa proses yaitu: penguapan, presipitasi, dan pengaliran. Siklus dimulai dari penguapan air dipermukaan bumi atau di permukaan air yang lain, menjadi titik-titik uap. Titik-titik uap ini karena mengalami penurunan temperatur akan berubah menjadi awan dengan adanya proses kondensasi, selanjutnya awan tersebut jatuh dipermukaan bumi sebagai hujan. Ada sebagian air yang tidak sempat jatuh di permukaan bumi akibat penguapan, dan uap air tersebut selanjutnya membentuk titik-titik uap dan kembali bersiklus.

Air yang jatuh di permukaan bumi sebagian ada yang langsung mengalir sebagai aliran permukaan, sebagian ada yang menjadi aliran bawah permukaan, dan sebagian menjadi aliran air tanah. Aliran air di bawah permukaan, oleh gaya gravitasi akan ditarik ke bawah menuju zona jenuh, dan menjadi aliran air tanah. Arah aliran air tanah ini dipengaruhi oleh struktur geologi dan topografi daerah secara regional. Aliran air tanah ini selanjutnya bermuara di laut, sungai, atau deposit air permukaan. Air adalah salah satu sumber daya alam yang memiliki jumlah yang sangat banyak. Air di Indonesia sering dipakai sebagai sumber pembangkit listrik.



Gambar 6.4 Pembangkit Listrik Tenaga Air
(Sumber Sekolahotomasi, 2018)

4. **Tanah:** Tanah merupakan salah satu sumber daya yang jumlahnya melimpah di alam. Tanah memiliki peran yang cukup penting bagi semua elemen kehidupan di bumi, karena pada dasarnya tanah menjadi pendukung kehidupan di bumi, terutama tumbuhan. Unsur hara dan juga air yang ada di dalam tanah menjadi faktor tumbuhnya tumbuhan. Selain itu, tanah berperan sebagai penopang akar dan juga habitat beberapa spesies hewan. Tanah menjadi sumber daya alam yang dapat diperbarui meskipun digunakan berkali-kali, seperti digunakan sebagai media tanam. Asalkan, manusia juga menjaga kesuburan dari tanah tersebut dengan pengolahan tanah yang tepat. Selain digunakan sebagai media utama dalam bercocok tanam, tanah sering digunakan untuk bahan pemerataan lahan dan juga sebuah bangunan.



Gambar 6.5 Tanah (Sumber Maspur, 2022)

5. **Tumbuhan:** Tumbuhan adalah salah satu makhluk hidup di bumi, dan dianggap sebagai salah satu sumber daya alam. Tumbuhan mampu berkembang biak maupun di kembang biakkan oleh manusia. Tumbuhan adalah salah satu sumber daya alam yang dapat diperbaharui, karena tumbuhan dapat berkembang biak. Baik oleh usaha sendiri maupun oleh manusia.



Gambar 6.6 Sayuran Organik
(Sumber Toiletbisnis, 2022)

6. **Hewan Darat:** Hewan darat adalah hewan yang hidup di darat. Hewan darat adalah makhluk hidup yang ada di bumi. Hewan darat merupakan sumber protein bagi manusia. Selain itu, hewan darat juga dapat menjadi alat transportasi dan alat untuk membantu pekerjaan manusia, seperti sapi untuk membajak dan monyet untuk memetik kelapa. Sama seperti tumbuhan, hewan darat mampu berkembang biak, sehingga menjadi sumber daya alam yang dapat diperbaharui.



Gambar 6.7 Ternak Ayam
(Sumber Indonesiaartikel, 2017)

7. **Hewan Air:** Hewan air terbagi menjadi hewan air tawar dan hewan air asin. Hewan air juga menjadi sumber protein bagi manusia, contohnya ikan, udang, kepiting. Hewan air juga dipercaya mampu menyembuhkan banyak penyakit. Seperti hewan darat, hewan air juga mampu berkembang biak, sehingga dianggap sebagai sumber daya alam yang dapat diperbaharui.



Gambar 6.8 Ternak Udang Air Tawar
(Sumber Bisnis UKM, 2015))

8. **Ombak:** Ombak adalah aliran air laut yang bergulung-gulung akibat tiupan angin dan perbedaan tekanan air laut. Ombak adalah salah satu sumber daya alam yang memiliki jumlah yang sangat banyak. Ombak dapat dipakai sebagai sumber pembangkit listrik. Selain itu ombak dipakai untuk sumber listrik bagi mercusuar yang ada di tebing.



Gambar 6.9 Ombak Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik
(Sumber: Energibaik, 2021)

9. **Pasang dan Surut Air Laut:** Pasang surut air laut adalah naik dan turunnya permukaan air laut. Pasang surut air laut juga dapat dijadikan sebagai sumber tenaga listrik. Walau pemakaian metode ini belum banyak di ketahui dan dipakai oleh negara- negara di dunia. Akan tetapi metode ini mampu membantu pasokan listrik di desa- desa nelayan di pinggir pantai yang belum terkenan aliran listrik.



Gambar 6.10 Pembangkit Listrik Dari Pasang Surut Air
(Sumber Ridomanik, 2013)

10. **Biomassa:** Biomassa adalah sisa- sisa makhluk hidup yang telah mati, tapi jasadnya masih dapat di pakai oleh manusia. Biomassa antara lain sisa serbuk kayu dan sisa kulit kayu di pakai kembali dalam pembuatan mebel. Selain itu sisa rumput kering di pakai kembali untuk pupuk kompos. Sisa kotoran hewan juga di pakai sebagai energi alternatif pengganti bahan bakar dari gas alam, yaitu biogas.



Gambar 6.11 Energi Biomassa (Bestgrade, 2023)

11. **Geothermal:** Geothermal adalah energi yang berasal dari panas bumi. Energi ini dianggap sebagai energi alternatif sebagai pembangkit listrik, karena energi ini adalah energi yang bersih dan ramah lingkungan. Energi ini belum menjadi energi yang umum di pakai, dan membutuhkan penelitian lebih lanjut.



Gambar 6.12 Energi Geothermal
(Sumber: Hakim, I (2019))

12. **Nuklir:** Nuklir adalah energi buatan yang berasal dari proses pemecahan atom. Nuklir banyak dipakai sebagai sumber pembangkit listrik. Salah satu negara yang memakai energi ini adalah Jepang. Nuklir juga menjadi alasan berhentinya perang dunia kedua, karena efek ledakan yang ditimbulkan oleh nuklir sangat besar.



Gambar 6.13 Nuklir (Sumber Luminitiam, 2015)

Meskipun dapat diperbaharui, beberapa sumber daya diatas apabila digunakan secara terus- menerus, maka persediaan dari sumber daya tersebut makin lama makin menipis dan akan habis (Farah, 2017).

6.4 Hubungan SDA yang Dapat Diperbarui dengan Ekonomi Manusia

Manusia saat ini mengalami tuntutan di dalam memenuhi kebutuhan hidupnya, baik berupa kebutuhan primer (sandang, pangan, papan), sekunder (transportasi, sarana, prasarana) serta tersier (kebutuhan akan hidup lebih dari berkecukupan, kebutuhan akan teknologi). Di sisi lain, SDA yang tersedia dan yang dapat digunakan sebagai alat untuk memuaskan kebutuhan manusia itu relatif terbatas, baik SDA yang tidak dapat diperbarui maupun yang dapat diperbarui. Dalam konteks ini yang menjadi permasalahan adalah SDA yang dapat diperbarui. Permasalahan SDA tersebut pada dasarnya terletak pada ketidakseimbangan

antara SDA yang diperoleh dengan kebutuhan manusia yang semakin meningkat terus-menerus. Sebagai contoh, sumber daya lahan yang diperlukan untuk memproduksi pangan semakin lama semakin langka berhubung laju pertumbuhan penduduk yang meningkat. Meningkatnya laju pertumbuhan penduduk mendorong terjadinya perubahan dalam pola penggunaan tanah, misalnya dari tanah pertanian menjadi tanah nonpertanian, terutama untuk lokasi permukiman serta industri.

Pengelolaan SDA (*natural resource management*) dimaksud untuk mempertahankan dan meningkatkan kualitas lingkungan yang tinggi, aman dan manusiawi terjamin. Hanya dalam kondisi kualitas lingkungan yang tinggi, manusia lebih banyak memperoleh manfaat dari pada resiko lingkungan. Secara lebih spesifik pengertian pengelolaan SDA meliputi dua hal sebagai berikut:

1. Usaha manusia dalam mengubah ekosistem SDA agar dapat diperoleh manfaat yang maksimal dan berkesinambungan.
2. Proses pengalokasian SDA dalam ruang dan waktu untuk memenuhi kebutuhan manusia dengan senantiasa mengupayakan
 - a) Pertimbangan antara populasi manusia dan sumberdaya.
 - b) Pencegahan kerusakan sumberdaya alam (dan lingkungan)

Oleh karenanya ruang lingkup SDA adalah inventarisasi perencanaan, pelaksanaan/ pemanfaatan dan pengendalian/ pengawasan. Pada dasarnya hanya SDA yang dapat dipulihkan/ diperbaharui (*renewable*) yang benar-benar dikelola. Sedangkan SDA yang tidak dapat diperbarui (*non-renewable*) hanya mengalami eksploitasi tidak dapat dibina kembali. SDA berdasarkan sifatnya dapat digolongkan menjadi SDA yang dapat diperbaharui dan SDA yang tidak dapat diperbarui.

SDA yang dapat diperbaharui merupakan kekayaan alam yang dapat terus ada selama penggunaannya tidak dieksploitasi berlebihan. SDA yang tidak dapat diperbaharui yaitu SDA yang

jumlahnya terbatas karena penggunaannya lebih cepat daripada proses pembentukannya dan apabila digunakan secara terus menerus akan habis seperti contoh tumbuhan, hewan, mikro organisme, sinar matahari, angin, dan air. Kebutuhan SDA meningkat dikarenakan pertambahan penduduk serta kemajuan pembangunan. SDA yang terbatas bahkan menurun. Tanpa upaya pelestarian atau konservasi maka terjadi krisis SDA, kualitas menurun, persediaan langka, keanekaragaman berkurang, dll. Pasal 12 ayat 1 UU No.32 tahun 2009 menyatakan pemanfaatan SDA dilakukan berdasarkan Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (RPPLH).

Pada dasarnya semua SDA harus dimanfaatkan untuk kesejahteraan masyarakat dan umat manusia sesuai dengan kemampuan dan fungsinya. Pemanfaatannya harus sedemikian rupa sesuai dengan UU No. 5 tahun 1990 tentang Konservasi SDA Hayati dan Ekosistemnya, sehingga dapat berlangsung secara lestari untuk masa kini dan masa depan. Pemanfaatan dan pelestarian tersebut seperti tersebut di atas harus dilaksanakan secara serasi dan seimbang sebagai perwujudan dari asas konservasi SDA hayati dan ekosistemnya. (Drachman, F. 2017)

DAFTAR PUSTAKA

- Bestgrade. (2023). Industry Biomass Energy. Dikutip Melalui <https://group.besgrade.com/industry/biomass-energy/>. Diakses Pada Tanggal 5 Agustus 2023.
- BisnisUKM. (2015). Peluang Usaha Budidaya Udang Galah Dengan Air Tawar. Dikutip melalui <https://bisnisukm.com/peluang-usaha-budidaya-udang-galah-dengan-air-tawar.html>. Diakses Pada Tanggal 3 Agustus 2023.
- Christanto, J. (2011). Ruang Lingkup Analisis Sumber Daya Alam dan Lingkungan. Universitas terbuka. Dikutip melalui <https://pustaka.ut.ac.id/lib/wp-content/uploads/pdfmk/PWKL4401-M1.pdf>. Diakses pada 30 Juli 2023.
- Drachman, F. (2017). Pemetaan Potensi Sumber Daya Alam Provinsi Maluku Berbasis Web (Doctoral dissertation, University of Muhammadiyah Malang).
- Energibaik. (2021). Ini pembangkit Listrik Tenaga Ombak Terbesar di Indonesia. Dikutip melalui <https://energibaik.id/ini-pembangkit-listrik-tenaga-ombak-terbesar-di-dunia/>. Diakses pada tanggal 1 Agustus 2023.
- Farah. (2017). Contoh Sumber Daya Alam Yang Dapat Diperbaharui. Dikutip melalui <https://ilmugeografi.com/biogeografi/contoh-sumber-daya-alam-yang-dapat-diperbaharui>. Diakses pada tanggal 19 Juni 2023.
- Hakim, I. (2019). Letak Geografis Astronomis dan Geologis Negara Indonesia. Dikutip melalui <http://insanpelajar.com/letak-geografis-astronomis-dan-geologis-negara-indonesia/>. Diakses pada tanggal 1 Agustus 2023.

- Indonesiaartikel. (2017). Tips Ternak Ayam Kampung. Dikutip melalui <https://indonesiaartikel.com/tips-ternak-ayam-kampung/>. Diakses pada tanggal 2 Agustus 2023.
- Kusnendi, M. S. (2011). Pengertian dan Konsep Dasar Sumber Daya. Universitas terbuka. Dikutip melalui <https://pustaka.ut.ac.id/lib/wp-content/uploads/pdfmk/PKOP4419-M1.pdf>. Diakses pada tanggal 1 Agustus 2023.
- Luminatiam. (2015). Negara Penghasil Energi Nuklir. Dikutip melalui <https://luminatiam.blogspot.com/2015/04/10-negara-penghasil-energi-nuklir.html>. Diakses Pada Tanggal 6 Agustus 2023.
- Maspur. (2022). Sumber Daya Alam Yang Dapat Diperbarui. Dikutip melalui <https://www.freedomswana.id/sumber-daya-alam-yang-dapat-diperbarui/>. Diakses pada tanggal 1 Agustus 2023.
- Pesonaindo. (2016). Paket Wisata Danau Toba Sumatera Utara Lake Toba. Dikutip melalui <https://www.pesonaindo.com/wp-content/uploads/2016/04/Paket-Wisata-Danau-Toba-Sumatera-Utara-Lake-Toba.jpg>. Diakses Pada Tanggal 6 Agustus 2023.
- Rimbakita. (2023). Pembangkit Listrik Tenaga Angin. Dikutip Melalui <https://rimbakita.com/pembangkit-listrik-tenaga-angin/>. Diakses Pada Tanggal 1 Agustus 2023.
- Ridomanik. (2013). Salah Satu Energi Paling Menjanjikan. Dikutip melalui <http://ridomanik.blogspot.com/2013/07/salah-satu-energi-paling-menjanjikan.html>. Diakses Pada Tanggal 4 Agustus 2023.
- Sekolahotomasi. (2018). Dikutip melalui <https://www.sekolahotomasi.com/2018/12/pembangkit-listrik-tenaga-air.html>. Diakses Pada Tanggal 30 Juli 2023.

- Sulistyowati, E., & Prabawati, S. Y. (2005). Dampak Pemanfaatan Sumber Daya Alam Terhadap Keseimbangan Lingkungan. *Kaunia Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(1).
- Teknoaktivitas. (2017). Pemanfaatan Energi Matahari Bagi Manusia. Dikutip melalui <https://tekno.aktivitas.id/2017/10/pemanfaatan-energi-matahari-bagimanusia.html>. Diakses Pada Tanggal 2 Agustus 2023.
- Toiletbisnis. (2022). Usaha Perkebunan Yang Paling Menguntungkan. Dikutip melalui <https://www.toiletbisnis.com/usaha-perkebunan-yang-paling-menguntungkan/>. Diakses Pada Tanggal 1 Agustus 2023.
- Yakin, A. (1997). Ekonomi Sumber Daya dan Lingkungan, Teori dan Kebijakan Pembangunan Berkelanjutan. *Akademika Presindo. Jakarta*.

BAB 7

RANCANGAN PROSES KIMIA BERBASIS *GREEN CHEMISTRY*

Oleh Sinardi

7.1 Pendahuluan

Green Chemistry (kimia hijau) disebut juga kimia berkelanjutan yang mengacu pada pendekatan kimia. Pendekatan kimia yang dimaksud ditujukan untuk merancang, mengembangkan, dan menerapkan proses kimia yang lebih ramah lingkungan atau berkelanjutan. Kimia hijau diperlukan karena banyak industri kimia yang berkembang saat ini memberikan dampak negatif baik bagi lingkungan dan maupun bagi kesehatan manusia. Hal ini berkaitan dengan proses kimia seringkali menghasilkan limbah baik berupa padatan, cairan, atau gas yang tidak ramah lingkungan.

Kimia hijau adalah cabang ilmu kimia yang berfokus pada pengembangan produk, proses, dan sistem kimia yang lebih ramah lingkungan. Kimia hijau bertujuan untuk mengurangi atau menghilangkan penggunaan dan produksi bahan kimia berbahaya dan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan sumber daya alam (Nurbaity, 2011). Tujuan utama kimia hijau adalah untuk mengurangi dampak negatif proses kimia terhadap lingkungan dan tubuh manusia melalui inovasi dalam desain proses, pemilihan bahan baku, dan penggunaan reagen. Mengintegrasikan prinsip kimia hijau ke dalam desain proses kimia akan memungkinkan produk kimia diproduksi dengan cara yang lebih efisien, lebih aman, dan lebih ramah lingkungan.



Gambar 7.1 *Green Chemistry Principles*

Sumber (Khadim, 2020)

Paul Anastas dan John Warner (1998) dalam bukunya "green chemistry mengemukakan bahwa terdapat 12 prinsip kimia hijau yang berkaitan dengan bahan kimia, proses, dan produk yang ramah lingkungan, yaitu:

1. Pencegahan adalah solusi terbaik.
2. Ekonomi atom.
3. Sintesis yang menguntungkan dan bersih.
4. Desain produk yang lebih aman.
5. Pelarut, reagen, dan kondisi reaksi yang lebih aman.
6. Energi yang efisien.
7. Penggunaan bahan baku dan produk terbarukan
8. Mengurangi atau menghindari penggunaan bahan kimia tambahan (reagen).
9. Desain untuk produk dan proses yang dapat terurai secara biologi.
10. Pencegahan kontaminasi.

11. Penggunaan bahan baku dan pelarut yang tidak berbahaya.
12. Desain produk yang dapat digunakan kembali dan daur ulang.

Proses kimia yang sesuai dengan prinsip-prinsip kimia hijau sangat penting karena memiliki dampak positif yang signifikan pada lingkungan, kesehatan manusia, dan berbagai aspek keberlanjutan. Salah satu hal yang dapat dilakukan dengan melakukan inovasi teknologi. Inovasi tersebut dapat berupa desain produk, proses produksi, dan bahan kimia yang digunakan. Agar menghasilkan produk yang lebih efisien, lebih aman, dan berkelanjutan.

7.2 Signifikansi Rancangan Proses Kimia Berbasis Green Chemistry

Pengembangan teknologi dan proses industri dalam bidang kimia memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kemajuan manusia. Namun, kemajuan yang dicapai seringkali diiringi oleh dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Misalnya; peningkatan emisi gas rumah kaca, polusi air dan tanah, serta paparan bahan kimia beracun merupakan beberapa contoh dampak negatif yang dihasilkan oleh proses kimia yang umumnya diproses secara konvensional.

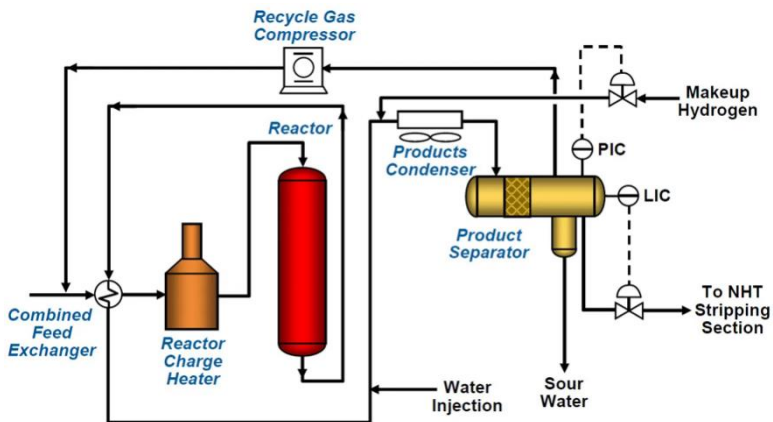
Inilah alasan mengapa pentingnya rancangan proses kimia dengan pendekatan kimia hijau menjadi penting. Pendekatan kimia hijau menjadi paradigma baru dalam ilmu kimia yang berfokus pada pengembangan proses dan produk yang ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan. Pendekatan yang tidak hanya tentang melindungi lingkungan, tetapi juga tentang menciptakan peluang inovasi, meningkatkan efisiensi produksi, dan menjaga kesehatan manusia. Rancangan proses kimia yang mengadopsi prinsip-prinsip kimia hijau, dapat memajukan teknologi industri kimia ke arah yang lebih ramah lingkungan, menjaga sumber daya alam yang terbatas, dan membuka jalan menuju masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan (Mitarlis dkk, 2018).

Berikut beberapa contoh rancangan proses kimia berbasis kimia hijau yang telah diimplementasikan dalam berbagai industri.

7.2.1 Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah

Prinsip kimia hijau pada proses pembuatan biodiesel dari minyak jelantah adalah mengurangi limbah berbahaya yaitu minyak jelantah, dan menggunakan bahan baku yang terbarukan yaitu biodiesel. Proses pembuatan biodiesel menggunakan minyak jelantah, yang merupakan limbah sisa dari industri makanan, sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel. Produksi minyak jelantah yang banyak dan belum terolah keseluruhan dengan baik. Volume minyak jelantah sebagai limbah dapat dikurangi dengan mengolahnya menjadi biodiesel sebagai bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil.

Penelitian yang dilakukan (Zurohaina dkk, 2021) tentang penggunaan katalis $\text{NiMo}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ pada proses *hydrotreating* minyak jelantah menjadi green diesel. Proses *hydrotreating* minyak jelantah adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengolah minyak jelantah menjadi produk yang lebih ramah lingkungan, seperti biodiesel atau bahan bakar alternatif lainnya. Proses ini melibatkan reaksi katalitik dengan hidrogen dalam kondisi tertentu untuk menghilangkan kontaminan dan meningkatkan kualitas minyak jelantah. Proses reaksi *hydrotreating* dilakukan dengan memasukkan minyak jelantah yang sudah bersih kemudian ke dalam reaktor *hydrotreating*. Di dalam reaktor ini, minyak jelantah diolah dalam suasana berkat yang mengandung hidrogen dan katalis. Reaksi ini berfungsi untuk menghilangkan kotoran, mengurangi kadar oksigen, dan menghidrogenasi senyawa-senyawa yang tidak diinginkan, seperti asam lemak bebas.



Gambar 7.2 Ilustrasi Proses *Hydrotreating*

Sumber (ElBanwawi, n.d.)

Secara umum, proses *hydrotreating* menghilangkan bahan pengotor dari minyak dengan cara mereaksikan dengan hidrogen menggunakan katalis pada suhu tinggi. Berikut adalah tahap-tahap umum dalam proses *hydrotreating*:

1. **Pemurnian Awal:** Sebelum memasuki unit *hydrotreating*, umumnya minyak melalui tahap pemurnian awal untuk menghilangkan kotoran kasar, air, partikel, dan senyawa-senyawa organik ringan.
2. **Pemanasan:** Minyak yang sudah bersih dipanaskan ke suhu tinggi, biasanya di atas 300°C. Pemanasan ini diperlukan untuk mencapai suhu reaksi yang optimal dalam reaktor *hydrotreating*.
3. **Reaksi *Hydrotreating*:** Minyak yang sudah dipanaskan kemudian diarahkan ke dalam reaktor *hydrotreating*. Di dalam reaktor ini, minyak tersebut diproses dalam lingkungan hidrogen yang dikatalisis oleh katalis seperti nikel, kobalt, atau molibdenum pada bahan penyangga. Reaksi utama yang terjadi dalam *hydrotreating* adalah hidrogenasi, di mana hidrogen ditambahkan ke senyawa-senyawa yang tidak diinginkan, seperti belerang, nitrogen, dan oksigen. Reaksi-reaksi ini

menghasilkan senyawa yang lebih stabil dan kurang berbahaya.

4. **Pemisahan Produk:** Setelah reaksi *hydrotreating*, campuran produk yang terdiri dari hidrokarbon yang sudah bersih, senyawa sulfur dan nitrogen yang terperangkap dalam katalis, serta gas hidrogen harus dipisahkan. Pemisahan ini dilakukan dalam unit pemisahan yang sesuai.
5. **Pemurnian Tambahan:** Produk hidrokarbon yang dihasilkan kemudian dapat melalui tahap pemurnian tambahan seperti hidroskrining untuk menghilangkan senyawa-senyawa residu yang masih ada.
6. **Penyimpanan dan Distribusi:** Produk minyak bumi yang sudah bersih dan sesuai dengan standar kualitas dapat disimpan dan didistribusikan sesuai dengan kebutuhan. Produk-produk ini seringkali digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku dalam berbagai aplikasi industri.

Pemanfaatan minyak jelantah menjadi biodiesel memiliki banyak manfaat (Yudhistira dan Wibowo, 2023), antara lain:

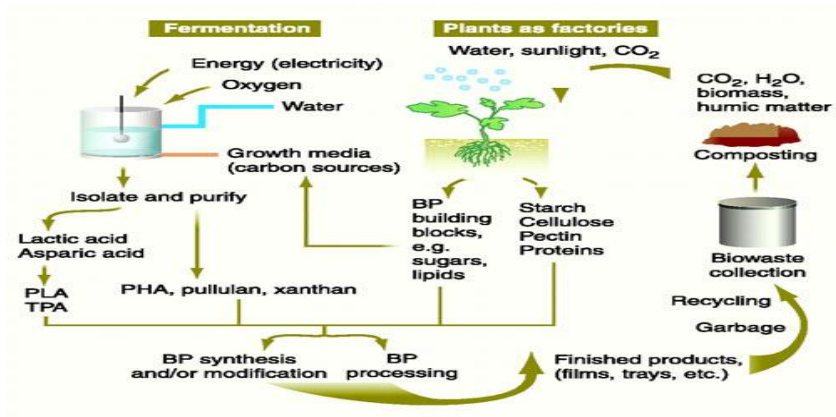
1. **Ramah Lingkungan:** Salah satu keunggulan utama biodiesel dari minyak jelantah adalah ramah lingkungan. Minyak jelantah adalah limbah yang biasanya dibuang atau dibuang dengan cara yang tidak ramah lingkungan. Dengan mengubahnya menjadi biodiesel, kita dapat mengurangi limbah dan penggunaan sumber daya alam yang terbatas.
2. **Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca:** Biodiesel memiliki potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dibandingkan dengan bahan bakar diesel konvensional. Ini karena biodiesel menghasilkan lebih sedikit emisi karbon dioksida (CO_2) dan senyawa sulfur yang berkontribusi pada perubahan iklim.
3. **Sumber Energi Terbarukan:** Minyak jelantah adalah bahan baku terbarukan karena berasal dari tanaman, dan proses produksi biodiesel dari minyak jelantah

memungkinkan penggunaan sumber daya yang dapat diperbaharui daripada bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui.

4. **Kemampuan Recycle:** Dalam siklus produksi biodiesel dari minyak jelantah, biodiesel yang tidak terpakai atau limbah dapat didaur ulang atau digunakan kembali untuk produksi biodiesel baru, sehingga meminimalkan limbah dan meningkatkan efisiensi sumber daya.
5. **Peningkatan Kualitas Udara:** Penggunaan biodiesel dapat mengurangi emisi polutan udara berbahaya seperti partikel, hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), dan karbon hitam yang dapat berdampak negatif pada kualitas udara dan kesehatan manusia.
6. **Penurunan Ketergantungan pada Bahan Bakar Fosil:** Dengan menghasilkan biodiesel dari minyak jelantah, kita dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil konvensional, yang sumber dayanya semakin berkurang.

7.2.2 Produksi Plastik *Biodegradable*

Produksi plastik *biodegradable* atau plastik dapat terurai secara biologi menggunakan prinsip kimia hijau dengan mengurangi penggunaan plastik konvensional yang tidak terurai, menggunakan bahan baku terbarukan yang mudah terurai. Proses pembuatan plastik melibatkan penggunaan bahan baku yang umumnya bersifat terbarukan dan teknologi khusus untuk menghasilkan polimer yang dapat terurai. Plastik *biodegradable* membantu mengurangi pencemaran plastik dan dampak negatif di lingkungan. Pembuatan plastik *biodegradable* dari kulit singkong atau pati kayu adalah salah satu cara yang menarik untuk mengurangi limbah pertanian dan mendukung pembuatan produk plastik yang lebih ramah lingkungan (Kamsiati dkk, 2017; Suryati dkk, 2017; Genalda dan Udjiana, 2023).



Gambar 7.3 Ilustrasi Proses Pembuatan Plastik *Biodegradable*
Sumber: (Huyhua, 2010)

Proses pembuatan plastik *biodegradable* secara umum dapat diuraikan sebagai berikut:

1. **Proses Ekstraksi Bahan Baku:** adalah proses untuk mengambil bahan baku dari sumbernya. Bahan baku yang paling umum digunakan untuk membuat plastik biodegradable adalah pati, selulosa, kitosan, dan hemiselulosa. Pati dapat diekstraksi dari berbagai jenis tanaman, seperti jagung, singkong, dan beras. Selulosa dapat diekstraksi dari kayu, kertas, dan kapas. Kitosan dapat diekstraksi dari cangkang udang dan kepiting. Hemiselulosa dapat diekstraksi dari kayu dan rumput-rumputan.
2. **Proses Pemurnian Bahan Baku:** adalah proses untuk menghilangkan kotoran dan zat-zat yang tidak diinginkan dari bahan baku. Proses pemurnian ini dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti penyaringan, ekstraksi, dan pemurnian dengan pelarut.
3. **Proses Pembentukan Plastik:** adalah proses untuk mengubah bahan baku menjadi plastik. Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti pencetakan, ekstrusi, dan pencampuran.

4. **Proses Pendinginan dan Pemotongan Plastik:** adalah proses untuk mendinginkan dan memotong plastik agar sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Proses pendinginan dapat dilakukan dengan cara alami atau dengan menggunakan mesin pendingin. Proses pemotongan dapat dilakukan dengan menggunakan pisau, gergaji, atau mesin pemotong lainnya.

Pembuatan plastik *biodegradable* dapat juga berasal dari hasil laut. Konsep ini menarik dan relevan dalam upaya mengurangi dampak sampah plastik di ekosistem laut. Pembuatan plastik *biodegradable* dari hasil laut memiliki potensi untuk membantu mengurangi pencemaran plastik di laut dan mendukung penggunaan bahan baku yang dapat diperbaharui. Beberapa mikroorganisme laut, seperti bakteri yang hidup di dalam rumput laut atau di dalam laut dalam, menghasilkan biopolimer yang dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan plastik *biodegradable* (Nurfatia dkk, 2022; Putnarubun dkk, 2022).

Plastik *biodegradable* memiliki keunggulan dibandingkan dengan plastik konvensional (plastik *non-biodegradable*) dalam beberapa aspek, terutama dalam hal dampak lingkungan. Berikut adalah beberapa keunggulan plastik *biodegradable*:

1. **Dekomposisi Alami:** Plastik *biodegradable* dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme dalam lingkungan. Ini berarti mereka tidak akan mengakumulasi di lingkungan dan tidak menyebabkan pencemaran jangka panjang seperti plastik konvensional.
2. **Mengurangi Kerusakan Lingkungan:** Plastik *biodegradable* dapat mengurangi kerusakan lingkungan karena mereka tidak akan mencemari lautan, darat, atau tempat pembuangan sampah dengan plastik yang bertahan lama sekaligus membantu melindungi keanekaragaman hayati dan ekosistem alam.
3. **Reduksi Limbah Plastik:** Plastik *biodegradable* berpotensi mengurangi jumlah limbah plastik yang

dibuang di tempat pembuangan sampah atau di alam. Sehingga mengurangi masalah pencemaran lingkungan dan masalah kesehatan yang terkait dengan pembuangan plastik.

4. **Bahan Baku Terbarukan:** Beberapa jenis plastik *biodegradable* dibuat dari bahan baku terbarukan seperti pati, limbah kulit sayur/buah, dan limbah hasil laut. Hal ini mengurangi ketergantungan pada minyak bumi yang digunakan dalam produksi plastik konvensional.
5. **Energi yang Rendah dalam Produksi:** Produksi plastik *biodegradable* dalam beberapa kasus memerlukan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan plastik konvensional, yang dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca.
6. **Kemampuan Daur Ulang:** Beberapa jenis plastik *biodegradable* dapat didaur ulang atau diurai dalam fasilitas pengolahan kompos sehingga dapat membantu mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah.

Meskipun plastik *biodegradable* memiliki potensi untuk mengurangi dampak lingkungan, tetapi tetap tidak menjadi solusi jangka panjang dalam hal minimalisasi limbah. Prioritas utama tetaplah mengurangi konsumsi plastik secara keseluruhan dan mengadopsi praktik berkelanjutan dalam kehidupan sehari-hari.

7.2.3 Proses Pemurnian Air dengan Fotokatalisis

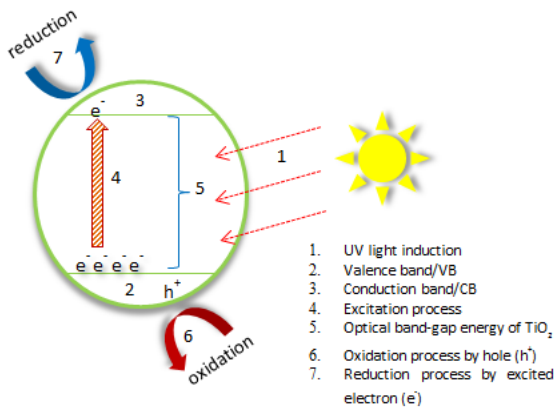
Proses pemurnian air dengan fotokatalisis menggunakan pedekatan kimia hijau dengan mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan menggunakan sumber energi terbarukan. Proses pemurnian air menggunakan fotokatalisis dengan bantuan sinar matahari atau lampu UV untuk membersihkan air dari polutan organik dan anorganik. Proses fitokimia dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia pemurnian yang berbahaya dan menghemat energi.

Fotokatalisis adalah proses penguraian senyawa organik oleh cahaya dengan bantuan katalis. Katalis fotokatalitik yang paling umum digunakan adalah titanium dioksida (TiO_2). TiO_2 dapat menyerap cahaya matahari dan menghasilkan radikal bebas yang dapat bereaksi dengan senyawa organik untuk menguraikannya (Okto, 2023). Fotokatalisis merupakan proses yang efektif untuk mengolah air limbah maupun air bersih yang mengandung senyawa organik. Proses ini juga dapat dilakukan secara berkelanjutan dan tidak menghasilkan limbah berbahaya. Fotokatalisis merupakan teknologi yang potensial untuk digunakan dalam pengolahan air limbah. Teknologi ini dapat membantu untuk mengurangi pencemaran air dan meningkatkan kualitas air minum (Sutanto dkk, 2011; Ferry, 2017).

Proses fotokatalisis dalam pengolahan air menggunakan titanium dioksida (TiO_2) adalah metode yang umum digunakan untuk menghilangkan polutan organik, bakteri, dan senyawa berbahaya lainnya dari air. Proses ini berkelanjutan dan ramah lingkungan yang melibatkan fotokatalisis, di mana TiO_2 bertindak sebagai agen katalis untuk mempercepat reaksi redoks yang terjadi di dalam air ketika terkena cahaya matahari atau sumber cahaya UV (Salsabila, 2010; Fitriana, 2020) Berikut adalah langkah-langkah umum dalam proses fotokatalisis menggunakan TiO_2 dalam pengolahan air:

1. **Preparasi Fotokatalis TiO_2 :** TiO_2 digunakan dalam bentuk partikel anatase atau rutil dengan ukuran partikel yang sangat kecil. Permukaan TiO_2 sering diberi perlakuan khusus untuk meningkatkan reaktivitasnya melalui proses seperti kalsinasi.
2. **Eksposisi Cahaya Matahari atau UV:** Fotokatalis TiO_2 ditempatkan dalam air yang mengandung polutan yang akan dihilangkan. Kemudian, fotokatalis tersebut diekspos pada sinar matahari langsung atau sumber cahaya UV. Sinar ini mengaktifkan TiO_2 dan menghasilkan pasangan elektron (e^-/h^+).

3. **Generasi Pasangan Elektron (e^-/h^+):** Sinar matahari atau UV yang diterima oleh TiO_2 menyebabkan terbentuknya pasangan elektron-hole. Elektron (e^-) yang diangkat ke tingkat energi yang lebih tinggi akan bergerak secara terpisah dalam TiO_2 .
4. **Reaksi Redoks:** Pasangan elektron-hole yang terbentuk selama langkah sebelumnya akan berpartisipasi dalam serangkaian reaksi redoks di permukaan TiO_2 .
5. **Penguraian Polutan:** Radikal hidroksil ($OH^\cdot$) dan reaksi redoks lainnya akan mengurai polutan yang ada dalam air menjadi senyawa-senyawa yang kurang berbahaya.
6. **Pembersihan Air:** Setelah proses fotokatalisis, produk-produk reaksi dan TiO_2 yang tersisa harus dipisahkan dari air. Ini dapat dilakukan dengan metode seperti penyaringan atau pengendapan.



Gambar 7. 4 Ilustrasi Proses Fotolisis

Sumber: (Febyanto, 2017)

Proses fotokatalisis menggunakan TiO_2 dalam pengolahan air adalah salah satu metode yang ramah lingkungan dan efektif untuk membersihkan air dari berbagai polutan. Ini juga dapat digunakan secara berkelanjutan dengan mengandalkan sumber

energi alami seperti matahari. Namun, efisiensi fotokatalisis dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis TiO_2 , intensitas cahaya, kualitas air, dan waktu kontak antara TiO_2 dan air, sehingga perancangan eksperimen yang cermat dan pengoptimalan parameter sangat penting.

7.3 Kesimpulan

Penerapan prinsip-prinsip kimia hijau dalam industri berkaitan dengan proses kimia memiliki manfaat utama yaitu:

1. **Keberlanjutan Lingkungan:** Rancangan proses kimia berbasis kimia hijau berfokus pada mengurangi dampak negatif industri terhadap lingkungan. Mencakup pengurangan penggunaan bahan kimia beracun, limbah berbahaya, dan emisi polutan yang merusak ekosistem.
2. **Keamanan Kesehatan Manusia:** Prinsip kimia hijau berusaha meminimalkan risiko bagi kesehatan manusia dengan menghindari atau menggantikan bahan kimia berbahaya. Hal ini dapat mengurangi insiden kecelakaan kerja dan dampak jangka panjang terhadap pekerja dan masyarakat sekitar.

Secara keseluruhan, rancangan proses kimia berbasis kimia hijau menjadi solusi yang memadai untuk menghadapi tantangan lingkungan dan kesehatan di masa depan. Bukan hanya tentang tanggung jawab untuk menjaga kelestarian lingkungan tetapi juga merupakan langkah yang strategis menuju keberlanjutan ekonomi dan lingkungan yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ferry, V. (2017) 'Ozonasi Fotokatalitik Untuk Pengolahan Air dan Air Limbah', (December), pp. 1–10. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/144879249.pdf>.
- Fitriana, F.U. (2020) 'Pengolahan Air Dengan Fotokatalisis Menggunakan Katalis Titanium', jurnal Teknik Kimia Indonesia [Preprint].
- Genalda, M.S.S. dan Udjiana, S.S. (2023) 'Pembuatan Plastik Biodegradable dari Pati Limbah Kulit Kentang (*Solanum Tuberosum* L.) dengan Penambahan Filler Kalsium Silikat', DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi, 7(2), pp. 320–327. Available at: <https://doi.org/10.33795/distilat.v7i2.248>.
- Kamsiati, E., Herawati, H. dan Purwani, E.Y. (2017) 'Potensi Pengembangan Plastik Biodegradable Berbasis Pati Sagu dan Ubikayu di Indonesia / The Development Potential of Sago and Cassava Starch-Based Biodegradable Plastic in Indonesia', Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 36(2), p. 67. Available at: <https://doi.org/10.21082/jp3.v36n2.2017.p67-76>.
- Mitarlis, M., Azizah, U. dan Yonatha, B. (2018) 'Pemanfaatan Indikator Alam dalam Mewujudkan Pembelajaran Kimia Berwawasan Green Chemistry', Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 3(1), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.26740/jppipa.v3n1.p1-7>.
- Nurbaity, N. (2011) 'Pendekatan Green Chemistry Suatu Inovasi dalam Pembelajaran Kimia Berwawasan Lingkungan', JRPK: Jurnal Riset Pendidikan Kimia, 1(1), pp. 13–21. Available at: <https://doi.org/10.21009/JRPK.011.02>.
- Nurfatia, R. Susanti, R. Nabila, T. S. dan Tulus, S. (2022) 'Pemanfaatan Alga Coklat *Sargassum* sp pada Pembuatan Kemasan Air Mineral yang Dapat Dikonsumsi', Jurnal Jaring SainTek, 4(1), pp. 21–30. Available at: <https://doi.org/10.31599/jaringsaintek.v4i1.981>.

- Okto, H.S. (2023) 'Review : Green Synthesis Nanopartikel TiO₂ sebagai Material Fotokatalis', 12, pp. 82–91.
- Putnarubun, C., Ngabalin, D. dan Bugis, M. (2022) 'Studi Pendahuluan Pembuatan Bioplastik dari Alga *Caulerpa* sp. dengan dengan Variasi Konsentrasi Asam Asetat', *Jambura Fish Processing Journal*, 4(1), pp. 46–51.
- Salsabila, F. (2010) 'Pengolahan Air dan Limbah dengan Reaktor Membran Fotokatalitik', *Jurnal Teknik Kimia*, 1(1), pp. 1–7.
- Suryati, S., Meriatna, M. dan Marlina, M. (2017) 'Optimization of bioplastic production process from cassava peel waste starch', *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 5(1), p. 78. Available at: <https://ojs.unimal.ac.id/jtk/article/view/81/67>.
- Sutanto, H. Hidayanto, E. Subagio, A. dan Widiyandari, H. (2011) 'Pembuatan Sistem Pengolah Air Bersih Menggunakan Material', *Semnas Sains dan Teknologi*, 2, pp. 21–26. Available at: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.36499/psnst.v1i1.270>.
- Yudhistira, F.H. dan Wibowo, A.A. (2023) 'Green Diesel: Bahan Bakar Cair Terbarukan Pengganti Biodiesel', *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(4), pp. 979–987. Available at: <https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.486>.
- Zurohaina, Z. Rusnadi, I. M. Amin, J. Zikri, A. Sabatini, R. dan Lindawati, L. (2021) 'Penggunaan Katalis NiMo/ γ -Al₂O₃ Pada Proses Hydrotreating Minyak Jelantah menjadi Green Diesel', *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 1(12), pp. 465–474. Available at: <https://doi.org/10.52436/1.jpti.112>.

BAB 8

SUMBER-SUMBER ENERGI ALTERNATIF

Oleh Rismul Trianto Salawali

8.1 Pendahuluan

Sumber daya alam adalah sumber daya alam yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan dan kesejahteraan manusia. Sumber daya alam terbarukan termasuk sumber daya alam yang dapat diperbaharui, seperti air, tanaman, hewan, dan udara. Sebaliknya, sumber daya alam yang tidak terbarukan termasuk sumber daya alami yang tidak dapat diperbaharui, seperti gas, batubara, minyak. Sumber daya alam memainkan peran penting dalam menjaga sistem kehidupan dan sebagai modal pertumbuhan ekonomi.

Kebutuhan energi manusia terus meningkat seiring tingkat kehidupan. Saat ini, bahan bakar minyak (BBM) menyumbang sebagian besar konsumsi energi nasional, yaitu 52,50%, gas 19,04%, batubara 21,52%, air 3,73%, panas bumi 3,01%, dan energi baru 0,2%. Energi fosil terus digunakan karena kebutuhan dan aktivitas manusia yang meningkat. Namun, energi fosil juga menyebabkan polusi udara dan kerusakan alam yang signifikan, yang menjadikan penggunaan energi menjadi masalah yang mendorong negara-negara berkembang untuk mengembangkan sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Pengembangan dan penerapan teknologi energi terbarukan terus berkembang untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan biaya yang lebih rendah, sehingga menjadi alternatif yang lebih menarik dan berkelanjutan dalam memenuhi kebutuhan energi global. Dengan adanya buku ini

dapat memberikan informasi terkait sumber-sumber energi alternatif yang dapat kita jadikan sebagai referensi dalam melakukan penelitian-penelitian terkait energi baru dan terbarukan (EBT).

8.2 Sumber Daya Energi dan Kebijakan EBT

Sumber daya energi adalah salah satu dari banyak sumber daya yang dimiliki Indonesia. Namun, seperti yang dinyatakan oleh Febriananingsih dalam Majalah Hukum Nasional Nomor 2 Tahun 2019, energi fosil yang dikenal sebagai energi tidak terbarukan menyumbang 94,3 % dari kebutuhan energi pada tahun 2013. Energi baru dan terbarukan (EBT) menyumbang 5,7 %.

Tabel 8.1 Potensi Energi Fosil 2011-2012

Jenis Energi	Tahun	Cadangan Potensial	Cadangan Terbukti	Total
Minyak Bumi (Miliar Barel)	2011	3.69	4.04	7.73
	2012	3.67	3.74	7.41
Gas Bumi (TSCF)	2011	48.18	104.71	152.89
	2012	47.35	103.35	150.70
		Sumber Daya	Cadangan	
Batubara (Miliar Ton)	2011	120.33	28.01	
	2012	119.42	28.97	

(CDIEMR, 2012; 2013)

Energi adalah sumber daya alam yang paling penting untuk kemajuan bangsa Indonesia. Oleh karena itu, untuk mengelola sumber daya ini, terutama sektor energi dalam jangka panjang, diperlukan perencanaan yang terintegrasi untuk pengembangan sumber daya ini agar dapat memastikan ketersediaan energi dan keberlanjutan pasokan energi dalam jangka panjang. Indonesia memiliki enam sumber daya energi baru dan terbarukan (EBT): air, surya, bioenergi, angin, arus laut, dan panas bumi. Potensi untuk memanfaatkan sumber daya ini sangatlah besar.

Dalam Pasal 2 Peraturan Pemerintah (PP) tentang Kebijakan Energi Nasional tahun 2014, disebutkan bahwa kebijakan energi nasional harus dikelola dengan cara yang adil, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan untuk mencapai kemandirian dan ketahanan energi nasional (Arsita, 2021). Pengelolaan energi memastikan ketersediaan energi yang memadai dengan memanfaatkan potensi sumber daya di Indonesia. Menurut situs web resmi Dewan Energi Nasional (DEN) Republik Indonesia, untuk mengelola sumber daya energi di Indonesia, pemerintah telah membentuk Dewan Energi Nasional (DEN) sesuai dengan UU No. 30 Tahun 2007. Badan Koordinasi Energi Nasional, yang disingkat BAKOREN pada tahun 1981, didirikan oleh pemerintah sebelum pembentukan DEN. BAKOREN, yang dipimpin oleh Menteri ESDM, bertanggung jawab untuk membuat kebijakan energi, membuat program pengembangan dan pemanfaatan energi, dan mengatur pelaksanaan program.

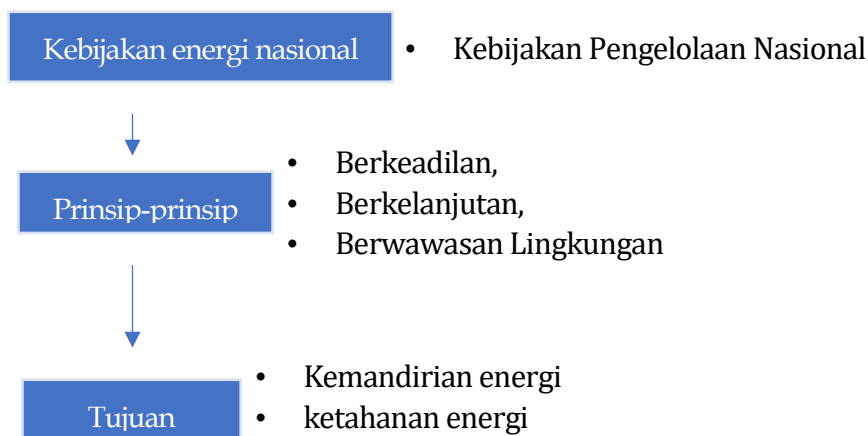
Dalam analisis kebijakan untuk pengembangan energi terbarukan, ada berbagai macam peraturan kebijakan yang telah ditetapkan oleh pemerintah dan badan-badan terkait. Beberapa contoh peraturan kebijakan yang umumnya terkait dengan pengembangan energi terbarukan meliputi:

- a) Pengurangan Subsidi Energi Fosil: Mengurangi subsidi bagi energi fosil bisa membuat energi terbarukan lebih kompetitif secara ekonomi.
- b) Batasan Emisi Karbon: Menetapkan batasan emisi karbon atau sistem perdagangan emisi dapat memberikan insentif bagi perusahaan untuk beralih ke energi terbarukan guna mengurangi dampak lingkungan.
- c) Kebijakan Pemberdayaan Masyarakat: Mendorong partisipasi masyarakat dalam pengembangan proyek energi terbarukan, seperti proyek panel surya komunitas atau penanaman pohon untuk energi biomassa.
- d) Kewajiban Pembelian Energi Terbarukan: Pemerintah dapat mengeluarkan kebijakan yang mewajibkan perusahaan penyedia energi untuk membeli sejumlah persentase energi

dari sumber terbarukan. Ini mendorong permintaan energi terbarukan dan memberikan pasar yang lebih stabil.

- e) Standar Portofolio Energi Terbarukan (Renewable Portfolio Standards/RPS): Kebijakan ini mewajibkan penyedia energi untuk memiliki persentase tertentu dari portofolio energi mereka berasal dari sumber energi terbarukan
- f) Program Penelitian dan Pengembangan: Investasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi energi terbarukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya produksi.

Bab 1, Pasal 1, ayat 3 dari Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) menyatakan bahwa untuk mencapai kemandirian dan ketahanan energi nasional, kebijakan energi nasional (KEN) adalah kebijakan pengelolaan energi yang didasarkan pada prinsip berkeadilan, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan.



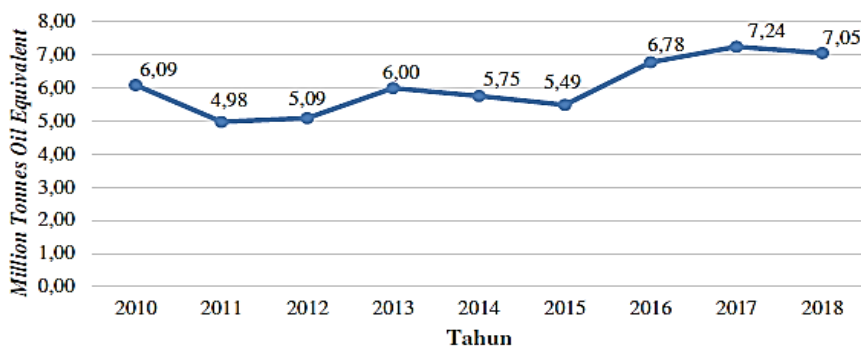
Gambar 8.1 Kebijakan Energi Nasional (KEN) di Indonesia tahun 2017

(Sumber : *Munich Personal RePEc Archive*, 2017)

8.3 Kondisi Energi Dunia Saat Ini

Seiring dengan pertumbuhan dan perkembangan ekonomi global, kebutuhan akan energi primer telah meningkat secara signifikan. Pada tahun 2011, kebutuhan energi primer tercatat sebesar 10.668 juta TOE atau 82 % dari total kebutuhan yang tersedia, dan diperkirakan akan meningkat menjadi sebesar 14.898 juta TOE pada tahun 2035, meskipun pangsaanya akan turun menjadi 80 %. Pada tahun 2018, total produksi energi primer mencapai 411,6 MTOE.

Untuk memenuhi kebutuhan industri dalam negeri, Indonesia telah mengimpor 261,4 MTOE (atau 64 % dari total produksi), terutama LNG dan batubara. Selain itu, Indonesia juga mengimpor 43,2 MTOE produk BBM dan minyak mentah, serta batubara kalori tinggi dalam jumlah kecil. Menurut laman Directory Journal of Economic volume 2 nomor 3, konsumsi energi terbarukan di Indonesia dari tahun 2010 hingga 2018 dapat dilihat pada grafik dibawah ini:



Sumber: *BP Statistical Review of World Energy, 2019*

Grafik di atas menunjukkan bahwa penggunaan energi terbarukan terus meningkat meskipun masih dianggap sangat rendah. Ini menunjukkan bahwa konsumsi energi fosil terus mendominasi penggunaan energi terbarukan. Oleh karena itu, penting bagi masyarakat Indonesia untuk mulai mengembangkan energi baru dan terbarukan.

8.4 Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT)

Energi fosil, terutama minyak bumi, gas, dan batubara, masih menjadi sumber energi utama di Indonesia. Pemerintah Indonesia memprioritaskan penggunaan energi baru untuk mengurangi konsumsi energi fosil dan menggantinya dengan energi baru dan terbarukan yang aman dan ramah lingkungan. Akibatnya, ada kekhawatiran bahwa Indonesia akan mengalami defisit energi pada tahun-tahun mendatang jika sumber-sumber energi baru dan terbarukan (EBT) tidak ditemukan. Indonesia memiliki banyak potensi untuk mengembangkan sumber daya energi baru terbarukan (EBT). Jurnal Energi Edisi 02 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2016 menunjukkan potensi ini, di antaranya:

Tabel 8.2 Potensi EBT di Indonesia

Jenis ETB	Potensi (MW)
Angin	950
Surya	11.000
Air	75.000
Biomassa	32
Biofuel	32
Laut	60.000
Panas Bumi	29.000

Sumber: Jurnal Energi 2016

Presiden Jokowi juga menyatakan komitmen Indonesia untuk mengurangi emisi sebesar 29% pada tahun 2030 dengan dukungan internasional, dan bahkan bisa mencapai 40%. khususnya dalam

bidang energi, mengalihkan subsidi BBM ke sektor produktif, menghasilkan energi terbarukan hingga 23% dari konsumsi nasional pada tahun 2025, dan mengubah sampah menjadi sebuah energi. Energi terbarukan ini tidak hanya berkelanjutan dan dapat dipulihkan kembali, tetapi juga lebih bersih dan ramah lingkungan. berikut sumber-sumber energi alternatif, antara lain:

8.4.1 Energi Angin

Energi angin dapat diubah menjadi energi mekanik untuk menghasilkan usaha. Banyak negara membangun turbin angin sebagai sumber tenaga listrik karena energi angin tidak menimbulkan polusi. Energi ini telah digunakan secara signifikan di beberapa provinsi di Indonesia, termasuk Nusa Tenggara Barat (NTB), Nusa Tenggara Timur (NTT), Yogyakarta, Sulawesi Selatan, dan Tenggara. Beberapa negara saat ini mengembangkan sumber energi terbarukan seperti produsen listrik tenaga bayu (PLTB). Pemanasan radiasi matahari mengubah suhu udara, menghasilkan pergerakan udara, yang merupakan sumber energi bayu. Turbin angin dapat bekerja menggunakan energi kinetik tenaga angin.



Gambar 8.2 PLTB Jeneponto, Sulawesi Selatan
(Sumber : *jendelanasional.id*, 2023)

Fasilitas yang menggunakan angin sebagai sumber daya menghasilkan listrik dikenal sebagai PLTB. Ini semakin populer

sebagai salah satu jenis energi terbarukan karena dapat mengurangi emisi dan mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil. Sebagian besar PLTB menggunakan turbin angin, yang terdiri dari bilah-bilah yang dipasang pada rotor. Ketika angin bertiup, bilah-bilah ini berputar karena tekanan angin, yang menggerakkan rotor. Generator kemudian terhubung ke rotor, yang menghasilkan energi listrik dari gerakan mekanik.

Analisis data tentang kekuatan angin dan turbulensi angin untuk menentukan ketinggian turbin angin. Kecepatan angin adalah salah satu komponen yang mempengaruhi jumlah energi listrik yang dihasilkan, karena kecepatan angin mempengaruhi kecepatan putaran kincir, yang akan menggerakkan generator. Kincir angin dengan jari-jari 1 meter dan ketinggian 10 meter di atas permukaan tanah dapat menghasilkan energi listrik sesuai dengan kondisi dan syarat berikut.

Tabel 8.3 Tingkatan Kecepatan Angin

Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
0,00–0,02	-----
0,3–1,5	Asap mengarah keatas
1,6–3,3	Asap akan mengikuti arah angin
3,4–5,4	Dapat merasakan adanya hembusan angin
5,5–7,9	Dapat dilihat dengan adanya debu berterbangan
8,0–10, 7	Ranting pohon kecil bergoyang
10,8–13,8	Ranting pohon besar bergoyang
13,9–17,1	Dapat dirasakan hembusan angin pada telinga
17,2–20,7	Dapat mematahkan ranting pohon
20,8–24,4	Dapat mengakibatkan rumah rubuh
24,5–28,4	Dapat menimbulkan kerusakan pada sekitar
28,5–32,6	Menimbulkan kerusakan yang cukup parah
32,7–36,9	Tornado

Sumber: Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 2011

Tingkatan kecepatan angin biasanya diukur dengan menggunakan skala Beaufort atau dengan mengacu pada kecepatan dalam satuan kilometer per jam (km/jam) atau knot (1 knot = 1,852 km/jam). Penting untuk diingat bahwa kecepatan angin yang lebih tinggi dapat berdampak besar pada lingkungan dan infrastruktur. Untuk pembangkit listrik tenaga angin, turbin angin biasanya dirancang untuk beroperasi pada rentang kecepatan angin tertentu yang ideal untuk menghasilkan energi listrik dengan efisien.

8.4.2 Energi Surya

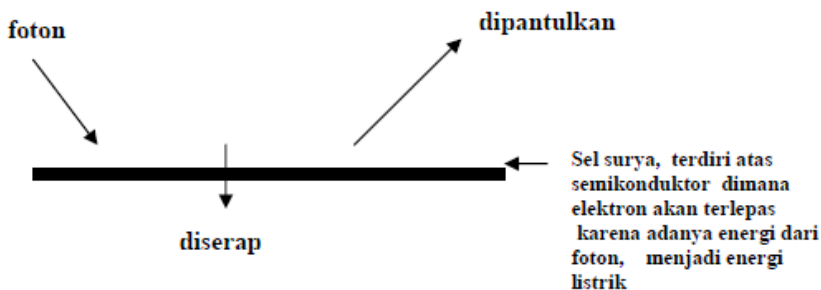
Energi surya adalah sumber yang bebas polusi dan alami. Energi ini berasal dari matahari, yang merupakan sumber energi bagi kehidupan. Cahaya matahari dapat diubah menjadi energi panas atau listrik. Potensi energi surya di Indonesia secara teoritis cukup besar karena wilayahnya selalu disinari matahari sepanjang tahun. Akibatnya, komponen listrik untuk pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menjadi lebih murah. Hakim (2020) mengatakan bahwa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah teknologi pembangkit listrik yang dapat diterapkan di mana pun. PLTS sangat mudah dipasang, dioperasikan, dan dirawat, sehingga masyarakat mudah menerimanya.

Tenaga surya mengacu pada konversi sinar matahari menjadi listrik menggunakan sel fotovoltaik (PV) atau panel surya. Tenaga surya adalah sumber energi terbarukan dan bersih yang memanfaatkan energi yang dipancarkan oleh matahari untuk menghasilkan listrik. Ini telah mendapatkan popularitas yang signifikan sebagai alternatif berkelanjutan untuk bahan bakar fosil tradisional untuk memenuhi kebutuhan energi. Tenaga surya dapat secara signifikan mengurangi tagihan listrik dengan menghasilkan listrik di tempat dan berpotensi menghilangkan atau mengurangi kebutuhan untuk membeli listrik dari jaringan. Panel surya memiliki bagian yang bergerak minimal dan membutuhkan

sedikit perawatan, Pembersihan teratur dan pemeriksaan yang cukup. Ada dua cara untuk mengkonversi energi surya:

- a) Penting untuk diingat bahwa kecepatan angin yang lebih tinggi dapat berdampak besar pada lingkungan dan infrastruktur. Untuk pembangkit listrik tenaga angin, turbin angin biasanya dirancang untuk beroperasi pada rentang kecepatan angin tertentu yang ideal untuk menghasilkan energi listrik dengan efisien.
- b) Energi Panas Surya (Energi Termal Surya): Energi surya juga dapat digunakan untuk menghasilkan panas. Energi panas surya digunakan dalam sistem pemanas air surya atau kolektor surya. Kolektor surya menyerap panas dari sinar matahari dan mentransfernya ke cairan atau udara yang mengalir melalui kolektor. Panas ini kemudian dapat digunakan untuk pemanas air, pemanas ruangan, atau sistem pemanas industri.

Cahaya matahari terdiri dari foton atau partikel energi surya, dimana foton inilah yang akan dikonversi menjadi energi listrik, Setelah diserap oleh sel surya, foton atau partikel energi surya akan diserahkan dan diserahkan sebagian atau sepenuhnya kepada elektron di dalam sel surya. Dengan energi ini, elektron dapat lepas dari posisi normalnya terhadap atom dan membentuk sirkuit listrik.



Gambar 8.3 Proses Tenaga Surya Menjadi Energi Listrik
(Sumber : *Teknologi energi*, 2005)

8.4.3 Energi Air

Hidroelektrik, juga dikenal sebagai tenaga hidrolik, adalah bentuk energi terbarukan yang menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi air yang mengalir. Ini adalah salah satu sumber energi terbarukan tertua dan paling banyak digunakan, dengan sejarah berabad-abad. Hidroelektrik bergantung pada kekuatan gravitasi air saat bergerak ke bawah karena siklus alami penguapan, kondensasi, dan curah hujan. Dengan menggerakkan sebuah turbin, energi tenaga air dapat diubah menjadi energi listrik. Di Indonesia sendiri, energi air telah banyak digunakan, seperti tenaga listrik berbasis hidro. Pembangkit listrik mini dan mikro hidro telah mencapai target yang diinginkan untuk menghasilkan energi air. berikut jenis-jenis sistem tenaga air:

- a) *Run of River Hydropower*: Jenis sistem ini memungkinkan air mengalir melalui turbin tanpa reservoir besar. Ini bergantung pada aliran alami sungai atau sungai.
- b) *Reservoir Hydropower*: Dalam sistem ini, kolam menciptakan reservoir, memungkinkan kontrol lebih baik dari aliran air. Air dilepaskan dari reservoir sesuai kebutuhan untuk menghasilkan listrik.
- c) *Pumped Storage Hydropower*: Sistem ini menggunakan dua reservoir, satu di ketinggian yang lebih tinggi dan satu di tingkat yang lebih rendah. Selama periode permintaan listrik rendah, kelebihan listrik digunakan untuk memompa air dari tangki bawah ke tangki atas. Ketika permintaan tinggi, air yang disimpan dilepaskan kembali ke reservoir bawah melalui turbin untuk menghasilkan listrik.

Dalam perencanaan pembangkit tenaga hidro, faktor penting yang harus diperhatikan adalah ketinggian dan arus air. Ada beberapa jenis tenaga air yang berbeda:

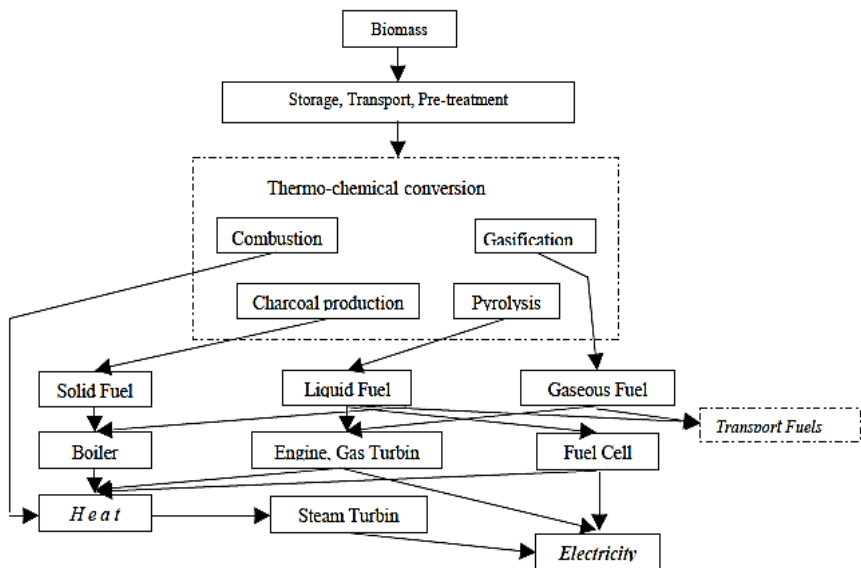
- a) Klasifikasi berdasarkan ketinggian
 - Head Tinggi : $H > 100 \text{ m}$

- Head menengah : 30-100 m
- Head rendah : 2-30 m
- b) Klasifikasi berdasarkan Kapasitas
 - PLTA Pico : <500 W
 - PLTA Micro : 0.5-100 kW
 - PLTA Mini : 100-1000 kW
 - PLTA Kecil : 1-10 MW
 - PLTA Skala Penuh: >10 MW

8.4.4 Energi Biomassa

Energi Biomassa adalah proses daur ulang organik yang dihasilkan oleh fotosintesis. Di Indonesia, biomassa biasanya digunakan sebagai bahan bakar yang tidak menguntungkan atau sebagai limbah setelah mengeluarkan produk utamanya. Secara umum, ada tiga metode utama untuk mengubah biomassa menjadi bahan bakar: pembakaran langsung, konversi termokimia, dan konversi biokimia. Metode pembakaran langsung biasanya merupakan metode yang paling sederhana karena biomassa biasanya dapat dibakar langsung. Biomassa mengacu pada materi organik, biasanya berasal dari tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme, yang dapat digunakan sebagai sumber energi atau diubah menjadi berbagai produk yang berguna. Biomassa dapat mencakup berbagai macam bahan, termasuk kayu, sisa-sisa pertanian, limbah tanaman, sampah hewan, alga, dan banyak lagi. Ini adalah sumber daya yang dapat diperbaharui dan berpotensi berkelanjutan, karena dapat terus-menerus diperbarui melalui proses alami.

Gambar berikut menunjukkan rantai konversi biomassa menjadi energi panas, listrik, dan bahan bakar kendaraan, menurut Arhamsyah (2010).



Gambar 8.4 Rantai Konversi Biomassa

(Sumber : *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 2010)

Salahsatu contoh di Indonesia dalam konversi energi biomassa yang masih dilakukan sampai sekarang yaitu biobriket. Umumnya biobriket yang banyak digunakan briket yang berbahan dasar batubara, akan tetapi untuk menjadikan sumber energi terbarukan, dilakukan beberapa campuran dengan biomassa lainnya dengan mempertimbangkan efek carbon pada biobriket tersebut.

8.4.5 Energi Biofuel

Biofuel dapat berasal dari tanaman, limbah biologi pertanian, rumah tangga, atau industri, dan dibuat dengan cepat dari biomassa daripada melalui proses alami yang sangat lambat yang menghasilkan minyak. Biofuel memiliki banyak potensi untuk mengurangi dampak perubahan iklim, dengan tingkat emisi yang sebanding dengan bahan bakar fosil dalam beberapa situasi dan emisi negatif dalam situasi lain. Sebagian besar

biofuel digunakan untuk transportasi, tetapi juga dapat digunakan untuk pemanasan dan pembangkit listrik. Sebagian besar orang menganggap biofuel sebagai sumber energi terbarukan. Biofuel dapat berupa:

a) Biogas

Biogas adalah bahan bakar terbarukan dan aman bagi lingkungan yang dihasilkan melalui pencernaan anaerob bahan organik seperti limbah pertanian, limbah makanan, air limbah, dan bahan organik lainnya. Proses ini dilakukan oleh mikroorganisme tanpa oksigen, menghasilkan biogas dan produk sampingan yang kaya nutrisi yang disebut digestate.

Biogas terutama terdiri dari metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), bersama dengan jejak gas lain seperti hidrogen sulfida (H_2S). Ini dapat digunakan sebagai sumber energi serbaguna dengan berbagai aplikasi. Biogas dikumpulkan dan dapat ditingkatkan melalui proses seperti scrubbing, adsorpsi tekanan swing, atau pemisahan membran untuk menghilangkan kotoran dan meningkatkan kandungan metana. Biogas, ketika dibersihkan dan ditingkatkan untuk menghilangkan kotoran seperti CO_2 dan H_2S , dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan yang dapat diperbaharui yang dikenal sebagai biometan atau gas alam terbarukan. (RNG). Sementara biogas memiliki banyak keuntungan, implementasinya yang sukses membutuhkan pertimbangan yang hati-hati dari faktor-faktor seperti ketersediaan bahan baku, desain digester, kualitas gas, dan infrastruktur untuk digunakan. Selain itu, ekonomi produksi biogas dapat bervariasi tergantung pada kondisi lokal, jenis bahan baku, dan pasar energi.

b) Biodiesel

Biodiesel adalah bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan yang digunakan sebagai pengganti bahan bakar diesel konvensional yang biasanya berasal dari minyak. Ini dibuat dari berbagai bahan, terutama minyak sayuran, lemak hewani, atau minyak masak yang didaur ulang. Karena terbuat dari sumber daya terbarukan dan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, biodiesel dianggap baik untuk produksi dan ramah lingkungan.

Produksi biodiesel melibatkan proses kimia yang disebut transesterifikasi. Dalam proses ini, trigliserida (yang ditemukan dalam lemak dan minyak) bereaksi dengan alkohol (biasanya metanol) dan katalis (often sodium hydroxide or potassium hydroxide). Reaksi ini memecah trigliserida menjadi metil ester (biodiesel) dan gliserol. Biodiesel yang dihasilkan dapat digunakan dalam mesin diesel tanpa modifikasi besar, baik sebagai campuran dengan bahan bakar diesel tradisional atau sebagai biodiesel murni. (B100).

Biodiesel sering digunakan dalam campuran dengan bahan bakar diesel tradisional, seperti B5 (5% biodiesel dan 95% diesel) atau B20 (20% biodiesel dan 80% diesel). Pilihan bahan baku dan metode produksi dapat mempengaruhi keberlanjutan keseluruhan dan dampak lingkungan biodiesel. Penting untuk dicatat bahwa lanskap biodiesel terus berkembang, dengan penelitian dan pengembangan yang sedang berlangsung bertujuan untuk mengatasi tantangan dan meningkatkan kelangsungan hidup secara keseluruhan sebagai alternatif bersih untuk bahan bakar diesel tradisional.

c) Bioethanol

Bioetanol, seringkali hanya disebut sebagai etanol, adalah jenis bahan bakar terbarukan yang diproduksi dari fermentasi gula yang ditemukan dalam berbagai

bahan baku, seperti tanaman seperti cengkeh, jagung, gandum, dan bahan tanaman lainnya. Ini adalah alkohol yang dapat digunakan sebagai pengganti atau aditif untuk bensin di mesin pembakaran internal. Produksi bioetanol melibatkan beberapa langkah:

- 1) Penyediaan bahan baku: Bahan baku yang dipilih diproses untuk mengekstrak atau mengubah gula yang terkandung di dalamnya. Misalnya, dalam kasus jagung, amandel biasanya diubah menjadi gula.
- 2) Fermentasi: Gula kemudian fermentasi menggunakan ragi atau mikroorganisme lainnya. Selama fermentasi, gula diubah menjadi etanol dan karbon dioksida melalui proses biokimia.
- 3) Destilasi: Setelah fermentasi, campuran itu didestilasi untuk memisahkan etanol dari air dan produk sampingan lainnya. Hasilnya adalah larutan etanol yang terkonsentrasi.
- 4) Dehidrasi: Penyelesaian etanol yang terkonsentrasi mungkin mengalami pemrosesan lebih lanjut, seperti dehidrasi, untuk menghapus air yang tersisa dan meningkatkan konsentrasi ethanol.
- 5) Campuran: Produk etanol akhir dicampur dengan bensin untuk membuat berbagai campuran ethanol-benzin, seperti E10 (10% etanole dan 90% bensin), E15 (15% etanoli), dan E85 (85% ethanole dan 15% bensin). Campuran tergantung pada kandungan etanol yang diinginkan dan persyaratan peraturan.

Secara keseluruhan, bioetanol adalah bahan bakar terbarukan yang banyak digunakan yang dapat berkontribusi pada mengurangi dampak lingkungan transportasi dan diversifikasi sumber energi. Namun, pertimbangan hati-hati tentang pilihan bahan baku, metode produksi, dan dampak lingkungan sangat penting untuk mewujudkan potensi penuhnya sebagai solusi energi berkelanjutan.

d) Biokerosin

Biokerosen, juga dikenal sebagai kerosin penerbangan terbarukan atau bahan bakar penerbangan berkelanjutan (SAF), jenis bahan bakar ini merupakan konversi energi alternatif yang berasal dari bahan baku yang dapat diperbaharui dan bukan bahan bakar fosil. Biokerosin ini dirancang untuk menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan untuk industri penerbangan.

Tujuan produksi biokerosin adalah untuk mengurangi jejak karbon dan dampak lingkungan penerbangan dengan menggunakan bahan baku yang dapat diisi ulang dan yang mengeluarkan lebih sedikit gas rumah kaca selama siklus hidup mereka dibandingkan dengan bahan bakar fosil tradisional. Proses produksi untuk biokerosin mirip dengan biodiesel dan bioetanol, yang melibatkan konversi biomassa menjadi bahan bakar yang cocok untuk penggunaan penerbangan. Bahan baku yang digunakan dapat bervariasi dan dapat mencakup tanaman non makanan, alga, limbah minyak, dan sumber berkelanjutan lainnya.

e) Bioavtur

"Bioavtur" adalah istilah yang tampaknya mengacu pada "bahan bakar turbin bio-aerial," yang juga dikenal sebagai "bahan bakar biojet" atau "bahan api penerbangan berkelanjutan". (SAF). Ini adalah jenis bahan bakar terbarukan yang dirancang untuk digunakan dalam penerbangan, khususnya di mesin jet. Sama seperti biofuel lainnya, tujuannya adalah untuk mengurangi jejak karbon dan dampak lingkungan penerbangan dengan menggunakan bahan baku yang dapat diperbaharui sehingga menghasilkan emisi gas yang lebih sedikit dibandingkan dengan bahan bakar fosil tradisional.

Bioavtur atau biojet bahan bakar diproduksi melalui proses yang sama seperti biofuel lainnya, yang melibatkan konversi biomassa menjadi bahan bakar yang cocok untuk penggunaan penerbangan. Bahan baku dapat bervariasi dan mungkin termasuk tanaman non-makanan, alga, limbah minyak, dan sumber berkelanjutan lainnya. Proses produksi mencakup pemilihan bahan baku, konversi, pengolahan, dan campuran untuk memenuhi spesifikasi yang ketat yang diperlukan untuk bahan bakar penerbangan.

Industri penerbangan semakin tertarik untuk memasukkan bahan bakar penerbangan berkelanjutan, termasuk bahan bakar biojet, ke dalam operasi mereka untuk mengurangi dampak lingkungan mereka. Upaya penelitian dan pengembangan sedang berlangsung untuk meningkatkan proses produksi, ketersediaan bahan baku, dan kelangsungan hidup keseluruhan bahan bakar ini. Indonesia, sebuah negara agraris di daerah khatulistiwa, memiliki banyak potensi bioenergi. Potensi ini dapat digunakan sebagai bahan bakar cair dan padat atau untuk pembangkit listrik. Dengan menggunakan teknologi bioenergi, Indonesia memiliki kesempatan besar untuk membantu menyediakan energi berkelanjutan kepada masyarakatnya.

8.4.6 Energi Laut

Energi laut berasal dari gelombang laut. Indonesia adalah negara dengan wilayah laut terbesar. beberapa wilayah perairan di Indonesia seperti Kalimantan Barat, Selatan Malang, Jawa Timur, Bali, Sulawesi Utara, dan Nusa Tenggara Timur memiliki potensi energi laut yang cukup tinggi untuk digunakan untuk pembangkit listrik. Ada beberapa teknologi yang dapat dijadikan sebagai pemanfaatan energi laut, seperti heaving dan pitching bodies, Oscillating Water Column (OWC), dan tapered channel (Tapchan). Teknologi arus laut juga dapat digunakan, seperti turbin arus laut, turbin hidro Davis, dan turbin Kobold.

Berikut beberapa pemanfaatan energi laut yang berasal dari gerakan dan perubahan suhu pada lapisan laut (samudera) yang merupakan sumber energi di perairan laut, antara lain:

- a) energi pasang surut, perbedaan pasang surut air laut antara pasang dan surut menghasilkan energi potensial yang dapat diekstraksi. Pembangkitan listrik dapat dicapai dengan menggunakan turbin air saat air masuk atau keluar dari daerah pesisir.
- b) energi gelombang, memanfaatkan besar gelombang dan panjang gelombang. Gelombang laut menghasilkan energi kinetik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui perangkat yang disebut "gelombang tenaga laut" atau "gelombang energi laut". Perangkat ini merubah gerakan naik-turun gelombang menjadi gerakan mekanis yang dapat menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.
- c) energi arus laut, arus laut yang kuat seperti di aliran sungai pasang dapat digunakan untuk menggerakkan turbin air dan menghasilkan listrik.
- d) energi perbedaan temperatur lapisan laut, dimana memanfaatkan beda temperatur di permukaan laut dan temperatur di dasar laut. Energi panas yang disimpan dalam lapisan atas lautan dapat digunakan untuk menghasilkan uap yang mendorong turbin untuk pembangkitan listrik. Metode ini dikenal sebagai pembangkit listrik panas laut.
- e) Energi Osmosis, Perbedaan salinitas antara air laut dan air tawar dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi melalui proses osmosis.

Saat ini, penggunaan arus laut sebagai pembangkit tenaga listrik telah mencapai tahap implementasi dalam skala kecil oleh beberapa lembaga akademik dan institusi. Dengan potensi termal $2,5 \times 1.023$ Joule dan efisiensi konversi energi panas laut

3 %, lautan di wilayah Indonesia dapat menghasilkan daya sekitar 240.000 MW (Partahi, 2017).

8.4.7 Energi Panas Bumi

Energi geothermal adalah bentuk energi terbarukan yang berasal dari panas yang disimpan di bawah permukaan bumi. Panas ini berasal dari inti planet, di mana degradasi radioaktif dan panas sisa dari pembentukan menghasilkan aliran energi termal yang konstan. Energi geothermal dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk pembangkit listrik, pemanasan, dan pendinginan. Potensi panas bumi di Indonesia tersebar di banyak pulau, termasuk Sumatera, Maluku, Kalimantan, Jawa, Sulawesi, dan Papua. Sebagian besar energi panas bumi yang dihasilkan digunakan sebagai pembangkit listrik. Indonesia memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia dengan 29 GW tersebar di 312 lokasi (Umam, 2018).

Ada beberapa jenis pembangkit listrik geothermal yang menggunakan panas Bumi untuk menghasilkan listrik:

- a) Pembangkit listrik uap kering: Tanaman ini menggunakan uap yang diekstrak langsung dari reservoir geothermal untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik.
- b) *Flash Steam Power Plants*: Di pabrik ini, air panas tekanan tinggi diekstrak dari reservoir dan kemudian diperbolehkan untuk berkembang dengan cepat untuk menghasilkan uap yang mendorong turbin.
- c) *Binary Cycle Power Plants*: Pabrik ini mentransfer panas dari cairan geothermal ke cairan sekunder dengan titik mendidih yang lebih rendah, yang kemudian menguap dan mendorong turbin.

Menurut Hakim (2020), penggunaan energi panas bumi telah digunakan di Indonesia sejak tahun 1980. Pada Februari 1983, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit I dengan kapasitas 30 Megawatt mulai beroperasi. Menurut

Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), kontribusi PLTP di negara ini diharapkan mencapai 7,2 Gigawatt pada tahun 2025. Namun, meskipun Indonesia memiliki potensi panas bumi sebesar 28,5 Gigawatt, pengembangan panas bumi masih terbatas. Hingga September 2018, tercatat pemanfaatan panas bumi sekitar 1.948,5 Megawatt, dengan 12 PLTP beroperasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriyanti, Y., Sasana, H., Jalunggono, G., Ekonomi, F., & Tidar, U. (2018). Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Terbarukan Di Indonesia. *DINAMIC: Directory Journal of Economic Volume 2 Nomor 3*, 2(3), 865–884.
- Al Hakim, R. R. (2020). Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energy Terbarukan Untuk Ketahanan Energi Di Indonesia: Literatur Review. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 1–11.
- Arhamsyah, A. (2010). Pemanfaatan Biomassa Kayu Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 2(1), 42. <https://doi.org/10.24111/jrihh.v2i1.914>
- Arsita, S. A., Saputro, G. E., & Susanto. (2021). Perkembangan Kebijakan Energi Nasional dan Energi Baru Terbarukan Indonesia. *Jurnal Syntax Transformation*, 2(12).
- Caesaron, D., & Maimury, Y. (2014). Evaluasi dan Usulan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Keberlangsungan Energi Nasional. *Journal of Industrial Engineering & Management Systems*, 7(2), 132–139.
- Dewan Energi Nasional. (2019). *Outlook Energi Indonesia*.
- ESDM, Yudiarto, A., Sugiyono, A., Wahid, L. M. A., & Adiarso. (2016). Outlook Energy Indonesia 2018. In *Pusat Pengajian Industri Proses Energi* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1–94).
- Hanum, F., Nugrahani, E. H., & Susanti, S. (2015). Pemanfaatan Sumber Daya Alam Terbarukan Dalam Model Sewa Ekonomi. *Journal of Mathematics and Its Applications*, 14(2), 57–69. <https://doi.org/10.29244/jmap.14.2.57-69>
- Jaelani, A. (2017). Kebijakan energi baru terbarukan di Indonesia: Isyarat ilmiah Al-Qur'an dan implementasinya dalam ekonomi Islam. *Munich Personal RePEc Archive*, 83314, 1–19. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/83314/1/MPRA_paper_83314.pdf

- Kholid, I. (2015). Pemanfaatan Energi Alternatif Sebagai Energi Terbarukan Untuk Mendukung Substitusi BBM. *Jurnal IPTEK*, 19(2). [https://doi.org/10.1016/s1877-3435\(12\)00021-8](https://doi.org/10.1016/s1877-3435(12)00021-8)
- Liun, E., & Sunardi. (2014). Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan Dan Fosil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 16(March), 119–130.
- Lubis, A. (2007). Energi Terbarukan Dalam Pembangunan Berkelanjutan. *Teknologi Lingkungan*, 8(2), 155–162.
- Lumbangaol, P. H. (2007). Energi Terbarukan Untuk Pembangunan Berkelanjutan Di Indonesia. *Fakultas Teknik Universitas HKBP Nommensen*, 1(4), 1–14.
- Ngurah, G., Santhiarsa, N., Bagus, G., Kusuma, W., Kunci, K., Surya, S., & Listrik, E. (2005). *Kajian Energi Surya Untuk Pembangkit Tenaga Listrik*. 4(1), 29–33.
- Nunuk Febriananingsih. (2019). Tata Kelola Energi Terbarukan Di Sektor Ketenagalistrikan Dalam Kerangka Pembangunan Hukum Nasional. *Majalah Hukum Nasional*, 49(2), 29–56. <https://doi.org/10.33331/mhn.v49i2.31>
- Program Nasional Pemberdayaan Masyarakat (PNPM) Mandiri. (2011). Energi Yang Terbarukan. In *Buku Panduan Energi Terbarukan*.
- Ridwan, & Latief, A. (2019). Pengaruh Jumlah Sudu Pada Turbin Angin Sumbu Vertikal Terhadap Distribusi Kecepatan Dan Tekanan. *Jurnal Ilmiah Teknologi Dan Rekayasa*, 24(2), 141–151. <https://doi.org/10.35760/tr.2019.v24i2.2392>
- Rusdi, M., Hariyanto, H., & Cipto, C. (2021). Sosialisasi Pemanfaatan Energi Terbarukan Dan Pelatihan Teknologi Tepat Guna Berbasis Solarcell Untuk Pelajar SMPIT Ibnu Sina Merauke. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Indonesia*, 1(3), 79–84. <https://doi.org/10.52436/1.jpmp.20>
- Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). Indonesia Energy Outlook 2019. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Umam, M. F., Muhammad, F., Adityama, D., & Purba, D. (2018). Tantangan Pengembangan Energi Panas Bumi Dalam Perannya terhadap Ketahanan Energi di Indonesia. *Swara Patra : Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 8(3), 48–65.

BAB 9

Pengenalan Sistem Manajemen Lingkungan

(*ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEM*)

Oleh Bambang Suhartawan

9.1 Pendahuluan

Sistem manajemen lingkungan merupakan bagian yang sangat penting dalam sebuah organisasi Perusahaan dalam rangka menjalankan kegiatannya melalui pemanfaatan dan pemberdayaan organisasi, tanggung jawab, prosedur, sumber daya guna mencapai kinerja lingkungan yang diinginkan.

Penerapan sistem manajemen lingkungan pada dasarnya bertujuan mendukung perlindungan dan pencegahan kerusakan lingkungan. Selain itu Tujuan penerapan sistem manajemen lingkungan sesuai ISO 14001 adalah menciptakan flora dan fauna tetap lestari, alami dan dalam kondisi yang sangat baik. Selain itu juga meningkatkan kinerja lingkungan, terarah dan tertata dengan baik. Penerapan sistem manajemen lingkungan bertujuan agar setiap kegiatan dan/atau usaha mampu mengelola lingkungan yang terstruktur dan sistematis, mengendalikan aspek lingkungan penting, menaati peraturan pengelolaan dan pengendalian lingkungan hidup guna meningkatkan kinerja lingkungan serta pemenuhan persyaratan lingkungan bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

9.2 Manfaat Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan (ISO 14001)

Pentingnya pengelolaan lingkungan pada perusahaan merupakan bagian integral guna memajukan perusahaan dan terciptanya lingkungan yang baik berpengaruh secara internal dan berdampak juga pada tingkat eksternal. Manfaat yang dapat diperoleh jika perusahaan menerapkan ISO 14001 Sistem Manajemen Lingkungan adalah :

9.2.1 Perlindungan Lingkungan

Terwujudnya perlindungan terbaik terhadap lingkungan merupakan manfaat utama dari penerapan SML. Lingkungan yang terjaga dan terawat dengan baik menjadi idaman semua orang karena akan memberikan rasa nyaman dan bebas polusi. Hal ini membuktikan tatanan ekologi dapat bersinergi dengan baik.

9.2.2 Keuntungan Ekonomi

Hasil kerja perusahaan sangat bergantung pada kondisi lingkungan di sekitarnya, jika lingkungan asri, nyaman dan aman maka akan memberikan keleluasaan perusahaan dalam melakukan produksi sehingga jumlah produksinya meningkat, demikian juga keuntungan secara ekonominya.

9.2.3 Peningkatan Image Perusahaan

Perusahaan yang mampu mempertahankan kelestarian lingkungannya memberikan image positif bagi masyarakat, bahkan dukungan positif dari masyarakat sekitar semakin baik. Jika image perusahaan terhadap lingkungan baik, maka perusahaan akan bebas dari ancaman dan keamanan sehingga investor lebih berminat untuk berinvestasi pada perusahaan.

9.2.4 Terjalinnnya Hubungan Baik

Pengelolaan lingkungan hidup yang baik tidak hanya bermanfaat bagi perusahaan, juga dirasakan oleh masyarakat sekitar yang kemungkinan besar terdampak. Melalui pengelolaan lingkungan yang baik maka hubungan antara perusahaan dan masyarakat sekitar serta pemerintah yang memiliki kewenangan berjalan dengan baik.

9.2.5 Penurunan Kerusakan Lingkungan

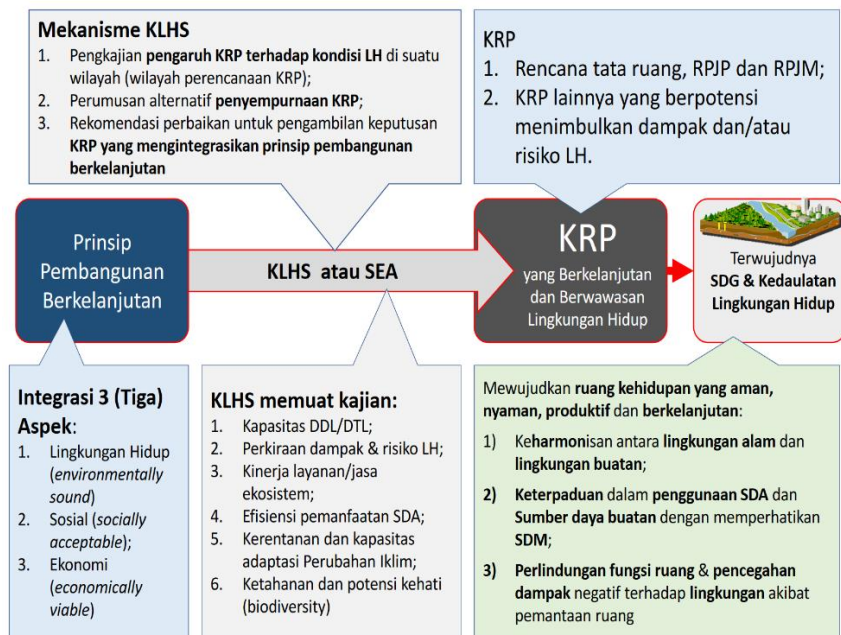
Jika perusahaan memiliki kepedulian dan komitmen dalam penataan lingkungan sesuai yang telah digariskan pada ISO 14001, maka sudah otomatis dapat dikatakan bahwa perusahaan telah membantu menurunkan kerusakan lingkungan.

9.3 Instrumen Sistem Manajemen Lingkungan (ISO 14001)

Instrumen yang menjadi dasar penerapan sistem manajemen lingkungan bagi organisasi perusahaan dalam rangka pencegahan pencemaran atau kerusakan lingkungan sesuai dengan Undang-undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pasal 14 adalah :

9.3.1 Kajian Lingkungan Hidup Strategis (KLHS);

Kajian Lingkungan Hidup Strategis (KLHS) wajib dibuat oleh pemerintah atau pemerintah daerah sesuai wilayah administrasinya sebagai dasar pelaksanaan pembangunan berkelanjutan yang terintegrasi dalam rencana dan kebijakan pembangunan wilayah. Urutan pembuatan KLHS didahului dengan menyusun kajian kebijakan, rencana pelaksanaan, penyempurnaan kebijakan. Selanjutnya menyusun strategi kebijakan dalam rangka pengambilan keputusan dengan mengintegrasikan prinsip pembangunan berkelanjutan.



Gambar 9.1 Konsep Dasar Penyusunan KLHS

Sumber : Iwan Kustiawan, 2021

Kajian tentang kapasitas daya dukung dan daya tampung lingkungan mutlak diperlukan dalam penyusunan KLHS. Perkiraan mengenai dampak dan risiko lingkungan, kinerja layanan, jasa ekosistem, efisiensi, kerentanan terhadap perubahan iklim juga ketahanan keanekaragaman hayati juga merupakan bahan kajian yang diperlukan.

9.3.2 Tata Ruang

Tersusunnya dokumen kajian lingkungan hidup strategis (KLHS) menjadi dasar dalam penyusunan tata ruang wilayah. Selain itu penyusunan tata ruang wilayah juga harus berdasarkan Permen Agraria dan Tata Ruang/Kepala BPN RI No. 14 Tahun 2021 tentang Pedoman Penyusunan Basis Data dan Penyajian Peta Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi, Kabupaten, dan Kota serta Peta Rencana Detail Tata Ruang Kabupaten/Kota.

9.3.3 Baku Mutu Lingkungan

Baku mutu lingkungan adalah instrumen yang berisi batas atau kadar bahan pencemar atau polutan yang diizinkan dan tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan termasuk hewan maupun tumbuhan yang ada dalamnya. Baku mutu lingkungan berisi tentang spesifikasi jumlah bahan pencemar yang berada pada media lingkungan ambien. Sesuai dengan fungsinya penetapan baku mutu didasarkan atas dua hal, yaitu "*effluent standart*" dan "*stream standart*".



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

SALINAN

PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA

NOMOR 22 TAHUN 2021

TENTANG

PENYELENGGARAAN PERLINDUNGAN DAN PENGELOLAAN
LINGKUNGAN HIDUP

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA

PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA,

Gambar 9.2 Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021

Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan

9.3.4 Kriteria Baku Kerusakan Lingkungan Hidup

Sebuah lingkungan dikatakan tercemar jika kondisi lingkungan sudah tidak sesuai dengan ketentuan atau kriteria baku kerusakan lingkungan hidup baik. Ada dua kriteria baku kerusakan lingkungan, yakni kriteria baku kerusakan secara ekosistem dan baku kerusakan lingkungan akibat perubahan iklim. Yang tergolong kerusakan ekosistem adalah kerusakan tanah sebagai media produksi biomasa, kerusakan terumbu karang, kerusakan akibat kebakaran baik hutan maupun lahan, kerusakan mangrove dan kerusakan lainnya. Sedangkan

kerusakan akibat perubahan iklim adalah kenaikan suhu bumi, permukaan air laut dan terjadinya banjir dan kekeringan.

9.3.5 Amdal

Segala aktivitas atau kegiatan perusahaan yang berdampak penting dan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan harus memiliki dokumen AMDAL. Dampak penting tersebut adalah besarnya jumlah penduduk terdampak, luas dan lamanya dampak, komponen dan sifat dampak.

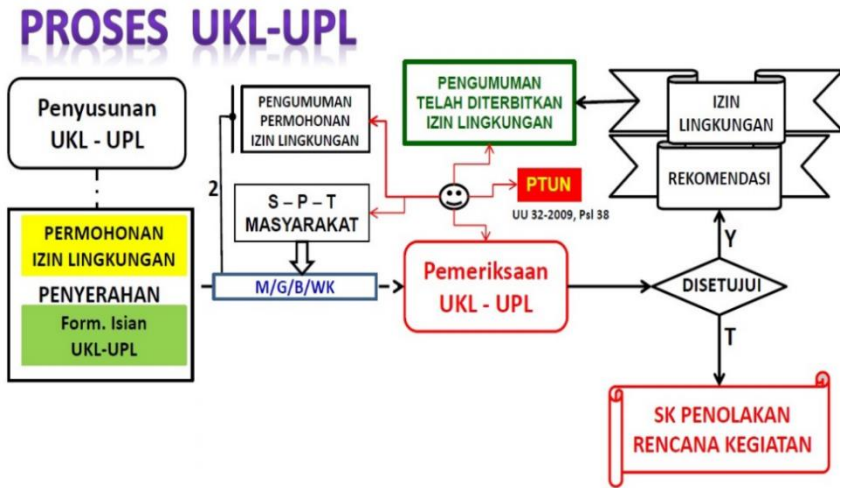


Gambar 9.3 Langkah-langkah Penyusunan AMDAL

Sumber : Eko Sugiharto, PSLH UGM

9.3.6 UKL-UPL

Segala aktivitas atau kegiatan perusahaan yang tidak diwajibkan memiliki dokumen AMDAL harus memiliki dokumen UKL-UPL yang ditetapkan oleh Gubernur, Bupati/Walikota sesuai wilayah administrasinya.



Gambar 9.4 Proses Penyusunan UKL-UPL

Sumber : George Budiono, 2018

9.3.7 Perizinan

Izin lingkungan diperuntukkan bagi perusahaan yang tidak diwajibkan memiliki dokumen AMDAL dan UKL-UPL. Ijin lingkungan ditetapkan oleh Menteri, Gubernur atau Bupati/Walikota guna memperoleh izin kegiatan perusahaan.

9.3.8 Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup

Dalam rangka mendukung pembangunan rendah emisi gas rumah kaca (GRK) dan pelestarian fungsi lingkungan hidup perlu disusun Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup (IELH). Pemerintah wajib menyusun dan menerapkan instrumen ekonomi lingkungan hidup (IELH).

9.3.9 Peraturan Perundang-Undangan Berbasis Lingkungan Hidup

Dalam rangka perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup sesuai UU RI No. 32 Tahun 2009, maka setiap produk hukum atau peraturan terkait pembangunan yang memanfaatkan lingkungan wajib memperhatikan dan mengintegrasikan fungsi lingkungan hidup.

9.3.10 Anggaran Berbasis Lingkungan Hidup

Pengalokasian anggaran oleh pemerintah atau pemerintah daerah merupakan hal yang sangat penting demi terlaksananya upaya perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup.

9.3.11 Analisis Risiko Lingkungan Hidup

Analisis risiko lingkungan hidup adalah uraian tentang dampak, ancaman terhadap ekosistem, kehidupan, kesehatan dan keselamatan manusia. Analisis risiko ini perlu dibuat untuk diterapkan agar dampak negatif akibat penerapan kebijakan pembangunan dapat diminimasi.

9.3.12 Audit Lingkungan Hidup

Audit lingkungan adalah alat manajemen untuk mengevaluasi secara menyeluruh dan sistematis yang dilakukan secara periodik dan obyektif tentang kinerja lingkungan berdasarkan peraturan perundang-undangan tentang pengelolaan lingkungan hidup. Tahapan audit lingkungan sesuai dengan UU RI Nomor 32 Tahun 2009 adalah :



Gambar 9.5 Tahapan Audit Lingkungan Hidup

Adapun fungsi audit lingkungan antara lain :

1. Sebagai upaya untuk meningkatkan ketaatan bagi organisasi terhadap peraturan pengelolaan dan pengendalian lingkungan serta baku mutu lingkungan.
2. Tersedianya dokumen Standar Operasional Prosedur (SOP) tentang pengelolaan dan pengendalian lingkungan hidup.
3. Sebagai jaminan upaya untuk menghindari kerusakan lingkungan hidup.
4. Tersusunnya dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) yang baik.
5. Perbaikan penggunaan sumber daya (penghematan bahan, minimasi limbah dan identifikasi proses daur hidup).

9.3.13 Instrumen Lain Sesuai Kebutuhan dan/atau Perkembangan Ilmu Pengetahuan

Yang dimaksud instrumen lain dalam sistem manajemen lingkungan adalah instrumen-instrumen yang belum tercantum dalam UU RI nomor 32 Tahun 2009, misalnya :

1. Peraturan Pemerintah RI Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
2. Peraturan Pemerintah RI Nomor 27 Tahun 2012 tentang Izin Lingkungan (AMDAL).
3. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 16 Tahun 2012 tentang Pedoman Penyusunan Dokumen Lingkungan Hidup.
4. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI Nomor 08 Tahun 2013 tentang Tata Laksana Penilaian dan Pemeriksaan Dokumen Lingkungan Hidup serta Penerbitan Izin Lingkungan.
5. Peraturan Pemerintah RI Nomor 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup.
6. Peraturan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup yang diterbitkan oleh masyarakat lokal atau Pemerintahan Adat.

9.4 Komponen Sistem Manajemen Lingkungan

Sistem Manajemen Lingkungan (SML) adalah suatu kegiatan terstruktur dan berkesinambungan yang dilakukan oleh perusahaan guna mengidentifikasi, mengontrol dan mengelola masalah lingkungan sehingga perusahaan dapat menjalankan kegiatan usahanya tanpa menimbulkan pencemaran lingkungan.

Terbitnya Standar Nasional Indonesia (SNI) ISO 14001:2015 menjadi pedoman bagi perusahaan dalam rangka memberikan kontribusi positif terhadap kelestarian lingkungan dan pembangunan berkelanjutan. Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan (SML) dapat meningkatkan kinerja lingkungan meliputi pengurangan limbah, pencegahan polusi dan efisiensi organisasi. Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan dilakukan secara terus-menerus melalui tahapan proses *plan, do, check dan act*. Atas dasar Implementasi ISO 14001 penerapan SML memiliki 3 (tiga) komponen utama, yaitu : komitmen dan kebijakan, tujuan dan sasaran; dan program

manajemen lingkungan meliputi proses, praktik, prosedur dan garis tanggungjawab.



Gambar 9.6 Siklus PDCA dalam Sistem Manajemen Lingkungan
Sumber

:<https://id.images.search.yahoo.com/search/images?p=siklus+pdca>

Keterangan :

Plan: suatu perencanaan sistematis untuk mengevaluasi dampak penting lingkungan dan kesehatan manusia. Pendekatan sistematis guna mengevaluasi konsekuensi dampak penting dari produk dan proses dan dampaknya terhadap kesehatan manusia.

Do: penerapan dari apa yang telah direncanakan meliputi proses, produksi dan pengumpulan data untuk kebutuhan check dan act.

Check: merupakan kegiatan pemantauan, pengukuran dan evaluasi kinerja lingkungan dalam rangkai audit internal.

Act: kegiatan yang dilakukan untuk mengatasi ketidaksesuaian.

9.5 Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan

Terdapat lima fase dalam penerapan sistem manajemen lingkungan, yaitu :

9.5.1 Fase 1 (Kebijakan Lingkungan)

Kebijakan lingkungan adalah sebuah komitmen secara tertulis yang dibuat oleh top manajemen (puncak manajemen) sebagai pedoman yang akan dijalankan oleh organisasi. Penetapan kebijakan yang dibuat berdasarkan input-input substansi yang berasal dari karyawan dalam organisasi perusahaan. Kebijakan perusahaan berisi tentang tindakan pencegahan dan bagaimana kebijakan memberikan dampak positif bagi karyawan sehingga semua karyawan memahami tanggungjawabnya terkait kebijakan tersebut. Kebijakan tersebut dibuat pada prinsipnya untuk menciptakan komitmen penuh semua karyawan dan mendorong secara penuh kepada karyawan untuk meningkatkan kesadaran terhadap penerapan SML sehingga tidak terjadi kesalahpahaman internal dan menyebabkan timbulnya ketidakpedulian karyawan terhadap perusahaan. Terdapat 4 dokumen terkait penerapan kebijakan pengelolaan lingkungan hidup dalam rangka implementasi sistem manajemen lingkungan sesuai ISO 14001 ; 2015 yaitu : 1) pernyataan peningkatan kinerja lingkungan; 2) kerangka kerja dan arahan; 3) motivasi; dan 4) perbaikan dan pencegahan pencemaran dan penataan aturan.

9.5.2 Fase 2 (Perencanaan)

Dalam fase ini ditetapkan target dan sasaran yang akan dicapai atau masalah yang akan diselesaikan, metode pencapaian sasaran, pembentukan tim kerja dan peningkatan kemampuan tim melalui pelatihan, penjadwalan, pembiayaan dan peralatan yang digunakan yang diuraikan dalam berbagai unsur :

1. Unsur aspek lingkungan :

Unsur ini meliputi aspek Lingkungan (*Environmental aspects*), dampak lingkungan, aspek penting lingkungan dan pernyataan organisasi Perusahaan guna penentuan tujuan dan sasaran dan aspek lingkungan yang up-to-date.

2. Unsur Peraturan Perundang-undangan atau Persyaratan Lainnya

Beberapa hal yang harus diperhatikan oleh organisasi Perusahaan dalam menerapkan SML antara lain : adanya prosedur berdasar peraturan perundang-undangan di tingkat pusat dan daerah juga persyaratan lain berupa standar operasional prosedur (SOP), kesepakatan dan perjanjian dengan stake holder.

3. Unsur Tujuan dan Sasaran

Penerapan SML sangat bergantung kepada tujuan dan sasaran lingkungan yang telah ditetapkan.

4. Unsur Program Manajemen Lingkungan

Tujuan dan sasaran yang telah ditetapkan terdokumentasi pada tingkatan fungsi berbagai aspek dan pandangan pihak terkait dan konsisten dengan kebijakan lingkungan sesuai dengan komitmennya.

9.5.3 Fase 3 (Implementasi dan Operasi)

1. Unsur Struktur dan Tanggung jawab

Struktur organisasi Perusahaan harus disusun dengan baik agar pembagian peran/fungsi, tanggung jawab dan kewenangan di setiap tingkatan manajemen dapat terlaksana dengan baik dan terkontrol, tersedianya sumber daya manusia yang berkualitas, teknologi dan finansial sangat dibutuhkan penerapan dan pengendalian system manajemen lingkungan berjalan dengan baik.

2. Unsur kepedulian, training dan kompetensi

Peningkatan kompetensi melalui pelatihan sesuai bidang tugas personal organisasi sangat dibutuhkan guna

meningkatkan keterampilan dan kepedulian dalam rangka mewujudkan kinerja lingkungan yang lebih optimal.

3. Unsur komunikasi

Agar implementasi SML berjalan dengan baik sangat diperlukan komunikasi internal antar lini dan fungsi secara tertulis ataupun elektronik yang jelas dan terdokumentasi dengan baik.

4. Unsur dokumentasi SML

Unsur-unsur utama dalam SML dan interaksinya perlu ditetapkan dan dipelihara dengan baik dalam bentuk dokumen tertulis atau elektronik yang dilengkapi dengan penjelasannya.

5. Unsur pengendalian dokumen

Setiap dokumen perlu ditetapkan dan dipelihara prosedur pengendaliannya guna memenuhi persyaratan standar internasional.

6. Unsur pengendalian operasi

Instruksi kerja dan prosedur terkait aspek penting lingkungan berdasarkan hasil identifikasi harus terlaksana dengan baik agar komunikasi prosedur pengendalian operasi dengan pihak eksternal juga terlaksana dengan baik.

7. Unsur perencanaan dan tanggap darurat

Identifikasi, menanggapi dan mencegah potensi kecelakaan dan keadaan darurat serta perlu disusun dengan baik agar pihak eksternal memahami dan dilakukan perbaikan sesuai kebutuhan.

9.5.4. Fase 4 (Pemeriksaan dan Tindakan Perbaikan)

1. Unsur pemantauan dan pengukuran

Setiap kegiatan yang berpotensi menimbulkan dampak penting terhadap lingkungan perlu dipantau dan diukur dengan prosedur yang telah ditetapkan, dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur serta melakukan evaluasi secara periodik untuk memenuhi persyaratan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

2. Unsur evaluasi pemenuhan

Selain menetapkan prosedur evaluasi pemenuhan peraturan perundang-undangan juga diharuskan menyimpan catatan pemenuhan tersebut dengan baik.

3. Unsur ketidak terpenuhinya Tindakan perbaikan dan pencegahan

Perbaikan dan pencegahan serta pengkajian terhadap masalah yang berakibat tidak terpenuhinya peraturan perundang-undangan perlu dilakukan sebagai wujud tanggung jawab organisasi perusahaan.

4. Unsur pengendalian dan rekaman

Guna melakukan identifikasi dan memelihara rekaman lingkungan hidup diperlukan prosedur yang baik berupa catatan hasil audit, kajian-kajian dan pelatihan yang mudah didapat serta sesuai dengan standar internasional.

5. Unsur audit internal

Audit internal perlu dibuat prosedurnya oleh setiap Perusahaan mencakup ruang lingkup, metode, pelaksanaan dan pelaporan dan memastikan sesuai dengan penerapan SML.

9.5.5 Fase 5 (Kajian Manajemen)

Setiap organisasi harus melakukan kajian terhadap SML untuk memberi kepastian terpenuhinya, ketepatan dan

keefektifan dari sistem. Kajian harus terbuka terhadap kemungkinan perubahan pada kebijakan dan unsur lain dalam penerapan SML.

9.6 Simpulan

Dari uraian tersebut di atas, terkait implementasi Sistem Manajemen Lingkungan (SML) sesuai dengan Undang-Undang RI Nomor dan 32 Tahun 2009 dan ISO 14001 : 205 pada setiap organisasi dapat ditarik kesimpuna sebagai berikut :

- Sistem Manajemen Lingkungan adalah keseluruhan sistem manajemen yang meliputi organisasi, prosedur, tanggung jawab pelaksanaan, dan sumber daya untuk mengembangkan, mengimplementasi, mencapai, mengevaluasi dan memelihara kebijakan lingkungan.
- Iso 14001 merupakan standar internasional yang dapat diterapkan oleh organisasi dimaksudkan untuk menetapkan, menerapkan, memelihara, dan meningkatkan sistem manajemen lingkungan.
- Tujuan diterapkannya ISO 14001 (sistem Manajemen Lingkungan) adalah untuk meningkatkan daya guna lingkungan yang konstan melalui implementasi siklus PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) dengan efisiensi perbaikan secara terus menerus.

DAFTAR PUSTAKA

- Assa, FA. (2021). *Manajemen Lingkungan, Buku Ringkasan Eksekutif untuk Mahasiswa Pasca Sarjana (S2 & S3)*. Halaman Moeka Publishing. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *Standar Nasional Indonesia, Persyaratan dengan Penduan Penggunaan (SNI ISO 14001:2015)*. Jakarta.
- Budiono, G. (2018). *Proses Penyusunan UKL-UPL*. Komodo. Labuhan Bajo.
- Cahyono, Budi. (2011). *Manajemen Lingkungan*. EF Press Digimedia. Semarang.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI Nomor 42 Tahun 1994 tentang *Pedoman Umum Pelaksanaan Audit Lingkungan*. Jakarta.
- Kurnianto, Atik. (2019). *Penerapan Sistem Manajemen Lingkungan (ISO 14001 : 2015 PT "X"*. Jakarta.
- Kustiawan, I. (2021). *Tata Cara Penyusunan Kajian Lingkungan Hidup Strategis Rencana Tata Ruang Wilayah*. Bandung
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 16 Tahun 2012 tentang *Pedoman Penyusunan Dokumen Lingkungan Hidup*. Jakarta.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI Nomor 08 Tahun 2013 tentang *Tata Laksana Penilaian dan Pemeriksaan Dokumen Lingkungan Hidup serta Penerbitan Izin Lingkungan*. Jakarta.
- Peraturan Pemerintah RI Nomor 27 Tahun 2012 tentang Izin Lingkungan (AMDAL). Jakarta.
- Peraturan Pemerintah RI Nomor 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup. Jakarta.

- Peraturan Pemerintah RI Nomor 22 Tahun 2021 tentang *Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta.
- Sugiharto, E. (TT). Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (Pengertian, Manfaat dan Proses). PSLH UGM. Jogjakarta.
- Undang-Undang RI Nomor 32 Tahun 2009. *Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta.
- Utomo, WS., Sulistyowati, L., Yulianto, G. (TT). *Teori dan Konsep Sistem Manajemen Lingkungan*.

BAB 10

NANOTEKNOLOGI

Oleh Andar Kusnanto

10.1 Pendahuluan

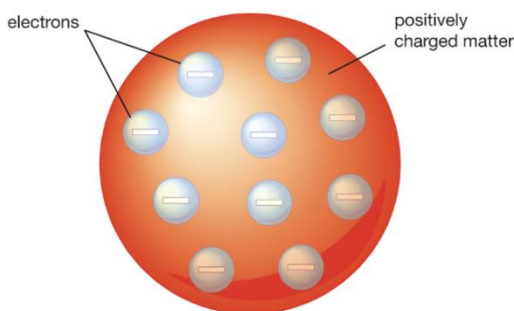
Nanoteknologi, yang sering dikenal sebagai nanosains, adalah sebuah ilmu pengetahuan dan teknologi. Nanoteknologi adalah cabang teknologi yang memanfaatkan sifat-sifat molekul atau struktur atom yang berukuran sepersemiliar meter. Nanoteknologi adalah cabang teknologi yang memanfaatkan sifat-sifat molekul atau struktur atom yang berukuran nanometer. Jika sebuah molekul atau struktur dapat diproduksi dalam skala nano, maka akan menghasilkan kualitas baru yang menakjubkan. Karena fitur-fitur baru ini digunakan untuk tujuan teknologi, teknologi ini dikenal sebagai nanoteknologi. (Setyawan, 2017)

Sebelum membahas lebih jauh tentang nanoteknologi perlu dibahas tentang apa yang dimaksud dengan atom, molekul dan elektron dan bidang ilmu yang berkaitan dengan nanoteknologi.

a. Teori Atom klasik

Jika sebuah benda berulang kali dipecah menjadi komponen-komponen yang lebih kecil, pada akhirnya akan sampai pada bagian terkecil yang tidak dapat dipisahkan lagi yang dikenal sebagai atom. Jika sebuah benda dipecah menjadi komponen-komponen yang lebih kecil, pada akhirnya akan mencapai bagian terkecil yang tidak dapat dipisahkan lagi, yang dikenal sebagai atom. Atom, menurut Democritus (460-370 SM), adalah bagian terkecil dari suatu

benda. Para ahli menemukan keberadaan elektron dalam atom, yang terinspirasi oleh penelitian J.J. Thompson. Penemuan proton, neutron, dan partikel inti oleh para ahli fisika kemudian menyusul. Proton dan neutron ternyata masih terdiri dari partikel-partikel kecil yang dikenal sebagai quark. Terlepas dari kenyataan bahwa atom bukan lagi bagian terkecil dari suatu entitas, istilah "atom" masih digunakan. (Zulkarnain, Kadaritna and Tania, 2015)



Gambar 10.1 Model Atom Thompson

b. Atom membentuk molekul dan bahan

Apa yang menyebabkan atom-atom membuat ikatan molekul? Atom-atom tampak stabil dalam kondisi ini dan tidak bereaksi (mengganggu) dengan atom lain. Garam dapur (NaCl), misalnya, aman dikonsumsi karena molekul NaCl stabil. Namun, memisahkan Na dan Cl untuk menghasilkan Na^+ dan Cl^- berbahaya karena ion-ion tersebut akan berikatan dengan atom/molekul lain di dalam tubuh/darah kita. Cl^- misalnya, sangat berbahaya (racun) dan menyebabkan korosi pada logam. Oleh karena itu, kita harus menghindari mencuci mobil dengan air laut (air asin). Para ahli kimia menyelidiki cara-cara untuk membuat molekul baru dengan memutus ikatan antar molekul dan antara satu molekul dengan molekul lainnya dan membentuk ikatan baru untuk membuat molekul baru. Ini disebut sebagai reaksi kimia. Karena elektron bertanggung jawab atas pembentukan ikatan dan reaksi kimia hanyalah

pemutusan dan pengaitan ikatan, elektron menentukan karakteristik kimiawi suatu molekul. Karakteristik kimiawi suatu atom atau molekul ditentukan oleh elektron. Keberadaan elektron (energi energi ikatan) digunakan untuk mengidentifikasi jenis ikatan dalam molekul serta jenis komponen kimia. Senyawa yang bersifat kimiawi. Mengapa? Karena keberadaan (energi ikat) elektron dari suatu atom bergantung pada atom yang diikatnya. (Sabarni, 2017)

Nanoteknologi adalah proses penggabungan atom atau ion untuk membangun molekul dengan struktur tingkat nanometer. Membentuk struktur dalam orde nanometer yang dapat digunakan untuk membuat produk biasa. Dalam kehidupan sehari-hari. Tentu saja, nanoteknologi juga mengatur (memanipulasi) proses seperti reaksi kimia untuk menghasilkan benda cair atau padat seperti keramik, polimer, dan logam. Keramik, polimer, dan logam adalah contoh zat cair atau padat yang dapat diatur (dimanipulasi) untuk menghasilkan sifat-sifat kimiawi atau sedemikian rupa untuk mengembangkan kualitas kimia atau fisika yang baru. Lebih jauh lagi, nanoteknologi mencampurkan semua zat padat seperti keramik, logam, dan polimer untuk menciptakan material baru yang tidak ditemukan di alam. Bahan inovatif ini menggabungkan dua atau tiga komponen lain untuk membentuk komposit. Komposit adalah suatu jenis material. Komposit nano dihasilkan ketika struktur komponen campuran berada dalam orde nanometer. (Jumini, 2017)



Gambar 10.2 Molekul DNA

c. Prinsip Teknik Manipulasi

Konsep mengubah atom-atom individu pada skala nano sebenarnya telah dikenal selama beberapa dekade. Richard Feynman, penerima Hadiah Nobel Fisika pada tahun 1965 dan secara luas dianggap sebagai Bapak Nanoteknologi, menyatakan pada tahun 1959 bahwa tidak ada satu pun hukum fisika yang mengatakan bahwa atom tidak dapat diubah sesuka hati. Kita hanya belum menemukan cara untuk melakukannya karena kita terlalu besar dan atom-atomnya terlalu kecil untuk dimanipulasi. Kita hanya belum menemukan cara untuk melakukannya karena kita terlalu besar dan atom-atomnya terlalu kecil untuk diotak-atik susunannya. Konsep manipulasi atom didasarkan pada pemahaman mendasar tentang molekul yang memiliki selektivitas yang berbeda. Atom bermuatan positif akan menarik atom bermuatan negatif, khususnya atom dengan elektronegativitas tertinggi jika terdapat beberapa atom bermuatan negatif. Dengan menggabungkan atom atau molekul dengan sifat yang diinginkan, mereka akan secara otomatis terlibat satu sama lain melalui proses yang disebut perakitan sendiri. Hal ini menghasilkan produk yang bebas dari kotoran dan polutan karena terdiri dari atom-atom individual. (WIDJANARKO, 2022)

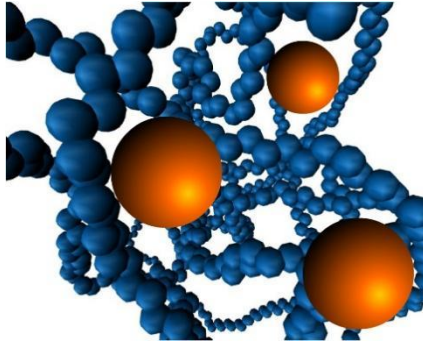
10.2 Nanoteknologi dan Perkembangannya

Nanoteknologi melibatkan penciptaan sistem fungsional pada tingkat molekuler, yang mencakup penelitian saat ini dan konsep-konsep lanjutan. Pada awalnya, nanoteknologi mengacu pada kemampuan untuk membangun apa pun dari bawah ke atas menggunakan bahan nano. Nanometer adalah sepersemiliar meter. Atom dalam molekul berada dalam kisaran 0,12-015 nm, sedangkan heliks ganda DNA adalah 2 nm. Bakteri dari genus *Mycoplasma* memiliki panjang sekitar 2 nm. Nanoteknologi didefinisikan sebagai skala 0,1-100 nm. Ukuran atom menentukan batas terendah.

Nanoteknologi merupakan salah satu teknologi yang sedang berkembang di berbagai negara di dunia. Perkembangan teknologinano atau nanoteknologi ini terletak pada ukurannya yang semakin mengecil hingga berukuran 10^{-9} mikrometer atau 10^{-3} mikrometer, lebih kecil dari ukuran bakteri yang hanya 1-100 mikrometer. Seperti yang sudah disinggung sebelumnya, nanoteknologi sedang berkembang. Beberapa perkembangannya adalah sebagai berikut,

10.2.1 Nano Komposit

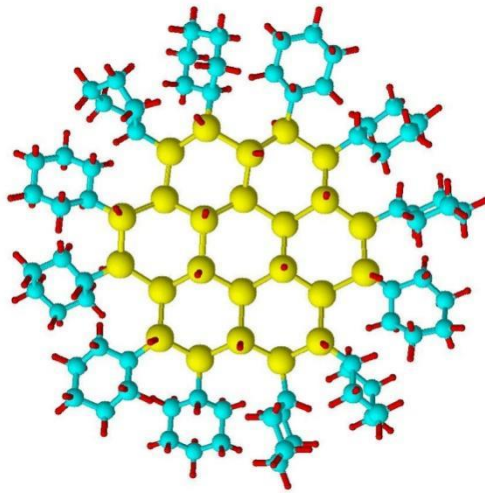
Atom-atom berikatan untuk menghasilkan nano komposit, sehingga menghasilkan bahan yang lebih kuat ketika diperbesar. Pabrik mobil seperti General Motor dan Toyota menggunakan nanokomposit untuk membuat plastik yang tahan gores dan ringan, sehingga mengurangi berat kendaraan dan biaya bahan bakar. Industri transportasi akan dapat menarik keuntungan dari penggunaan nanokomposit ini. *Nanoclay* dapat meningkatkan ketahanan akan permeabilitas sehingga bagus untuk penggunaan pengemas makanan dan minuman. Selain itu *nanoclay* juga dapat dipergunakan untuk mengurangi kemudahan plastik untuk terbakar. *Nanoclay* dilapisi dengan butyl rubber membuat bola tennis lebih memantul dan tahan lama. (Pudjiastuti and Listyarini, 2012)



Gambar 10.3 Nano Komposit

10.2.2 Nano Kristal

Logam nanokristal mempunyai kekuatan mekanik lebih tinggi, lebih tahan gores, sehingga dapat digunakan sebagai 'bearing' atau alat lain seperti komponen komputer, sensor dan lainnya. Kekerasan logam meningkat dua hingga tiga kali lipat. Nano kristal juga dapat mengabsorb dan memancarkan cahaya dengan berbeda warna (*Quantum DotTM*). Nanosilver telah dipasarkan, dapat dimasukkan kedalam polimer, tekstil, dapat membunuh bakteri dalam waktu 30 menit. Nano kristal dapat mengabsorb cahaya matahari lebih bagus sehingga dapat dipergunakan untuk alat potovoltaik.(Chang *et al.*, 2011)



Gambar 10.4 Nanokristal

10.2.3 Nano Partikel

Hal ini digunakan untuk menghindari kekotoran pada pakaian dengan cara menempelkan bulu pada permukaan dengan ukuran mikro sehingga menyerupai permukaan daun talas. Polimer berukuran nano dengan diameter mulai dari 10 nm hingga 100 nm digunakan sebagai penghalang sinar UV pada cat dinding luar, perekat, pelapis kertas, pelapis kain, dan kosmetik. Penahan sinar matahari adalah aplikasi lain untuk nanopartikel. Nanopartikel ini mudah menyebar dan menyerap sinar UV karena ukurannya yang kecil. Penghalang cahaya ini sangat banyak digunakan di Australia sehingga menguasai 60% pasar. Nanopartikel aluminium yang digunakan dalam campuran propelan (bahan bakar) dapat menggandakan laju pembakaran. (Modena *et al.*, 2019)

10.2.4 Bahan Nano Struktur

Paduan logam dengan kekerasan seperti berlian dikembangkan oleh Nanodyne melalui sintering campuran serbuk 15 nm Tungsten-karbida-kobalt. Paduan ini digunakan dalam produksi alat pemotong, bor, suku cadang mesin jet, dan bahan antipeluru. Sementara itu, Kodak memperkenalkan panel warna OLED (*organic light emitting diode*), yang memungkinkan terciptanya layar yang lebih tipis, lebih fleksibel, dan hemat energi untuk berbagai perangkat seperti komputer, ponsel, dan televisi. (Anggraita, 2019)

10.2.5 Nanotubes

Sama seperti serat kecil dengan diameter beberapa nanometer, konduktor dapat berbentuk padat atau longgar tetapi sangat kuat. Layar tampilan monokrom dapat dibuat dengan menggunakan tabung nano karbon yang memancarkan elektron. Menurut BBC News, tabung nano yang berukuran setengah dari lebar molekul DNA sedang diproduksi untuk mentransmisikan cahaya inframerah dekat dari laser ke sel kanker. Paparan cahaya ini selama 2 menit dapat menghilangkan jaringan ganas. (Ajayan and Tour, 2007)

10.2.6 Nano katalis

Tahukah Anda bahwa katalis skala nano berbasis gel dapat digunakan untuk mencairkan batu bara? Ini kemudian dapat diubah menjadi minyak diesel atau bensin, menjadikannya proses yang lebih disukai karena kemampuannya untuk mengurangi kandungan sulfur batubara. Sangat menarik untuk dicatat bahwa luas permukaan benda berskala nano sangatlah luas. (Somwanshi, Somvanshi and Kharat, 2020)

10.2.7 Nano Filter

Serat alumina berukuran nano mampu menyaring partikel ultra-kecil dan 99,9999% virus dengan laju aliran yang ratusan kali lebih cepat daripada membran ultrafiltrasi. (Priske *et al.*, 2016)

10.3 Hubungan Alam dengan Nanoteknologi

Alam adalah teknologi tertinggi. Para ahli biologi mempelajari proses alam, tetapi kesempurnaan tetap sulit dipahami. Namun dengan adanya teknologi Nano ini, misteri alam dapat dengan mudah ditemukan oleh para ahli biologi.

10.3.1 Proses Manipulasi Nitrogen oleh Bakteri Pada Tanaman

Bakteri adalah makhluk kecil, berukuran hanya 1000 nm, yang memiliki keunggulan dalam menyimpan nutrisi. Hal ini sangat jelas terlihat di dunia tanaman, di mana tanaman membutuhkan nitrogen untuk tumbuh secara maksimal. Nitrogen adalah elemen penting bagi tanaman untuk menjadi besar. Meskipun gas nitrogen tersedia secara luas di sekitar kita, sekitar empat kali lebih banyak daripada oksigen, namun sulit bagi tanaman untuk menyerapnya karena atom nitrogen di udara telah memiliki pasangan sehingga sulit diikat oleh tanaman yang sedang tumbuh.

Individu yang ingin membudidayakan tanaman sering kali menggunakan pupuk kaya nitrogen yang berbahan dasar amonia. Molekul amonia terdiri dari satu atom nitrogen dan dua atom hidrogen, tepatnya, dua atom hidrogen dan satu atom nitrogen. Nitrogen yang ada dalam amonia dapat dengan mudah dipasivasi, sehingga mudah diserap oleh tanaman. Produksi amonia adalah proses yang sulit yang membutuhkan pemisahan gas nitrogen dari pendampingnya dengan menggabungkannya dengan gas nitrogen. (Samekto, 2008)

10.3.2 Penyimpanan Data Nano

Ada banyak pembicaraan mengenai bagaimana nanoteknologi dapat digunakan untuk penyimpanan data. Meskipun ukurannya kecil, nanoteknologi memiliki kemampuan untuk menyimpan informasi dalam jumlah besar. Teknologi tradisional yang digunakan untuk menyimpan pengetahuan yang berkaitan dengan proses biologis makhluk hidup tidak dapat menandingi kapasitas penyimpanan nanoteknologi. Salah satu cara nanoteknologi mencapai penyimpanan data adalah melalui DNA (*Deoxyribo Nucleic Acid*) yang merupakan rantai panjang yang menyimpan informasi tentang susunan genetik organisme hidup. Untaian DNA ini bertanggung jawab atas sifat-sifat seperti kemiripan seorang anak dengan wajah ayahnya, serta kepribadian dan watak mereka.

Keturunan mewarisi pengetahuan orang tua mereka tentang penyakit. Perkembangan baru dalam penelitian DNA, seperti kloning domba, telah membawa temuan ini ke permukaan. Gambar di bawah ini menunjukkan bahwa domba hasil kloning menunjukkan kualitas, atribut, dan karakteristik yang sama dengan domba sumber aslinya. (Othman and Radiman, 2020)

10.3.3 Komputer DNA

Komputer dan DNA adalah konsep yang digunakan dalam situasi yang sangat berbeda. DNA adalah istilah yang digunakan dalam biologi dan genetika, sedangkan komputer digunakan dalam bidang informatika dan teknologi modern. Ternyata DNA juga dapat digunakan sebagai mesin penghitung yang jauh lebih pintar dari komputer selain untuk menyimpan informasi.

Suatu ketika, Leonard M Adleman bekerja sebagai ilmuwan komputer di University of Southern California. Suatu malam, ia asyik membaca "*Molecular Biology of the Gene*", sebuah buku yang ditulis oleh James Watson, seorang ahli biologi yang memenangkan Hadiah Nobel tahun 1962 karena menemukan struktur DNA *Double-Helix* pada tahun 1953. Adleman mendapati dirinya tidak bisa tidur karena begitu terpesona dengan buku tersebut. Bayangan untaian DNA yang terpilin terus menggangukannya hingga dia tiba-tiba bangun dari tempat tidur.

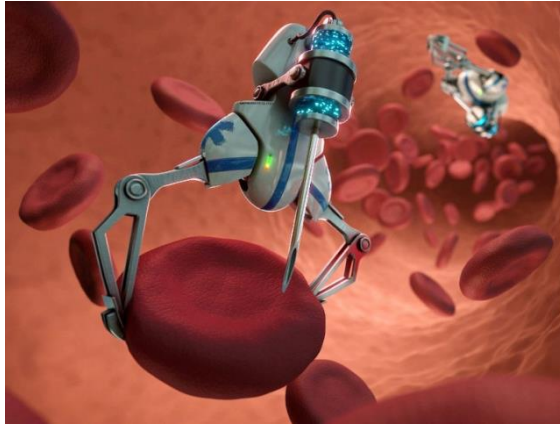
Pada malam itu, Adleman membuat sketsa desain kunci dari Komputer DNA. Jenis komputer ini menggunakan data biner untuk menyimpan dan menangani informasi atau perhitungan. Data biner pada dasarnya adalah sistem angka. DNA, yang merupakan singkatan dari asam nukleat deoksiribosa, menyimpan dan memproses informasi genetik manusia dengan menggunakan molekul-molekul yang dikodekan dengan huruf A, C, T, dan G. A adalah inisial untuk adenine, C untuk cytosine, T untuk thymine, dan G untuk guanine. Adenine hanya bisa berpasangan dengan thymine, guanine hanya bias berpasangan dengan cytosine. Ini berarti bahwa jika ada satu rantai DNA yang memiliki kode AACTAGGTC, maka pasangannya pasti TTGATCCAG. Kedua rantai itu akan berpasangan dan membentuk struktur berpilin yang kita kenal sebagai *Double-Helix*. Enzim dalam sel hidup membaca data-data genetik yang tersimpan dalam DNA (dalam bentuk kode A, C, T, G tadi) menggunakan cara yang sangat mirip dengan cara computer dalam membaca data biner. Analogi antara keduanya inilah yang dimanfaatkan dalam komputer DNA. Adleman mempublikasikan perhitungan dasar komputer DNA dalam Jurnal Ilmiah Science pada tahun 1994. Sejak itu ilmuwan-ilmuwan seluruh dunia berbondong-bondong melakukan penelitian untuk mengembangkan computer canggih yang sistemnya meniru dari sel makhluk hidup ini. NASA, Pentagon serta banyak lagi lembaga dan agen federal

berlomba-lomba mengucurkan dana untuk penelitian yang dapat menghasilkan DNA sintetik yang kemudian dipakai untuk penelitian yang berusaha mengembangkan sistem komputer masa depan ini.(Błasiak *et al.*, 2010)

10.3.4 Mesin yang Mandiri

Alam menunjukkan kemampuan luar biasa dari sel-sel biologis untuk berfungsi secara mandiri, sesuatu yang belum dapat ditiru sepenuhnya oleh teknologi kontemporer. Sel darah merah, misalnya, mampu mengatur dirinya sendiri, dengan mudah meningkatkan kadar oksigen dalam darah untuk proses metabolisme tanpa pemrograman atau arahan dari luar. Selain itu, jika sel-sel ini rusak, mereka memiliki kemampuan untuk menyembuhkan diri mereka sendiri, dan sel-sel hidup bahkan dapat bereproduksi secara mandiri. Ini adalah beberapa sifat luar biasa dari sel biologis.

Para ahli nanoteknologi yakin bahwa begitu kita dapat memahami dan memanipulasi teknik atom dan molekuler secara menyeluruh, kita akan mampu memproduksi mesin nano yang berfungsi mirip dengan organisme hidup. Mesin-mesin ini dapat mengatur dirinya sendiri untuk menyelesaikan tugas-tugas tertentu dan bahkan menghasilkan salinan dirinya sendiri. Dengan memanipulasi atom, kita dapat menciptakan mesin nano yang meniru struktur dan perilaku sel hidup.(Wang, Zhang and Zhang, 2018)



Gambar 10.5 Ilustrasi Robot Nano yang Bekerja dengan Sendirinya

10.4 Penutup

Nanoteknologi atau nanosains adalah ilmu pengetahuan dan teknologi pada skala nanometer atau satu persemilyar meter dengan ukuran inilah atom dan molekul dapat dimanipulasi disusun kembali sehingga menghasilkan sifat-sifat yang sesuai dengan keinginan. Peralatan untuk meraba dan memanipulasi atom yaitu Scan Tunneling Microscope/STM dan *Atomic Force Microscope/* AFM. Beberapa hasil dari pengembangan nanoteknologi belakangan ini antara lain nanokristal, nanokomposit, nanopartikel, bahan nanostuktur, nanotubes, nanokatalis dan nanofilter.

Beberapa rahasia alam yang mulai terungkap sebagian atau seluruhnya oleh nanoteknologi antara lain adalah proses manipulasi nitrogen oleh bakteri pada tanaman, penyimpanan data nano, komputer DNA, DNA yang dapat berhitung, DNA gudang Penyimpanan Informasi dan mesin yang mandiri. DNA merupakan gudang penyimpanan data yang terbesar yang ada saat ini dan telah diciptakan komputer DNA yang kecepatannya jauh melebihi kecepatan komputer transistor. Dengan

perkembangan nanoteknologi bisa dibuat mesin yang bisa menciptakan dan memperbaiki diri sendiri. Nanoteknologi datang dengan berbagai aspek yaitu kemampuan untuk mengatasi persoalan polusi dan merupakan teknologi yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajayan, P.M. and Tour, J.M. (2007) 'Nanotube composites', *Nature*, 447(7148), pp. 1066–1068.
- Anggraita, P. (2019) 'Penelitian Bahan Nano (Nanomaterial) di Badan Tenaga Nuklir Nasional', *Jurnal Sains Materi Indonesia*, pp. 6–8.
- Błasiak, J. *et al.* (2010) 'Komputery DNA', *mój nowy najlepszy przyjaciel*, p. 13.
- Chang, T.-C. *et al.* (2011) 'Developments in nanocrystal memory', *Materials today*, 14(12), pp. 608–615.
- Jumini, S. (2017) 'Nanoteknologi Manivestasi Nanosciences', *Jurnal Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UNSIQ*, 4(2), pp. 199–206.
- Modena, M.M. *et al.* (2019) 'Nanoparticle characterization: what to measure?', *Advanced Materials*, 31(32), p. 1901556.
- Othman, S.A. and Radiman, S. (2020) 'Potensi Nanoteknologi', *Advances in Humanities and Contemporary Studies*, 1(1), pp. 87–100.
- Priske, M. *et al.* (2016) 'Recent applications of organic solvent nanofiltration', *Chemie Ingenieur Technik*, 88(1-2), pp. 39–49.
- Pudjiastuti, W. and Listyarini, A. (2012) 'Polimer Nano Komposit sebagai Master Batch Polimer Biodegradable untuk Kemasan Makanan', *Journal of Industrial Research (Jurnal Riset Industri)*, 6(1), pp. 51–60.
- Sabarni, S. (2017) 'Atom Dan Molekul Berdasarkan Ilmu Kimia Dan Perspektif Al-Quran', *Lantanida Journal*, 2(2), pp. 123–136.
- Samekto, R. (2008) 'Bioteknologi dan keharaan tanaman (mikroorganisme, nitrogen dan fosfor)', *INNOFARM: Jurnal Inovasi Pertanian*, 7(1).

- Setyawan, B.A. (no date) 'Sesuatu Yang Tersembunyi Dibalik Nanoteknologi'.
- Somwanshi, S.B., Somvanshi, S.B. and Kharat, P.B. (2020) 'Nanocatalyst: A brief review on synthesis to applications', in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, p. 012046.
- Wang, B., Zhang, Y. and Zhang, L. (2018) 'Recent progress on micro-and nano-robots: Towards in vivo tracking and localization', *Quantitative imaging in medicine and surgery*, 8(5), p. 461.
- WIDJANARKO, P.B. (2022) *Mengenal Lebih Dekat Teknologi Nano: Pengetahuan untuk Pemula*. Penerbit P4I.
- Zulkarnain, A., Kadaritna, N. and Tania, L. (2015) 'Pengembangan E-Modul Teori Atom Mekanika Kuantumberbasis Web Dengan Pendekatan Saintifik', *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Kimia*, 4(1), pp. 222–235.

BAB 11

BIODEGRADASI

Oleh Fitri Junianti

11.1 Pengertian

Biodegradasi merupakan proses yang terjadi secara alami menggunakan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan organisme lain yang dapat menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Senyawa organik yang sering diuraikan dapat berasal dari alam maupun dari bahan sintesis. Bahan dari alam seperti:

- Karbohidrat yang terurai menjadi gula-gula yang sederhana,
- Protein yang terurai menjadi asam amino
- Lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin yang dapat terurai menjadi gula-gula yang sederhana. Dalam proses penguraian lignoselulosa membutuhkan *pretreatment* awal untuk mengurai lignin atau menghilangkannya. Hal ini karena lignin merupakan komponen keras yang membungkus atau mengelilingi serat selulosa dalam dinding sel tumbuhan
- Lipid terurai menjadi asam lemak dan gliserol
- Asam lemak terurai menjadi molekul yang lebih sederhana yang dapat menjadi sumber energi.

Selain bahan dari alam, bahan-bahan atau senyawa sintesis dapat diurai seperti:

- Polietilen glikol merupakan bahan untuk beberapa produk kosmetik dapat diurai menjadi senyawa lebih sederhana

- Polihidrosialkanoat (PHA), Polilaktat (PLA), dan asam Polilaktat yang merupakan polimer dari bioplastik dapat diurai menjadi karbon dioksida dan air.
- Poligliserol, poligliserol-3 polirisiolat merupakan polimer sintesis yang berbasis gliserol, dapat diurai oleh mikroorganisme menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana.

Dalam proses biodegradasi, mikroorganisme menghasilkan enzim-enzim yang bereaksi dengan polimer atau senyawa kompleks sehingga terurai menjadi komponen yang lebih sederhana. Senyawa-senyawa ini mengandung unsur-unsur karbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen yang merupakan nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme itu sendiri. Proses degradasi yang dilakukan oleh mikroorganisme berbeda-beda tergantung dari karakteristik dari mikroorganisme tersebut.

11.2 Mekanisme Biodegradasi

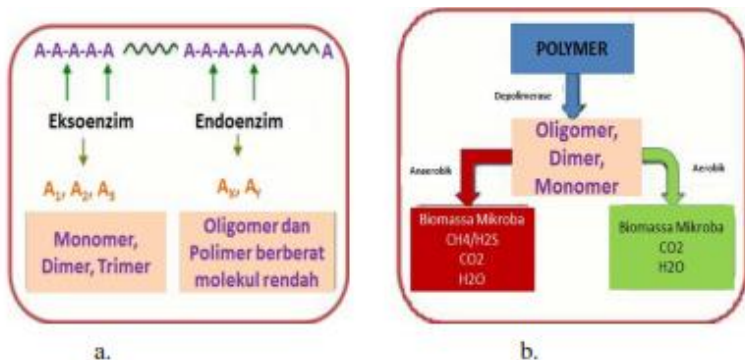
Mekanisme dari biodegradasi secara umum sebagai berikut:

1. **Pertumbuhan Mikroorganisme**
Biodegradasi memerlukan mikroorganisme dalam prosesnya sehingga pertumbuhan mikroorganisme harus diperhatikan. Dalam pertumbuhan mikro organisme akan mendapatkan nutrisi dari senyawa yang diurainya.
2. **Pemecahan Molekul**
Enzim diproduksi dari mikroorganisme berupa eksoenzim dan endoenzim. Enzim ini bertindak sebagai katalisator yang memecah molekul kompleks menjadi molekul sederhana. Contoh pada polimer, enzim selulase akan memecah rantai kimia pada selulosa menjadi monomer-monomernya yaitu gula reduksi. Pada protein dipecah menjadi asam amino dengan enzim protease dan amilum menjadi glukosa dengan enzim amilase.

Pada pemecahan molekul lebih lanjut terjadi proses fermentasi secara aerob dan anaerob tergantung dari jenis mikroorganismenya yang menjadi sumber nutrisi. Pada proses aerob dihasilkan karbon dioksida, sisa-sisa mikroba dan air. Sedangkan pada anaerob juga dihasilkan sisa mikroba, air dan karbon dioksida ataupun gas metana. Sumber nutrisi paling banyak dihasilkan pada proses aerob yaitu proses yang menggunakan oksigen dalam proses fermentasinya.

3. Penggunaan Nutrisi

Sumber nutrisi yang dihasilkan pada proses fermentasi selanjutnya digunakan organisme lain baik mikroorganisme maupun tumbuhan yang berada di lingkungan senyawa yang didegradasi. Organisme ini selanjutnya digunakan kembali dalam biodegradasi (siklus biodegradasi).



Gambar 11.1 Interaksi Mikroorganisme dan Polimer dengan Proses Deteriorasi (a) dan Degradasi (b)
(Sumber Zulaika dkk, 2017)

11.3 Faktor Biodegradasi

Biodegradasi selain dipengaruhi oleh jenis mikroorganisme juga dipengaruhi oleh beberapa faktor lain seperti:

1. Sifat dan ukuran bahan yang didegradasi (substrat)
Sifat substrat tergantung pada penyusun dari substrat tersebut, semakin kompleks senyawa penyusunnya maka

semakin lama dan sulit untuk didegradasi sebaliknya semakin sederhana senyawa penyusunnya semakin mudah untuk didegradasi. Begitu pula dengan ukuran partikel semakin kecil ukuran substrat semakin mudah untuk didegradasi.

2. Kelembapan

Mikroorganisme memerlukan kelembapan untuk tumbuh dan berkembang biak. Tingginya kelembapan akan menyebabkan kurangnya enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme sedangkan kelembapan rendah akan menyebabkan kelarutan nutrient berkurang dalam substrat.

3. Suhu

Suhu yang rendah dalam proses degradasi menghambat kinerja dari enzim bahkan dapat merusak struktur dari enzim sehingga biodegradasi berjalan lambat. Sebaliknya suhu yang tinggi menyebabkan energi kinetik enzim dan substrat meningkat sehingga biodegradasi berjalan cepat. Namun suhu yang terlalu tinggi dapat merusak enzim atau mengalami denaturasi.

4. pH

pH merupakan faktor yang penting dari biodegradasi, hal ini berkaitan dengan aktivitas enzim dan mikroorganisme. Ada beberapa mikroorganisme yang dapat tumbuh pada suasana asam, namun ada juga yang lebih cocok dengan pH basa. Jika pH sesuai dengan aktifitas dari enzim maka proses biodegradasi berjalan optimal.

5. Oksigen

Mikroorganisme membutuhkan oksigen dalam melakukan biodegradasi yang disebut dengan aerob, namun ada juga yang tidak membutuhkan oksigen untuk biodegradasi atau anaerob. Jumlah oksigen yang ada pada biodegradasi akan berpengaruh pada mikroorganisme yang dominan dan jenis biodegradasinya.

6. Bahan Kimia lain

Kehadiran bahan kimia lain dalam biodegradasi akan menghambat laju mikroorganisme dalam mengurai substrat

bahkan dapat membuat mikroorganisme tidak dapat tumbuh dan berkembang biak.

7. Pengadukan

Dalam biodegradasi, proses pengadukan dapat menghomogenkan dan meratakan mikroorganisme dan nutrisi yang diperlukan dengan cepat sehingga biodegradasi dapat berjalan dengan cepat.

11.4 Aplikasi Biodegradasi

Biodegradasi merupakan salah satu alternatif dalam pengolahan limbah baik padat maupun cair yang mengandung senyawa- senyawa organik yang berbahaya. Senyawa- senyawa organik ini diurai secara alami oleh beberapa mikroorganisme sehingga dampak negatif dari limbah ke lingkungan dapat dikurangi. Beberapa contoh bakteri dan senyawa-senyawa organik yang dapat terlibat dalam proses biodegradasi:

1. Hidrokarbon

Hidrokarbon merupakan senyawa yang memiliki unsur hidrogen (H) dan karbon (C). Senyawa ini merupakan senyawa dasar dari berbagai senyawa organik. Hidrokarbon terbagi dalam hidrokarbon rantai lurus (alifatik) dan hidrokarbon berbentuk cincin (Siklik). Hidrokarbon alifatik seperti alkana, alkena dan alkuna mudah didegradasi oleh bakteri sedangkan hidrokarbon siklik seperti benzena susah untuk didegradasi.

Mikroorganisme jenis bakteri yang dapat mengurai senyawa hidrokarbon dikelompokkan dalam hydrocarbon-degrading bacteria. Contoh dari kelompok bakteri ini yaitu *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Acinetobacte*, *Shigella*, *Mycobacterium*, *Corynebacterium*, *Streptococcus*, *Rhodococcu*, *Staphylococcus*, *Aeromonas*, *Escherichia*, *Enterobacter*, dan *Klebsiella*.

Daerah yang tercemar mengandung berbagai jenis senyawa-senyawa organik yang kompleks sehingga dalam proses biodegradasi tidak cukup jika hanya menggunakan satu jenis bakteri tetapi dari beberapa gabungan bakteri.

Gabungan bakteri pendegradasi ini akan lebih efektif dan efisien dalam degradasi lokasi atau daerah yang tercemar.

2. *Polychlorinated biphenyls* (PCB)

PCB merupakan larutan kimia sintesis yang terdiri dari dua cincin benzena yang memiliki satu atau lebih atom klorida yang terikat pada strukturnya. PCB digunakan dalam berbagai industri seperti sebagai bahan campuran cat, pembuatan alat listrik, bahan pembuatan tinta, plastik, peralatan hidrolis, produk berbahan dasar karet dan pelumas. Namun senyawa ini bersifat toksik dan dapat terakumulasi pada jaringan organisme sehingga berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan.

Bakteri yang dapat mengurai PCB secara aerob yaitu *Achromobacter*, *Sphingomonas*, *Pseudomonas*, *Comamonas*, *Burkholderia*, dan *Ralstonia*.

3. Pestisida

Penggunaan pestisida saat ini tidak dapat dipisahkan dalam kegiatan pertanian maupun perkebunan yang dilakukan oleh masyarakat. Pestisida digunakan untuk membasmi atau mengendalikan hama dan penyakit pada tanaman sehingga dapat membantu meningkatkan hasil panen. Penggunaan pestisida selain memberikan manfaat juga memberikan kerugian salah satunya menimbulkan pencemaran baik pada air ataupun pada tanah. Pencemaran oleh pestisida dapat diatasi dengan degradasi yang terjadi secara alami oleh fungi atau bakteri yang menjadikan pestisida sebagai sumber makanan.

Beberapa bakteri yang sering digunakan untuk biodegradasi pestisida yaitu *Bacillus*, *Staphylococcus*, *chlorpyrifos*, *Stenotrophomonas* yang menggunakan DDT untuk makanan dari proses metabolisme. *Providencia stuartii* mendegradasi chlorpyrifos. *Pseudomonas spp* memiliki enzim yang mampu memecah ikatan kimia dalam pestisida baik insektisida maupun herbisida. Bakteri *Arthrobacter spp* mendegradasi pestisida seperti atrazin, yang sering digunakan sebagai herbisida.

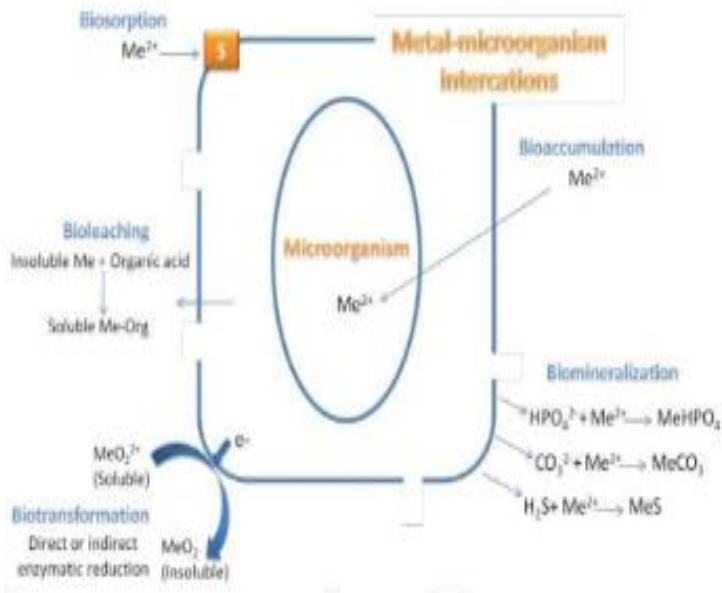
4. Pewarna tekstil

Pewarna dalam industri tekstil merupakan bahan penting yang mengandung senyawa kimia yang sulit untuk diurai dan dapat menyebabkan pencemaran terhadap tanah dan air. Enzim yang dimiliki oleh mikroorganisme dapat mengurai atau memecah ikatan kimia yang ada pada pewarna tekstil. Ada dua jenis proses biodegradasi yang dapat digunakan yaitu secara aerob dan anaerob. Biodegradasi anaerob lebih efektif dibandingkan dengan aerob tetapi hasil biodegradasi anaerob membentuk aromatik amin yang beracun dan bersifat mutagen untuk manusia. Kombinasi biodegradasi aerob dan anaerob dapat mengatasi hal tersebut seperti antara bakteri *Proteus sp.*, *Pseudomonas sp.* dan *Enterococcus sp.*

Beberapa jenis bakteri memiliki kemampuan alami untuk mendegradasi pewarna tekstil melalui proses biodegradasi yaitu *Bacillus subtilis* mendegradasi pewarna organik seperti pewarna azo. *Bacillus spp.* memiliki enzim yang mampu memecah ikatan kimia dalam pewarna organik, menghasilkan produk yang lebih sederhana dan lebih mudah diuraikan. *Staphylococcus spp.* memiliki kemampuan untuk mendegradasi pewarna tekstil, terutama pewarna sintetis. *Enterococcus spp.* mendegradasi pewarna tekstil, terutama pewarna organik.

5. Logam berat

Logam berat hanya dapat diubah menjadi bentuk yang lebih stabil dan tidak beracun, berbeda dengan senyawa organik yang dapat dihancurkan atau diurai oleh mikroba. Dalam logam berat, bakteri menggunakan logam untuk menerima elektron pada proses respirasi anaerob. Berikut mekanisme biodegradasi logam oleh mikroorganisme.



Gambar 11.2 Daur Biodegradasi Logam oleh Mikroorganisme
(Sumber : Fidiastuti dkk, 2019).

- *Biosorption* : penyerapan logam pada permukaan sel melalui mekanisme fisiokimia
- *Bioleaching* : mobilisasi logam berat melalui ekskresi asam organik atau reaksi metilasi
- *Biomineralisasi* : logam berat membentuk sulfida insolubel atau kompleks polimer
- *Biotransformasi* : reaksi redoks oleh enzim terhadap logam

Aplikasi biodegradasi terhadap logam berat seperti pada $Cr(VI)$ yang sangat beracun menjadi $Cr(III)$ yang lebih ramah lingkungan. Merkuri atau $Hg(III)$ dapat dimetilasi oleh beberapa jenis bakteri seperti *Bacillus pumilus*, *Alcaligenes faecalis*, dan *Brevibacterium* menjadi gas metil merkuri.

11.5 Biodegradasi Sampah Organik

Sampah dapat dibedakan menjadi 3 jenis berdasarkan kemampuannya untuk diurai (biodegradabilitas) yaitu sampah biodegradasi, cukup terurai dan tidak dapat terurai (non-biodegradasi). Sampah yang terurai seperti sampah dapur, sampah pasar, buah busuk dan sayuran busuk, sampah kota dan sampah pertanian dapat secara alami terurai namun membutuhkan waktu yang lama dan menimbulkan bau bagi lingkungan. Proses pengomposan dapat berjalan cepat dengan penambahan biang kompos (aktivator) dan komposter.

Sampah organik dapat dikelola dengan menggunakan pengomposan metode mikrobiologi anaerob dan aerob. Metode dengan anaerob menghasilkan biogas dan limbah cair sedangkan untuk proses aerob menghasilkan pupuk kompos. Tahapan dalam proses pengomposan yaitu:

- **Penghancuran Fisik**
Dalam tahapan ini sampah organik dihancurkan menjadi bagian-bagian lebih kecil, seperti melalui aktivitas perut hewan atau efek cuaca.
- **Penguraian Mikroorganisme**
Pada tahapan ini bakteri, jamur, dan mikroorganisme lainnya mulai menguraikan bahan organik menjadi molekul-molekul sederhana. Proses ini menghasilkan enzim yang memecah ikatan kimia dalam bahan organik.
- **Pembusukan:**
Pada tahapan ini materi organik yang menghasilkan gas-gas seperti karbon dioksida, metana, dan air. Metana adalah salah satu gas rumah kaca yang berperan dalam perubahan iklim.
- **Pemulihan Nutrien:**
Selama proses biodegradasi, nutrien seperti nitrogen dan fosfor yang terkandung dalam sampah organik dilepaskan ke dalam tanah. Ini dapat memberikan nutrisi bagi tanaman dan mikroorganisme di lingkungan.

Hal yang penting dalam proses biodegradasi sampah organik ini adalah rasio Karbon-Nitrogen (C/N). Rasio karbon-nitrogen dalam sampah organik mempengaruhi keseimbangan nutrisi mikroorganisme selama proses biodegradasi. Rasio C/N yang optimal berada dalam kisaran 20:1 hingga 30:1. Jika rasio ini terlalu tinggi (lebih banyak karbon daripada nitrogen), proses biodegradasi dapat melambat karena mikroorganisme membutuhkan nitrogen untuk pertumbuhan mereka.

DAFTAR PUSTAKA

- Badriyah, L. (2015) 'Biodegradasi Plastik Oleh Mikroorganisme Air Sampah Dalam Kolom Winogradsky', *Tugas akhir* [Preprint].
- Charlena *et al.* (2011) 'Biodegradasi Limbah Minyak Berat Menggunakan Isolat Tunggal dan Campuran dengan Penambahan Alkilbenzena Sulfonat Linear', *Puspiptek Serpong*, pp. 182–189.
- Fidiastuti, H.R. *et al.* (2019) *Bioremediasi Limbah Industri, Forind*.
- Rohaeti, E. (2009) 'Karakterisasi Biodegradasi Polimer', *Prosiiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA*, 47, pp. 248–257.
- Sanita Suriani, dan S. (2010) 'Pengelolaan Limbah: Biodegradasi Limbah Organik', p. 178.
- Sari, D.P., Amir, H. and Elvia, R. (2020) 'Isolasi Bakteri Dari Tanah Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Air Sebakul Sebagai Agen Biodegradasi Limbah Plastik Polyethylene', *Alotrop*, 4(2), pp. 98–106. Available at: <https://doi.org/10.33369/atp.v4i2.13833>.
- Sinaga, R., Christy, J. and Taruna Siregar, R. (2023) 'Komparasi Komposter Aerob Dan Anaerob Sederhana pada Pengelolaan Limbah Organik', *Jurnal Agroteknosains*, 7(1), pp. 77–88.
- Zulaika, A., Soesilo, T.E.B. and Noriko, N. (2017) 'Penentuan potensi kemampuan Trichoderma SP. dalam proses degradasi sampah plastik rumah tangga', *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV*, pp. 137–146.

BAB 12

POLIMER NANOMATERIAL PADA TEKSTIL ANTIBAKTERI SEBAGAI MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN

Oleh Eka Cahya Muliawati

12.1 Pendahuluan

Setelah pertanian, sektor tekstil adalah yang tertua dan sudah ada sejak beberapa abad yang lalu. Hingga tahun-tahun awal abad ke-20, tekstil hanya didasarkan pada produk alami seperti kapas, wol, sutra dan linen. Namun rangkaian perkembangan yang dimulai pada tahun 1890-an menyebabkan industri tekstil global sebagian besar didasarkan pada serat yang diproduksi oleh proses industri (Woodings, 2001; Senthil Kumar and Suganya, 2017). Serat tekstil yang di produksi oleh proses industri sebagian besar berupa serat regenerasi dan serat sintetis. Sementara tekstil yang menggunakan bahan dasar serat alami biasanya diproduksi perorangan.

Serat tekstil alami dan serat tekstil yang diregenerasi bersifat hidrofilik lebih rentan terhadap pertumbuhan bakteri patogen dan bakteri penyebab bau, seperti bakteri Gram-negatif dan Gram-positif, serta biodeteriorasi dibandingkan dengan serat sintetis yang bersifat hidrofobik (Broadhead, Craeye and Callewaert, 2021; Karypidis *et al.*, 2023). Agen antibakteri yang difungsikan sebagai perlindungan dan daya tahan lebih baik bagi produk tekstil maupun substrat tekstil (Mahltig, 2018). Beberapa senyawa telah digunakan untuk memberikan aktivitas antibakteri pada bahan tekstil, termasuk logam dan garam logam, senyawa amonium kuaterner, triclosan, kitosan, N-halamine dan peroxyacid, beberapa pewarna sintetis dan alami,

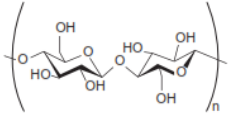
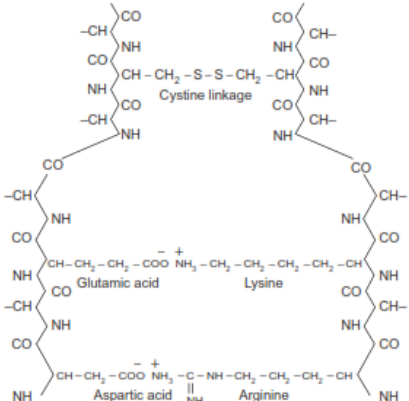
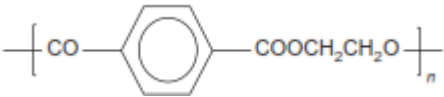
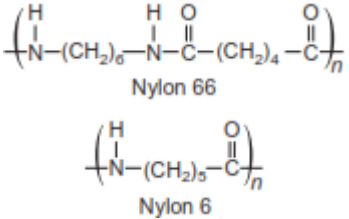
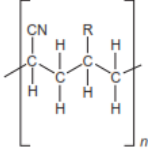
enzim terikat, dan bahan nano-struktur anorganik (Nayak and Padhye, 2015; Coradi *et al.*, 2018), untuk menjawab berbagai permasalahan dan tantangan ekonomi, lingkungan, dan kesehatan manusia. Polimer nanomaterial memberikan solusi efektif terhadap tantangan teknologi dan lingkungan dalam bidang polimer yang memberikan fungsionalitas baru pada bahan tekstil anti bakteri sebagai material yang ramah lingkungan (Sbai *et al.*, 2020; Shah *et al.*, 2022).

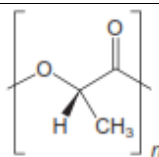
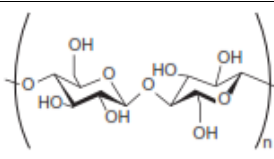
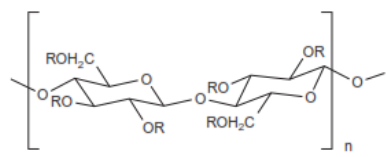
Bab ini membahas klasifikasi serat tekstil, proses basah pada tekstil dan dampak bagi lingkungan, agen antibakteri yang saat ini tersedia, aplikasi polimer nanomaterial dalam penyelesaian permasalahan pada tekstil, khususnya penyelesaian antibakteri, metode pengembangan bahan nanomaterial yang ramah lingkungan dilihat dari tahap persiapan hingga penyelesaian, dan mode aksi terhadap mikroorganisme patogen seperti *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Masalah lingkungan yang terkait dengan nanomaterial, metode uji standar dan tren masa depan terkait polimer nanomaterial pada tekstil juga akan dibahas pada bab ini.

12.2 Klasifikasi Serat Tekstil

Kategori utama dari serat tekstil adalah serat alami dan buatan manusia. Serat alami bisa berupa serat tumbuhan seperti katun, rami, atau serat protein seperti wol atau sutra. Serat buatan manusia secara luas diklasifikasikan menjadi serat regenerasi (contohnya, viskosa, liosel) dan serat sintetis (contohnya, poliester, poliamida, poliakrilik, poliuretan dan beberapa polimer lainnya). Struktur kimia dari serat tekstil yang paling umum ditunjukkan seperti pada Tabel 12.1.

Tabel 12.1 Jenis dan Struktur Kimia Serat Tekstil Paling Umum

Tipe Textil	Struktur Kimia Utama	Gugus Fungsi
1. Serat Alami		
Selulosa misalnya kapas, rami		-OH
Serat Protein misalnya Wool		-NH ₂ -OH -COOH -SH
2. Serat Buatan Manusia		
2.1 Serat yang tidak diregenerasi		
Polyester Polyethylene terephthalate (PET)		-COOH -OH
Poliamida (nylon)		-NH -CO NH
Poliakrilonitril	 (homopolimer R=CN, kopolymer R=COOH)	Situs anionik, misalnya -COOH atau sulfonat

Tipe Textil	Struktur Kimia Utama	Gugus Fungsi
L -Poli (asam laktat)		
Poliuretan	$-O-(CH_2)_n-O-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-NH-(CH_2)_n-NH-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-$	$\begin{array}{c} -NHCO \\ \parallel \\ O \end{array}$
2.2. Serat yang diregenerasi		
Tidak dimodifikasi misalnya viskosa, liosel		-OH
Selulosa yang dimodifikasi misalnya, asetat, triasetat	 Selulosa triasetat (semua R = COCH) Dan Selulosa asetat (2/3 R = COCH₃ , 1/3 R = H)	-OH -OCOCH ₃

12.3 Proses Persiapan

Proses persiapan yang ramah lingkungan, efisien, dan seragam sangat penting: (i) untuk menghilangkan berbagai kotoran seperti agen pengencang, kotoran non-selulosa dari katun, bahan nabati, dan lemak dari wol, serta minyak dan lapisan akhir dari serat sintetis; (ii) meningkatkan kebasahan dan daya serap terutama serat alami; (iii) menghancurkan zat warna untuk mendapatkan derajat putih yang tinggi, terutama pada serat alami; dan (iv) memastikan pewarnaan dan/atau proses penyelesaian berikutnya yang seragam tanpa mengganggu secara serius sifat fisikomekanik inheren dari perlakuan substrat. Jenis serat, konstruksi benang dan kain, sifat dan kandungan kotoran, serta kinerja yang ditargetkan dan sifat fungsional akan menentukan tahap persiapan, formulasi dan kondisi perlakuan, bahan bantu yang digunakan, proses basah berikutnya, dan mesin-mesin jalur produksi.

12.4 Dampak Bagi Lingkungan

Sudah diketahui bahwa proses pra-perlakuan dan pewarnaan tekstil menciptakan beberapa kekhawatiran lingkungan dan dampak negatif. Rasionalisasi dan optimisasi dari proses basah ini dapat menghemat sejumlah besar air/energi/bahan kimia dan pada gilirannya mengurangi beban polusi dari limbah pabrik pewarnaan yang akan diolah. Langkah-langkah pencegahan polusi yang direkomendasikan dalam proses pra-perlakuan dan pewarnaan bahan tekstil meliputi antara lain: (i) penggunaan sumber daya yang lebih baik dan pengelolaan yang baik dari proses basah; (ii) optimisasi dan/atau modifikasi dari proses basah konvensional; (iii) meminimalkan penggunaan aditif dan bahan kimia serta memaksimalkan pencucian fiksasi; (iv) penggantian bahan kimia berbahaya dengan bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan; (v) praktik daur ulang; (vi) penggantian bahan tambahan tekstil yang tidak dapat terurai menjadi bahan tambahan tekstil yang dapat terurai oleh alam; (vii) pemilihan bahan pewarna yang aman untuk lingkungan; (viii) penerapan teknologi baru (misalnya, bioteknologi, teknologi plasma, teknologi CO₂ super kritis); dan (ix) pengembangan sumber daya manusia dan peningkatan kesadaran lingkungan.

12.5 Pewarnaan yang Bertujuan Antibakteri

Penyelesaian (*finishing*) secara kimia adalah komponen penting dan tahap terpadu dari proses basah tekstil untuk mengembangkan sifat akhir kain untuk berbagai penggunaan dan aplikasi yang potensial. Proses pra-perlakuan dan pewarnaan yang ramah lingkungan sangat penting untuk hasil akhir yang optimal. Baru-baru ini, pengembangan material polimer nano material yang difungsionalkan sebagai material tekstil yang ramah lingkungan telah menarik minat besar untuk (i) meningkatkan sifat tekstil yang ada; (ii) mengembangkan produk tekstil inovatif dengan nilai tambah yang lebih tinggi (yaitu, keunggulan daya saing yang lebih baik); (iii) mengatasi kekhawatiran lingkungan yang semakin meningkat dari penggunaan tekstil; (iv) meminimalkan dampak ekologis terhadap

lingkungan dan masalah kesehatan manusia; dan (v) mengurangi biaya produksi dan lingkungan untuk tetap kompetitif.

Pengfungsian bahan tekstil disertai dengan peningkatan signifikan dalam sifat fungsional seperti fungsi antibakteri, perlindungan UV, kemampuan tahan api, daya tahan terhadap air, daya tahan terhadap air/minyak, status pembersihan diri, dan pemulihan kerutan. Bab ini terutama berfokus pada penyelesaian fungsional antibakteri dari tekstil menggunakan polimer nanomaterial dengan mempertimbangkan permintaan yang semakin meningkat untuk produk tekstil yang higienis, nyaman, dan berkinerja tinggi sehingga secara signifikan meningkatkan pangsa pasar tekstil antibakteri.

12.5.1 Tujuan Pembuatan Tekstil Antibakteri

Pertumbuhan mikroorganisme (misalnya, bakteri, jamur, ragi, jamur) pada bahan tekstil disertai oleh efek merugikan tidak hanya terhadap pengguna tekstil (misalnya, risiko kontaminasi dan terbentuknya bau tidak sedap), tetapi juga terhadap bahan tekstil itu sendiri (misalnya, penurunan kualitas tekstil, adanya noda, penurunan kekuatan tekstil). Serat alami (misalnya, kapas dan wol) dapat berfungsi sebagai media yang tepat untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Namun, tingkat kontaminasi dan serangan berikutnya dari mikroorganisme pada sebagian besar serat sintetis (misalnya, poliester) lebih sedikit daripada serat alami, mungkin karena serat sintetis lebih bersifat sifat hidrofobik. Oleh karena itu, tujuan utama yang paling umum dari fungsionalisasi antibakteri pada tekstil adalah: (i) untuk menghindari risiko kontaminasi dan terbentuknya bau tidak sedap; (ii) mencegah kontaminan bakteri berbahaya (seperti, *E. coli*, *S. aureus*); dan (iii) meminimalkan atau menghindari kerugian dalam kualitas dan sifat mekanik tekstil.

12.5.2 Persyaratan Material Antibakteri

Material fungsional antibakteri pada tekstil harus memenuhi persyaratan berikut: (i) harus membunuh atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen dan/atau yang menghasilkan bau tak sedap akibat bakteri; (ii) sangat efisien terhadap berbagai spektrum bakteri berbahaya; (iii) tidak ada dampak negatif pada kesehatan manusia; (iv) tidak ada efek merugikan pada sifat bawaan dan kenyamanan kain; (v) kompatibilitas dengan material tekstil umum lainnya dan/atau proses basah lainnya (misalnya, pewarnaan, pencetakan); (vi) hemat biaya dan mudah dalam pengaplikasian; (vii) aman bagi lingkungan dan tidak memiliki efek beracun bagi produsen juga pengguna tekstil.

12.5.3 Metode Atau Teknik Aplikasi

Metode atau teknik yang paling penting untuk memberikan aktivitas antibakteri pada tekstil dapat secara luas diklasifikasikan sebagai berikut: (i) penggabungan agen bioaktif yang tepat ke dalam lelehan polimer sebelum ekstrusi; (ii) aplikasi permukaan (misalnya, grafting kimia); (iii) ekshausi dan/atau pad-dry-cure untuk substrat alami (misalnya, perlakuan resin); (iv) teknologi pelapisan; (v) modifikasi kimia atau fisik dari substrat dan/atau agen aktif untuk ikatan kimia; (vi) teknik penyemprotan atau pembentukan busa; atau (vii) dengan menggunakan sol-gel atau pengkapsulan dalam partikel sol-gel. Pemilihan metode atau teknik fisikokimia yang paling sesuai (misalnya, pelapisan, perlakuan permukaan plasma atau laser, mikrokapsulasi) dan/atau kimia (misalnya, grafting, cross-linking, ikatan kovalen, khelasi) berdasarkan oleh sifat kimia agen aktif, jenis serat, struktur kain, peralatan yang tersedia, dan sifat kinerja yang diminta.

12.5.4 Kimia dan Mode Aksi Agen Antibakteri Saat Ini

Agen antibakteri dapat bertindak sebagai berikut:

- (a) melalui mekanisme pelepasan terkontrol (tipe *leaching*) dari bahan tekstil ke lingkungan sekitarnya, dengan demikian menyerang bakteri berbahaya pada permukaan serat atau di lingkungan sekitar, dan sebagian besar agen ini tidak terikat secara kimia dan menunjukkan daya tahan yang buruk.
- (b) melalui mekanisme kontak langsung (tipe non-leaching) (yaitu, bakteri harus kontak dengan permukaan kain), dan sebagian besar agen ini diimobilisasi secara kimia ke permukaan kain (yaitu, daya tahan yang baik, tanpa masalah kesehatan, tidak ada pelepasan bahan berbahaya ke lingkungan sekitar). Mekanisme sebenarnya dengan mana agen antibakteri membunuh atau menghambat pertumbuhan bakteri berbahaya meliputi kerusakan dinding sel, gangguan membran sitoplasma sel bakteri melalui fenomena fisik dan/atau ionik, pelepasan komponen sitoplasma berikutnya, penghambatan tindakan enzim, dan sintesis protein atau asam nukleat. Agen antibakteri yang paling umum, serat tekstil yang sesuai, serta mode fiksasi dan aksi mereka dirangkum dalam Tabel 12.2.

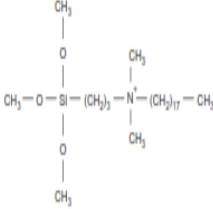
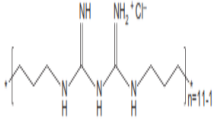
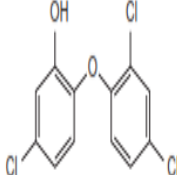
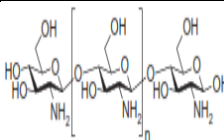
12.6 Penggunaan Nanomaterial pada Kebutuhan Tekstil

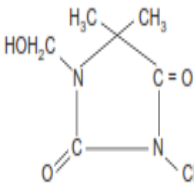
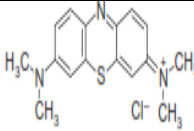
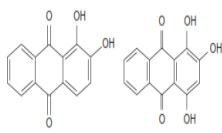
Pentingnya kebutuhan konsumen akan pakaian yang bersih dan nyaman telah membuka peluang baru dalam pengembangan tekstil inovatif. Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian lebih besar diberikan pada teknologi inovatif, terutama nanoteknologi dan nanomaterial cerdas (dengan rentang ukuran 1-100 nm), untuk (i) meningkatkan kinerja dan sifat fungsional dari produk tekstil saat ini; (ii) mengembangkan tekstil dengan fungsi baru; (iii) memenuhi kebutuhan pakaian higienis dan berkinerja tinggi; dan (iv) menciptakan peluang dan opsi besar dalam mengembangkan proses dan produk tekstil inovatif dengan nilai tambah yang tinggi.

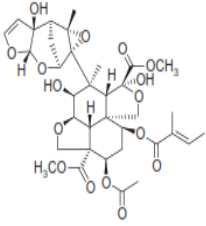
Nanomaterial baru-baru ini digunakan untuk memberikan beragam sifat fungsional seperti fungsi antibakteri, perlindungan UV, tahan api, status pembersihan diri, konduktivitas listrik, super hidrofilitas atau hidrofobitas, tahan terhadap air/minyak, dan anti-pengikatan, kemungkinan karena sifat dan fungsi unik serta baru yang dimilikinya. Bab ini menekankan penggunaan nanomaterial sebagai generasi baru agen antibakteri untuk (i) memberikan standar fungsionalitas antibakteri dan daya tahan yang lebih tinggi pada tekstil, dan (ii) menghindari atau meminimalkan kelemahan/ risiko/ kemungkinan kekhawatiran lingkungan, ekologi, dan/atau ekonomi yang terkait dengan penggunaan agen antibakteri saat ini (sebagai alternatif yang ramah lingkungan, layak, dan menjanjikan).

Tabel 12.2 Beberapa Agen Antibakteri yang Paling Umum Digunakan

Agen Antibakteri	Struktur Kimia	Jenis serat	Mode fiksasi	Mekanisme Kerja
Logam	Seperti partikel logam sangat halus seperti perak	Sintetik, seperti poliester, nilon.	Dengan menggabungkan ke dalam lelehan polimer sebelum proses pemintalan	Inaktivasi protein selular yang mengakibatkan kerusakan atau kematian sel
Ion-ion logam	Situs pengikatan dan kemampuan pengelatan (proses di mana suatu senyawa, yang disebut agen pengelat " <i>chelating agent</i> ", membentuk ikatan dengan ion logam atau molekul logam	Alami, seperti katun dan wool		

Senyawa ammonium kuartener (QACs) seperti AEM 5700.	 3-(Trihidroksisilil) propil(dimetil-oktadekil) amonium klorida	Sintetis, misalnya, poliester, nilon Alami, seperti wool	Melalui interaksi ionik. Melalui ikatan kovalen, seperti pada kasus wol yang dimodifikasi melalui gugus tiolnya.	Kerusakan membran dan kebocoran dari komponen selular.
PHMB merupakan singkatan dari "Polyhexamethylene Biguanide," yang merupakan agen disinfektan dan antimikroba	 Polyhexamethylene Biguanide	Buatan (sintetis) Alami, contohnya, selulosa.	melalui penghubungan silang Melalui ikatan ionik dan ikatan hidrogen	daya tarik elektrostatis permukaan sel bakteri bermuatan negatif dan meningkatkan permeabilitas dinding sel
Triclosan		Sintesis contohnya poliester, nilon. Alami, contohnya kapas, wol, dan campurannya	melalui penggunaan agen penyebaran, pengikat, dan/atau penghubungan silang	Dengan memblokir sintesis lipid dan berfungsi sebagai penghalang bagi mikroorganisme
Kitosan		Buatan (sintetis), contohnya poliester. Alami, contohnya kapas, wol, dan	Melalui teknik mikroenkapsulasi, ikatan reaktif, penghubungan silang, atau perlakuan plasma	Dengan menghambat metabolisme normal bakteri dan menyebabkan kematian sel mereka karena sifat polikationiknya yang kuat

		campurannya .		
N-halamina	 Dimetilol-5,5-dimetilhidantoin	Buatan (sintetis), misalnya poliester, nilon. Alami misalnya kapas, wol.	Melalui ikatan kovalen atau penerapan pada tekstil.	Membunuh bakteri terjadi karena sifat oksidasi dari ikatan halamine (N-Cl)
Pewarna, contohnya, pewarna dasar.	 C.I. Basic Biru 9. C.I." singkatan dari "Colour Index" yang merujuk pada sistem pengindeksan pewarna, dan "Basic Biru 9" merujuk pada nama spesifik pewarna tersebut.	Alami, misalnya, kapas, wol.	Ikatan ionik (antara gugus amina yang bermuatan positif dan permukaan yang bermuatan negatif)	Gangguan terhadap fungsi-fungsi penting dari membran sel
Alami	 <i>Alizarin Purple</i>, yang juga dikenal sebagai <i>Madder</i> (nama dalam bahasa Inggris), dapat diterjemahkan sebagai "Alizarin Merah Ungu" atau "Madder Ungu." ,pewarna alami yang diperoleh dari tanaman <i>rubia tinctorum</i>,	Alami, seperti kapas dan wol.	Kompleksasi dengan bahan fiksasi.	Kehadiran tannin dan kemampuan mengikat protein dari tannin.

Produk herbal alami, misalnya minyak neem dan turunannya.	 Azadirachtin adalah senyawa alami yang terdapat dalam minyak biji pohon neem (<i>Azadirachta indica</i>)	Tekstil berbahan dasar katun.	Melalui ikatan fisik. Melalui penghubungan silang atau melalui enkapsulasi	Aktivitas biologis, terutama azadirachtin
Enzim yang Diimobilisas	Alkalin pektinase, amilase, dan laccase	Katun	Diimobilisasi pada katun yang telah di- <i>crosslink</i> dengan ester dan diaktifkan setelahnya,	Aktivitas antibakteri tergantung pada jenis enzim yang terikat serta sifat dan struktur mikroorganisme.

Sumber : (Ibrahim, 2015)

12.7 Implikasi

Aplikasi potensial nanoteknologi dan pemanfaatan nanomaterial dalam bidang tekstil untuk menghasilkan tekstil dengan nilai tambah yang sangat fungsional yang saat ini beredar di pasaran dengan sifat-sifat seperti fungsi antimikroba, perlindungan dari sinar UV, kemampuan pembersihan sendiri, perlindungan dari api, tahan air/tahan minyak, penolak serangga, super hidrofobik, serta serat nanofiber yang diberi fungsi untuk aplikasi canggih kini semakin berkembang. Namun, kekhawatiran masyarakat yang semakin meningkat tentang dampak negatif dan risiko potensial dari persiapan dan aplikasi nanomaterial terhadap lingkungan, kesehatan dan keselamatan manusia, serta aspek keberlanjutan (*Environment, Health and Safety & Sustainability* atau EHS/S) telah meningkat secara dramatis. Diduga bahwa nanopartikel terstruktur (*Engineered Nanoparticles* atau ENPs) dapat secara tidak disengaja dilepaskan dari produk nanoskala karena dampak eksternal selama siklus hidupnya dan kemudian dapat memengaruhi persyaratan EHS/S. Dampak negatif EHS/S dari nanomaterial dapat berasal dari pemilihan bahan awal, metode persiapan NP, proses perlakuan tekstil, tingkat fiksasi, dan akhirnya penggunaan dan pembuangan bahan tekstil tersebut. Pengetahuan ilmiah tentang toksisitas ENP, luas, dan mekanisme pelepasannya selama siklus hidup produk, efek samping yang mungkin, risiko potensial, dan nasibnya setelah dilepaskan masih tidak mencukupi dan jarang, langkah-langkah pencegahan dan pencegahan berikut.

Langkah-langkah untuk menghindari atau meminimalkan risiko EHS/S selama siklus hidup nano-tekstil: (i) pembentukan ENP in situ atau penggunaan ENP dalam bentuk cair atau terenkapsulasi selama fase produksi; (ii) mencari alternatif bebas ENP (yaitu, pengurangan sumber untuk meminimalkan paparan pengguna tekstil selama fase penggunaan); (iii) pastikan bahwa ENP yang dimuat terikat secara permanen pada produk tekstil dengan fungsionalisasi untuk menghindari masalah daur ulang dan pembuangan tanpa mempengaruhi sifat yang diinginkan; (iv) mengurangi konsumsi sumber daya serta pembentukan limbah dan (v) menyoroti prinsip-prinsip dan kondisi yang menguntungkan untuk manufaktur,

penanganan, dan penggunaan bertanggung jawab dari ENP, serta pembuangan nanomaterial yang mengandung tekstil.

12.8 Ruang Lingkup Masa Depan

Penerapan prinsip kimia hijau untuk nano-sains sangat diminati dan masih menjadi tantangan untuk pengembangan masa depan tekstil antimikroba yang ramah lingkungan. Pengembangan dan produksi terbaru, bahan nano fungsional yang ramah lingkungan dan hemat biaya, serta beragam aplikasi inovatifnya untuk produksi skala besar, dengan mempertimbangkan pertimbangan kekhawatiran EHS/S, masih merupakan tantangan untuk pengembangan lebih lanjut dalam waktu dekat masa depan. Perkembangan tekstil di masa depan dan industri pakaian jadi khususnya pada tingkat UKM, akan sangat bergantung pada adopsi dan implementasi teknologi baru, membangun kemampuan teknologi baru, dan mentransfer teknologi tinggi tersebut menjadi inovatif, multifungsi dan bernilai tambah.

Produk yang memenuhi pelabelan ramah lingkungan yang sedang banyak dikembangkan . Selain itu, ada hal yang mendesak kebutuhan dari aspek pengetahuan, metode pengaplikasian terbaik, keterlibatan dengan industri tekstil, memfasilitasi penggunaan teknologi baru dan inovasi untuk membuat teknologi baru lebih terjangkau, dan mendukung kolaborasi dengan badan standardisasi untuk mendorong sinergi menangani risiko EHS/S di seluruh produk siklus produksi dan membantu transisi berkelanjutan, hemat sumber daya, dan ramah lingkungan untuk teknologi nano pada tekstil.

DAFTAR PUSTAKA

- Broadhead, R., Craeye, L. and Callewaert, C. (2021) 'The future of functional clothing for an improved skin and textile microbiome relationship', *Microorganisms*, 9(6). Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9061192>.
- Coradi, M. *et al.* (2018) 'Production of antimicrobial textiles by cotton fabric functionalization and pectinolytic enzyme immobilization', *Materials Chemistry and Physics*, 208, pp. 28–34. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.Matchemphys.2018.01.019>.
- Ibrahim, N.A. (2015) *Nanomaterials for Antibacterial Textiles, Nanotechnology in Diagnosis, Treatment and Prophylaxis of Infectious Diseases*. Elsevier Inc. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801317-5.00012-8>.
- Karypidis, M. *et al.* (2023) 'A Mini-Review of Synthetic Organic and Nanoparticle Antimicrobial Agents for Coatings in Textile Applications', *Coatings*, 13(4). Available at: <https://doi.org/10.3390/coatings13040693>.
- Mahltig, B. (2018) 'Cellulosic-based composite fibers', *Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications*, pp. 277–301. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.00013-X>.
- Nayak, R. and Padhye, R. (2015) 'Antimicrobial finishes for textiles', *Functional Finishes for Textiles: Improving Comfort, Performance and Protection*, pp. 361–385. Available at: <https://doi.org/10.1533/9780857098450.2.361>.
- Sbai, S.J. *et al.* (2020) 'The recent advances in nanotechnologies for textile functionalization', *Advances in Functional and Protective Textiles*, pp. 531–568. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820257-9.00020-5>.
- Senthil Kumar, P. and Suganya, S. (2017) 'Introduction to sustainable fibres and textiles', *Sustainable Fibres and Textiles*, pp. 1–18.

Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102041-8.00001-9>.

Shah, M.A. *et al.* (2022) 'Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review', *Journal of Advanced Research*, 38, pp. 55–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JARE.2022.01.008>.

Woodings, C. (2001) *Regenerated cellulose fibres, Regenerated cellulose fibres*. Available at: <https://doi.org/10.1533/9781855737587>.

BIODATA PENULIS



I Wayan Tanjung Aryasa, S.Si., M.Si

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medik
Fakultas Ilmu-Ilmu Kesehatan Universitas Bali Internasional

Penulis bernama lengkap I Wayan Tanjung Aryasa., tempat lahir Denpasar, 13 Maret 1986, ia adalah anak pertama dari dua bersaudara. Jenjang pendidikan penulis adalah merupakan lulusan S1 Kimia ITS dan S2 Kimia ITB, dan sekarang mengabdikan sebagai dosen pengajar di Universitas Bali Internasional program studi Teknologi Laboratorium Medik. Selain mengajar ia juga aktif menulis beberapa buku yaitu buku Kimia Organik dan Green technology innovation : transformasi teknologi ramah lingkungan berbagai sektor serta penelitian-penelitian yang berkaitan dengan ilmu kimia.

BIODATA PENULIS



Khoirul Ngibad, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi D3 TLM
Fakultas Ilmu Kesehatan

Lulus Pogram Sarjana di Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang tahun 2013, lulus Program Magister di Program Studi Magister Kimia Universitas Brawijaya Tahun 2015. Saat ini merupakan dosen tetap Program Studi D3 TLM (Teknologi Laboratorium Medis) Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Maarif Hasyim Latif Sidoarjo. Mengampu mata kuliah Kimia Air dan Kimia Makanan Minuman. Telah menulis Buku Ajar Kimia Air I, Buku Pedoman Praktikum Kimia Air, dan Buku Pedoman Praktikum Kimia Makanan Minuman. Selain itu, penulis juga pernah sebagai ketua LPPM (Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat) sejak tahun 2019 sampai 2023. Penulis sekarang mendapat tugas tambahan sebagai Wakil Rektor III Bidang Kemahasiswaan, Kreativitas, PMB dan Alumni.

BIODATA PENULIS



Isran Asnawi, S.Si., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Kimia Mineral
Politeknik Industri Logam Morowali

Penulis lahir di Bulukumba, Sulawesi Selatan, tanggal 9 Januari 1991. Penulis merupakan dosen tetap di Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali. Penulis telah menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Universitas Hasanuddin dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia Universitas Muslim Indonesia. Pada tahun 2018, penulis mulai berkarir sebagai dosen di Politeknik ATI yang kemudian menjadi dosen tetap di Politeknik Industri Logam Morowali hingga saat ini. Penulis menekuni beberapa rumpun bidang ilmu kimia, seperti kimia analisis, teknik kimia, kimia lingkungan, dan mikrobiologi. Penulis juga aktif sebagai ketua Satuan Penjamin Mutu Internal di perguruan tinggi saat ini.

BIODATA PENULIS



Hijratur Rahmi, S.Pd., M.Si

Dosen Ilmu Alamiah Dasar
Institut Seni Indonesia Padangpanjang

Penulis lahir di Bukittinggi tanggal 04 Juli 1992. Penulis adalah dosen mata kuliah umum Ilmu Alamiah Dasar pada kedua Fakultas yang ada di Institut Seni Indonesia Padangpanjang yaitu Fakultas Seni Rupa dan Desain serta Fakultas Seni Pertunjukan. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Prodi Pendidikan Kimia Universitas Negeri Padang dan melanjutkan S2 pada Institut Teknologi Bandung jurusan Kimia dengan Kelompok Keahlian Kimia Anorganik. Penulis menekuni bidang Penelitian dan Pengabdian.

BIODATA PENULIS



Kasta Gurning

Dosen Program Studi Farmasi
Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Senior Medan

Penulis lahir di Simpang Tiga, 11 Juli 1989 kabupaten Toba, Provinsi Sumatera Utara. Penulis merupakan anak ke sepuluh dari dua belas bersaudara pasangan G. Gurning dan S. br. Sitorus. Pendidikan Sarjana ditempu di Program Studi Pendidikan Kimia Universitas Negeri Medan Tahun 2007-2011 dengan gelar Sarjana Pendidikan (S.Pd.). Pendidikan Magister di Program Studi Ilmu Kimia (Konsentrasi Kimia Organik) Universitas Gadjah Mada Tahun 2012-2014 dengan gelar *Master of Science* (M.Sc.), dan Program Studi Pendidikan Sains (konsentrasi Pendidikan Kimia) di PPs Universitas Negeri Yogyakarta Tahun 2013-2015 dengan gelar Magister Pendidikan (M.Pd.). Sejak Tahun 2015 bekerja sebagai Dosen Tetap di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Senior Medan sampai sekarang. Penulis aktif melakukan publikasi ilmiah baik di jurnal nasional dan internasional, serta menerbitkan tulisan dalam bentuk Buku Ajar, Buku Monograf dan Buku Referensi. Penulis terhitung sejak Agustus 2022 sedang menempu pendidikan Program Studi Doktor di Universitas Gadjah Mada dengan konsentrasi Kimia Organik Bahan Alam.

BIODATA PENULIS



Aliyah Fahmi S.Si, M.Si

Ketertarikan penulis terhadap ilmu kimia zat padat sejalan dengan studi Penulis yang berkaitan dengan Ilmu Kimia. Penulis memulai perkuliahan pada program studi D3 Analis Kimia di Universitas Sumatera Utara, yang dilanjutkan S1 Kimia pada tahun 2005 s/d 2007. Penulis kemudian melanjutkan perkuliahan pada jenjang magister di tahun 2014 s/d 2016 dan menjadi Dosen Kimia di Universitas Efarina, Pematang Siantar. Penulis ditempatkan di Fakultas Kesehatan, tepatnya di Program Studi D3 Analis Kesehatan atau Analis Teknik Laboratorium Medik. Saat ini, Penulis sedang dalam studi S3 terkait Ilmu Kimia. Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh Penulis didanai oleh LPDP dan Kemenristek DIKTI. Selain menjadi Peneliti, Penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara Indonesia. Email Penulis: aliyahfahmi0984@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Dr. Sinardi., ST., M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Kimia
Fakultas Teknik Universitas Fajar

Penulis lahir di Makassar pada tanggal 8 Maret 1980. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Fajar, Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 di Universitas Muslim Indonesia pada Program Studi Teknik Kimia dan Program Studi Pertanian di Universitas Hasanuddin. Melanjutkan S2 pada Program Studi Pengelolaan Lingkungan Hidup Universitas Hasanuddin. Penulis melanjutkan S3 di Institut Teknologi Bandung Program Studi Teknik Lingkungan. Penulis menekuni bidang menulis dan aktif menulis buku baik buku solo maupun kolaborasi. Penulis juga menjadi reviewer pada beberapa jurnal penelitian dan pengabdian. Penulis dapat dihubungi melalui email sinardi@unifa.ac.id.

BIODATA PENULIS



Ir. Rismul Trianto Salawali, S.T.,M.T

Dosen Program Studi Analisis Kimia
Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng

Penulis lahir di Bualemo (Sulawesi Tengah) tanggal 25 Juni 1994. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Analisis Kimia, Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng, Kementerian Perindustrian. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Kimia dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia bidang konsentrasi Teknologi Pembakaran dan Energi di Universitas Muslim Indonesia. Penulis juga menyelesaikan Program Profesi Insinyur di Universitas Hasanuddin. Penulis sekarang menekuni bidang energi.

BIODATA PENULIS



Drs. Bambang Suhartawan, M.MT

Dosen Jurusan Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Sains dan Teknologi Jayapura

Penulis lahir di Blitar tanggal 13 Pebruari 1964. Penulis adalah dosen tetap dengan status PNS-DPK pada Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) Universitas Sains dan Teknologi Jayapura (USTJ). Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Kimia Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA) Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Cenderawasih Jayapura pada tahun 1989. Pendidikan Pasca Sarjana diperoleh dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Manajemen Teknik Lingkungan pada tahun 2002. Sebagai Dosen USTJ pada Mata Kuliah Pengelolaan Kualitas Lingkungan juga Sistem Manajemen Lingkungan (SML). Selain itu di luar kampus pernah terlibat sebagai Tim penyusunan AMDAL, antara lain Pembangunan Rumah Sakit Umum di Wamena (200), Pembangunan Jembatan Hamadi – Holtekamp (Jembatan Merah) Jayapura (2002) dan Pembangunan Dermaga Kapal di Serui (2003).

BIODATA PENULIS



Andar Kusnanto, S.T., M.T.

Dosen Teknik Kimia
STT Fatahillah Cilegon Banten

Penulis bernama lengkap Andar Kusnanto ini dilahirkan di Desa Sidowarno Kecamatan Wonosari Klaten, 16 Agustus 1991, merupakan putra dari pasangan Bapak Tunggal dan Ibu Sumiyem. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu S1 Teknik Kimia ITS Surabaya. Setelah lulus dari ITS Surabaya tahun 2013, penulis diterima menjadi mahasiswa Magister Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa tahun 2020.

Penulis juga pernah bekerja di PT Polytama Propindo Balongan (PT Pertamina Balongan, Indramayu) tahun 2014. Dan sekarang, Penulis masih bekerja di PT Chandra Asri Petrochemical, Tbk sebagai Senior Production Engineer Monomer Plant dari 2015 sampai sekarang. Penulis juga tercatat sebagai dosen tetap di STT Fatahillah Cilegon Program Studi Teknik Kimia

Dalam kegiatan akademik, penulis mengambil Tugas Akhir dalam Bidang Nano material saat di ITS Surabaya dan mengambil Tesis dalam Bidang Studi Pemodelan dan Simulasi Reaktor Dinamik di Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Alamat Penulis saat ini adalah Sakinah Residence E13, Cibeber, Cilegon

BIODATA PENULIS



Fitri Junianti

Dosen Program Studi Teknik Kimia Mineral
Politeknik ATI Makassar

Penulis lahir di Madining tanggal 12 Juni 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kimia Mineral Politeknik ATI Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia Mineral. Saat ini Penulis fokus pada penelitian mengenai bioproses seperti produksi hidrogen dari limbah sabut kelapa, produksi bioetanol dari ampas kelapa dan beberapa penelitian mengenai pemanfaatan biomassa.

BIODATA PENULIS



Dr. Eka Cahya Muliawati, S.Si., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Kimia
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

Penulis lahir di Surabaya tanggal 26 Juni 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Universitas Airlangga, S2 pada Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro dan melanjutkan S3 pada Jurusan Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis menekuni bidang Teknologi Membran dan Polimer.