

REKAYASA BIOENERGI

**Khairiah
Ropiudin
Pande Putu Indira Prima Dewi
Ni Made Suaniti
Andi Abdul Halik Lateko
Wayan Budiarsa Suyasa
Wenny Surya Murtius
Kavadya Syska
I Ketut Budaraga
Ketut Gede Dharma Putra**



REKAYASA BIOENERGI

**Khairiah
Ropiudin
Pande Putu Indira Prima Dewi
Ni Made Suaniti
Andi Abdul Halik Lateko
Wayan Budiarsa Suyasa
Wenny Surya Murtius
Kavadya Syska
I Ketut Budaraga
Ketut Gede Dharma Putra**



CV HEI PUBLISHING INDONESIA

REKAYASA BIOENERGI

Penulis:

Khairiah

Ropiudin

Pande Putu Indira Prima Dewi

Ni Made Suaniti

Andi Abdul Halik Lateko

Wayan Budiarsa Suyasa

Wenny Surya Murtius

Kavadya Syska

I Ketut Budaraga

Ketut Gede Dharma Putra

ISBN: 978-623-8722-73-0

Editor : Afridon, S.T, M.Si

Penyunting : Purnama Wirawan, S.Si, M.Si

Desain Sampul dan Tata Letak : Ririn Novitasari SE

Penerbit : CV HEI PUBLISHING INDONESIA

Nomor IKAPI 043/SBA/2023

Redaksi :

Jl. Air Paku No.29 RSUD Rasidin, Kel. Sungai Sapih, Kec Kuranji

Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.HeiPublishing.id

Email : heipublishing.id@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah subhanahu wa'taala atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku "Rekayasa Bioenergi", dapat terselesaikan dengan baik. Buku ini merupakan Biomassa Sebagai Energy Alternative Terbarukan, Teknik Konversi Energy Biomassa Padatan, Teknik Pengolahan Bioediesel, Pengolahan Biodiesel Dengan Katalis, Pengolahan Biodiesel Non Katalis, Teknik Pengolahan Biohidrogen, Pretreatment Dan Hidrolisis, Fermentasi Dan Pemurnian, Pengolahan Biogas, Gasifikasi.

Semoga buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, dan para profesional di bidang Psikologi Pendidikan, serta siapa saja yang tertarik mempelajari Psikologi Pendidikan. Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini, Harapan terbesar buku ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif dalam perkembangan ilmu pengetahuan.

Selamat membaca dan semoga bermanfaat.

Padang, Oktober 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR	v
BAB 1 BIOMASSA SEBAGAI ENERGY ALTERNATIVE	
TERBARUKAN.....	1
1.1 Pengertian dan Manfaat Biomassa	1
1.2 Jenis Biomassa.....	3
1.3 Urgensi Biomassa	6
1.4 Konversi Biomassa.....	6
1.5 Potensi Pengembangan	8
DAFTAR PUSTAKA.....	10
BAB 2 TEKNIK KONVERSI ENERGI BIOMASSA	
PADATAN.....	11
2.1 Pendahuluan.....	11
2.2 Metode Konversi Energi Biomassa Padatan.....	12
2.2.1 Konversi Termokimia	12
2.2.2 Konversi Biokimia.....	15
2.3 Pemanfaatan Energi dari Biomassa Padatan.....	17
2.3.1 Pembangkit Listrik berbasis Biomassa.....	18
2.3.2 Pemanasan dan Pengeringan.....	18
2.3.3 Produksi Bahan Bakar Cair	20
2.4 Teknologi terkini dalam Konversi Energi Biomassa	
Padatan.....	22
2.4.1 Kogenerasi (<i>Cogeneration</i>)	22
2.4.2 Pengembangan Biochar	22
2.4.3 Teknologi Peningkatan Gas Sintesis	23
DAFTAR PUSTAKA.....	24
BAB 3 TEKNOLOGI PROSES PEMBUATAN BIODIESEL.....	27
3.1 Pendahuluan.....	27
3.2 Teknik Produksi Biodiesel	28
3.3 <i>Economic assessment of biofuels</i>	32
DAFTAR PUSTAKA.....	34
BAB 4 PENGOLAHAN BIODIESEL DENGAN KATALIS.....	37
4.1 Pendahuluan	37

4.2 Biodiesel Dan Standar Mutunya.....	38
4.3 Reaksi Esterifikasi dan Transesterifikasi Biodiesel	43
4.3.1 Esterifikasi	48
4.3.2 Transesterifikasi.....	50
4.4 Alkohol.....	51
4.5 Minyak Nabati	51
DAFTAR PUSTAKA.....	59
BAB 5 PENGOLAHAN BIODIESEL NON KATALIS	65
5.1 Pendahuluan.....	65
5.2 Teori Dasar Biodiesel	66
5.3 Proses Transesterifikasi	66
5.4 Sifat-Sifat Fisik dan Kimia Biodiesel.....	67
5.5 Prinsip Pengolahan Biodiesel Non Katalis	68
5.6 Bahan Baku untuk Biodiesel Non Katalis.....	69
5.7 Metode Pengolahan Biodiesel Non Katalis.....	70
5.8 Penggunaan Biodiesel di Sektor Kelistrikan	71
5.9 Ringkasan dan Kesimpulan.....	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73
BAB 6 TEKNIK PENGOLAHAN BIOHIDROGEN.....	75
6.1 Produksi Biohidrogen dengan Metode Fermentasi Gelap.....	75
6.1.1 Mekanisme Dasar Fermentasi Gelap	76
6.1.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Produksi Biohidrogen.....	76
6.1.3 Metode Fermentasi Gelap.....	77
6.1.4 Tantangan dalam Produksi Biohidrogen dengan Fermentasi Gelap.....	78
6.1.5 Prospek Masa Depan.....	79
6.2 Fotofermentasi	79
6.2.1 Reaksi Dasar Fotofermentasi	80
6.2.2 Mikroorganisme yang Digunakan	80
6.2.3 Mekanisme Fotofermentasi	80
6.2.4 Nitrogenase	81
6.2.5 Hidrogenase	81
6.2.6 Substrat untuk Fotofermentasi	81
6.2.7 Asam Organik.....	82
6.2.8 Karbohidrat.....	82

6.2.9 Limbah Organik.....	82
6.2.10 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produksi Biohidrogen.....	82
6.2.11 Aplikasi dan Keuntungan Biohidrogen.....	82
6.3 Produksi Biohidrogen dengan Metode Biofotolisis	84
6.3.1 Mekanisme Dasar Biofotolisis.....	85
6.3.2 Jenis Mikroorganisme yang Digunakan	86
6.3.3 Kondisi Optimal Produksi.....	86
6.4 Produksi Biohidrogen dengan Metode Elektrolisis Mikrobal.....	88
6.4.1 Mekanisme Dasar Elektrolisis Mikrobal	89
6.4.2 Komponen Utama dalam Sel Elektrolisis Mikrobal	89
6.4.3 Keuntungan dan Tantangan	90
6.5 Optimasi Bioreaktor dan Kondisi Operasi.....	91
6.5.1 Produksi Biohidrogen.....	92
6.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Produksi Biohidrogen.....	92
6.5.3 Teknologi dan Inovasi dalam Bioreaktor	93
DAFTAR PUSTAKA.....	95
BAB 7 PRETREATMEN DAN HIDROLISIS.....	97
7.1 Pendahuluan.....	97
7.2 Pretreatmen.....	99
7.2.1 Pretreatmen Metode Fisik	99
7.2.2 Pretreatmen Kimia.....	101
7.2.3 Pretreatmen Biologi	105
7.3 Hidrolisis	107
DAFTAR PUSTAKA.....	109
BAB 8 FERMENTASI DAN PEMURNIAN.....	115
8.1 Pendahuluan.....	115
8.2 Prinsip Dasar Fermentasi.....	117
8.2.1 Fermentasi Alkohol (Bioetanol)	117
8.2.2 Fermentasi Butanol (Biobutanol)	118
8.2.3 Fermentasi Metana (Biogas).....	118
8.3 Tahapan dalam Proses Fermentasi.....	119
8.3.1 Persiapan Substrat.....	120
8.3.2 Persiapan Substrat	120
8.3.3 Persiapan Substrat	120

8.3.4 Pengendalian dan Optimasi	120
8.4 Pemurnian Produk Fermentasi.....	121
8.4.1 Distilasi.....	121
8.4.2 Pemurnian Butanol	122
8.4.3 Pemurnian Biogas.....	123
8.5 Teknologi Modern dalam Fermentasi dan Pemurnian....	124
8.5.1 Fermentasi Berkelanjutan (<i>Continuous Fermentation</i>).....	125
8.5.2 Teknologi Membran.....	126
8.5.3 Penggunaan Enzim Rekayasa Genetik.....	126
8.5.4 Fermentasi Simultan.....	127
DAFTAR PUSTAKA.....	129
BAB 9 PENGOLAHAN BIOGAS.....	133
9.1 Pendahuluan	133
9.2 Reaktor Biogas	136
9.3 Proses Pengolahan Biogas.....	140
9.4 Proses Anaerobik.....	142
9.5 Pemisahan Padat Dan Cair	147
9.6 Pembersihan Biogas.....	149
9.7 Penyimpanan Dan Distribusi	150
9.8 Penggunaan Biogas	152
9.9 Pemantauan Dan Pemeliharaan	154
9.10 Pemanfaatan Limbah Cair	156
DAFTAR PUSTAKA.....	159
BAB 10 GASIFIKASI.....	163
10.1 Pendahuluan	163
10.2 Tahap Proses Gasifikasi.....	164
10.3 Aplikasi Proses Gasifikasi.....	168
10.4 Jenis Gasifikasi	170
10.5 Keunggulan Proses Gasifikasi	177
10.6 Proses gasifikasi dalam incinerator	179
10.7 Penutup	184
DAFTAR PUSTAKA.....	186
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan antara bio-oil dan bioetanol.....	21
Tabel 4.1. Nilai Beberapa Parameter Biodiesel menurut Standar Eropa, Amerika, dan Indonesia	41
Tabel 4.2. Standar Mutu dan Spesifikasi Biodiesel di Indonesia Sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI)	45
Tabel 4.3. Perbedaan Sifat dan Karakteristik antara Biodiesel dan Minyak Solar	46
Tabel 4.4. Kandungan Asam Lemak Bebas dalam Minyak Goreng Sebelum dan Setelah dipakai untuk Proses Menggoreng.....	52
Tabel 4.5. Kandungan dan Struktur Asam lemak pada Minyak Jelantah	53
Tabel 4.6. Fragmentasi berbagai biodiesel.....	57
Tabel 5.1. Perbandingan Emisi antara Biodiesel dan Diesel Konvensional.....	71
Tabel 10.1. Reaksi Gasifikasi pada Suhu 25°C.....	167
Tabel 10.2. Karakteristik tipikal umpan reactor untuk pembangkitan energy.....	178
Tabel 10.3. Parameter kualitas syngas untuk pembangkit daya.....	179

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konversi termokimia pada biomassa.....	12
Gambar 2.2. Konversi biokimia pada biomassa.....	15
Gambar 4.1. Spektra Fourier Transform Infrared FAME dan FAEE dari minyak jelantah hasil penggorengan ayam selama 7 jam dengan katalis asam sulfat dan asam sulfat toluena	47
Gambar 4.2. Reaksi Esterifikasi	49
Gambar 4.3. Reaksi Transesterifikasi	50
Gambar 4.4. Mekanisme Reaksi Oksidasi pada Minyak.....	54
Gambar 4.5. Spektra FTIR Biodiesel (Kontrol/komersial) warna biru dibandingkan dengan Biodiesel dari minyak jelantah yang Dimurnikan dengan HCl, H ₂ SO ₄ , dan H ₃ PO ₄	56
Gambar 4.6. Spektrogram FTIR Minyak Goreng Komersial, Minyak Goreng Bekas, dan Minyak Goreng Bekas Olahan Minyak Biodiesel	56
Gambar 4.7. Fragmentasi (m/z) dan Intensitas Relatif dengan Spektrometri Massa Biodiesel dari Bahan Bakar Diesel Komersial dan Minyak Jelantah yang Dimurnikan Menggunakan HCl, H ₂ SO ₄ , dan H ₃ PO ₄	57
Gambar 5.1. Proses Transesterifikasi	67
Gambar 6.1. Bioreaktor Fermentasi Gelap	77
Gambar 6.2. Reaktor Biofotolisis.....	85
Gambar 8.1. Produk dalam proses fermentasi	115
Gambar 8.2. Proses pemurnian.....	116
Gambar 8.3. Proses fermentasi alkohol (bioetanol)	117
Gambar 8.4. Proses fermentasi butanol (biobutanol)	118
Gambar 8.5. Proses fermentasi metana (biogas)	119
Gambar 9.1. Reaktor biogas tipe floating dru	137
Gambar 9.2. Reaktor biogas tipe kubah tetap (<i>fixed dome type</i>).....	138
Gambar 9.3. Reaktor tipe balon.....	139
Gambar 9.4. Reaktor tipe fiber glass.....	140

Gambar 9.5. Mekanisme kerja reaktor biogas (<i>tipe fixed dome</i>)	142
Gambar 9.6. Langkah-langkah produksi metan untuk limbah organik	144
Gambar 10.1. Diagram C-H-O dalam Proses Gasifikasi.....	169
Gambar 10.2. Sirkulasi gas dalam jenis <i>fluidized bed gasifier</i>	171
Gambar 10.3. <i>Updraft Gasifier</i>	172
Gambar 10.4. <i>Downdraft gasifier</i>	173
Gambar 10.5. <i>Crossdraft gasifier</i>	174
Gambar 10.6. Model Gasifikasi Van Loon's	175
Gambar 10.7. Proses Gasifikasi limbah dalam Incinerator	180

BAB 1

BIOMASSA SEBAGAI ENERGY ALTERNATIVE TERBARUKAN

Oleh Khairiah

1.1 Pengertian dan Manfaat Biomassa

Biomassa adalah sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan organik seperti tumbuhan dan hewan. Sebagai sumber energi yang berkelanjutan, biomassa menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Selain itu, pemanfaatan biomassa dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperlambat laju perubahan iklim.

Produk berbasis biomassa, seperti arang, sekam padi, kayu, dan daun kering, dapat digunakan sebagai produk massal berkelanjutan atau sumber energi. Penghasilan energi yang diperoleh cukup tinggi dibandingkan dengan nilai aslinya.

Meskipun biomassa sering disebut sebagai energi hijau, pemanfaatannya tidak selalu bebas dari kontroversi. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai biomassa dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan sekaligus meningkatkan nilai tambah produk pertanian. Namun, di sisi lain, produksi biomassa dalam skala besar dapat menyebabkan deforestasi, erosi tanah, dan persaingan dalam penggunaan lahan.

1. Peningkatan jumlah penduduk dunia telah mengakibatkan peningkatan produksi limbah organik, seperti sisa makanan, limbah pertanian, dan limbah industri.

Untuk mengatasi masalah ini, pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi menawarkan solusi yang menjanjikan. Melalui proses seperti gasifikasi atau pirolisis, limbah organik dapat diubah menjadi gas dan cairan yang dapat digunakan untuk memperoleh listrik dan energi panas. Selain mengurangi volume limbah, pemanfaatan biomassa juga dapat menghasilkan pupuk organik yang bermanfaat bagi pertanian.

2. Meningkatkan kualitas udara

Apakah Anda percaya bahwa efek paling merugikan dari penggunaan bahan bakar fosil yang masih sebagian besar kita gunakan saat ini adalah penurunan kualitas udara? Mengingat kondisi udara saat ini cukup sulit untuk bernapas. Namun, karena biomassa tidak menghasilkan sulfur dioksida, kita masih dapat menikmati kebebasan untuk bernafas karena penggunaan energi.

3. Energi dengan potensi yang terus meningkat

Dengan siklus pertumbuhan tanaman yang terus-menerus, biomassa yang berasal dari kayu dan rumput dapat menjadi sumber energi yang tidak pernah habis, sehingga mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil yang terbatas. Maka dari itu, perlu diwaspadai dan dianjurkan untuk mengonsumsi buah-buahan dengan cara yang tepat. Karena proses fotosintesis terus berlangsung, tanaman akan terus tumbuh dan menghasilkan biomassa. Hal ini membuat energi biomassa menjadi sumber energi yang sangat menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar fosil yang semakin menipis dan menyebabkan kerusakan lingkungan

4. Biomassa memiliki keunggulan dalam menjaga keseimbangan karbon di atmosfer. Proses pertumbuhan tanaman melibatkan penyerapan karbon dioksida. Ketika biomassa dibakar, karbon ini dilepaskan kembali. Namun, dengan memastikan adanya penanaman kembali tanaman baru, jumlah karbon dioksida di atmosfer secara keseluruhan tidak bertambah. Berbeda dengan pembakaran bahan bakar fosil yang menambah jumlah karbon dioksida secara signifikan, penggunaan biomassa dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim.

5. Biomassa menawarkan fleksibilitas yang sangat besar sebagai sumber energi. Berbagai jenis bahan organik, seperti tanaman, limbah pertanian, dan limbah industri, dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk energi. Misalnya, biomassa dapat diolah menjadi biodiesel untuk menggerakkan kendaraan, biogas untuk menghasilkan listrik, atau panas untuk pemanas ruangan.

Fleksibilitas ini membuat biomassa menjadi sumber energi yang sangat menarik, terutama dalam konteks transisi menuju energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

6. Penggunaan biomassa sebagai sumber energi menawarkan keuntungan ekonomi yang signifikan. Dibandingkan dengan bahan bakar fosil yang memerlukan investasi besar dalam infrastruktur ekstraksi dan pengolahan, biomassa dapat dipanen dan diolah dengan biaya yang lebih rendah. Hal ini tidak hanya meningkatkan keuntungan bagi produsen energi, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan ekonomi lokal melalui penciptaan lapangan kerja dan peningkatan nilai tambah produk pertanian. Selain itu, penggunaan biomassa juga memiliki dampak positif terhadap lingkungan, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca dan pengelolaan limbah organik yang lebih baik.
7. Perbedaan antara sumber energi fosil dan non-fosil. Keuntungan utama dari biomassa adalah bahwa itu mendorong kita untuk menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama kita.

Diperkirakan bahwa keberadaan sumber energi alternatif ini akan berarti bahwa tidak akan ada lagi efek negatif pada harga energi, dan bahwa penggunaan energi masyarakat umum akan menurun.

1.2 Jenis Biomassa

Biomassa, yang merupakan sumber energi serbaguna, dapat berasal dari berbagai macam bahan organik. Mari kita lihat lebih dekat jenis-jenis biomassa berdasarkan bahan pembentuknya.

1. Biodiesel

Serbuk gergaji, yang biasanya dianggap sebagai limbah, ternyata memiliki potensi besar sebagai bahan baku biodiesel. Di Indonesia, industri biodiesel banyak memanfaatkan serbuk gergaji kayu, kelapa, dan limbah padat dari pabrik minyak sawit. Proses pembuatan biodiesel melibatkan reaksi kimia antara minyak nabati atau lemak hewan dengan alkohol.

Biodiesel merupakan alternatif yang menarik untuk bahan bakar diesel konvensional. Selain ramah lingkungan, biodiesel juga memiliki sifat yang menguntungkan seperti biodegradabilitas

tinggi, kandungan bahan organik yang cukup, dan potensi sebagai pelarut metana. Proses produksi biodiesel yang beragam juga memberikan fleksibilitas dalam pemanfaatan berbagai jenis sumber daya.

2. Biogas

Biogas dihasilkan melalui proses penguraian bahan organik seperti kotoran hewan, limbah pertanian, dan sampah organik dalam kondisi tanpa oksigen. Komponen utama biogas adalah metana, yang merupakan gas rumah kaca yang kuat. Namun, dengan memanfaatkan biogas sebagai sumber energi, kita dapat mengurangi emisi metana ke atmosfer dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, produksi biogas juga dapat menghasilkan pupuk organik yang bernilai tinggi bagi pertanian.

3. Bioetanol

Proses pembuatan bioetanol melibatkan fermentasi karbohidrat dalam tanaman menjadi gula, kemudian gula tersebut difermentasi oleh ragi menjadi etanol. Bioetanol dapat digunakan sebagai campuran dalam bensin untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan kualitas udara. Melalui proses fermentasi, tanaman seperti singkong, jagung, dan tebu dapat diubah menjadi bioetanol, sebuah bahan bakar cair yang dapat digunakan sebagai pengganti bensin. Selain ramah lingkungan, produksi bioetanol juga dapat membuka peluang usaha baru di sektor pertanian.

Dalam hal ini, bioetanol dapat digunakan baik diam maupun berisik untuk bahan baking. Dalam komponen rem kendaraan bermotor, bioetanol harus diganti secepat mungkin dengan Premium dalam prosedur pengujian yang relevan.

4. Biofuel

Jenis terakhir dari biomassa adalah biofuel. Salah satu cara untuk menggambarkan energi ini adalah sebagai bahan baku baru yang dikembangkan. Biofuel dapat secara luas didefinisikan sebagai bahan bakar yang berasal dari biomassa atau sebagai bahan berbasis karbon seperti batubara, minyak, atau gas. Di sisi lain, definisi yang lebih akurat adalah biofuel, yang merupakan jenis gas atau batubara yang digunakan sebagai bahan bakar

transportasi yang berasal dari biomassa. Biofuel dianggap sebagai bahan bakar pengganti yang berharga karena dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan penyimpanan energi.

Contoh Biomassa

Dengan melihat contoh-contoh konkret, kita akan lebih mudah memahami potensi biomassa sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan

1. Kotoran Manusia dan Hewan

Salah satu contoh biomassa yang telah digunakan secara luas adalah penggunaan limbah kotoran yang disebutkan di atas. Hasilnya disebut biogas. Energi dari terumbu karang ini sering digunakan sebagai sumber energi alternatif di rumah-rumah pantai, terutama bagi mereka yang dekat dengan industri yang bersebelahan.

2. Tanaman Penghasil Energi

Contoh kedua dari biomassa adalah energi dari tanaman. Apakah Anda percaya bahwa ada beberapa jenis pembangkit listrik yang tumbuh secara komersial dan secara khusus digunakan sebagai sumber energi? Jenis tomat ini termasuk jagung, rami, gandum, dan kedelai tomat. Tanaman yang disebutkan di atas ditanam pada skala besar dengan potensi untuk menghasilkan produk pertanian seperti biodiesel, butanol, propanol, dan etanol.

3. Limbah Pertanian

Limbah pertanian seperti jerami dan ampas tebu dapat difermentasi untuk menghasilkan biogas, yang kemudian dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk memasak atau menghasilkan listrik. Proses ini tidak hanya mengurangi volume limbah, tetapi juga menghasilkan pupuk organik yang bermanfaat bagi pertanian

4. Energi dari Kayu

Kayu, sebagai sumber energi biomassa yang berkelanjutan, telah dimanfaatkan manusia sejak zaman dahulu. Selain digunakan untuk memasak dan menghangatkan rumah, kayu juga menjadi bahan bakar utama dalam pembangkit listrik tenaga uap.

Prosesnya sederhana: kayu dibakar untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang kemudian menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik

Namun, jenis energi alternatif ini memiliki beberapa kelemahan, seperti kayu pembakaran dengan emisi karbon dioksida yang dapat menyebabkan efek gua. Tapi jangan khawatir, Anda juga dapat mengabaikan ini dengan belajar bagaimana untuk mengatakan lebih pohon. Hal ini memungkinkan untuk menghilangkan karbon dioksida dari atmosfer.

1.3 Urgensi Biomassa

Konsumsi energi di Indonesia masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil, yang menyebabkan secara bertahap menurun dibandingkan dengan energi yang baru diproduksi. Di Indonesia, energi diproduksi dengan cara yang relatif langsung dengan teknologi solar photovoltaic (PV), sedangkan sumber energi lainnya, seperti biomassa dan angin, cukup minimal.

Dalam kondisi ini, biomassa dapat menjadi salah satu pengganti utama bahan bakar fosil, seperti batubara dan gas. Banyak peneliti sedang melakukan penelitian tentang potensi biomassa Indonesia sebagai sumber energi baru. Biomassa adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan semua materi organik yang berasal dari tanaman, alga, dan bahan organik lainnya yang dapat diubah menjadi sumber energi alternatif menggunakan bahan baku terbarukan. Indonesia memiliki iklim tropis dan tanah subtropis, yang memungkinkan untuk memproduksi biomassa untuk jangka waktu yang lebih lama. Energi biomassa dapat menjadi solusi untuk bahan baku yang saat ini tidak dapat diandalkan dan merusak lingkungan.

1.4 Konversi Biomassa

Potensi biomassa di Indonesia yang dapat digunakan sebagai sumber energi cukup besar, yaitu 146,7 juta ton per tahun. Namun, potensi biomassa yang diperkirakan berasal dari limbah untuk tahun 2020 adalah sekitar 53,7 juta ton. Tumbuh adalah tumbuhan potensial untuk dimanfaatkan dan dikembangkan.

Limbah pertanian seperti kulit buah, batang tanaman, dan tongkol jagung yang selama ini dianggap sebagai sampah, ternyata memiliki potensi besar untuk diolah menjadi produk-produk yang bermanfaat, seperti serbet, kertas, atau bahkan bahan bakar. Dengan memanfaatkan limbah pertanian, kita tidak hanya mengurangi volume sampah, tetapi juga menciptakan peluang ekonomi baru dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas.

1. Limbah organik seperti sampah dapur dan sisa-sisa pertanian memiliki potensi besar untuk diubah menjadi energi melalui proses pengomposan atau biogas.
2. Selain menghasilkan energi, proses pengomposan juga menghasilkan pupuk organik yang bermanfaat bagi pertanian. Dengan demikian, pemanfaatan limbah organik tidak hanya mengurangi volume sampah, tetapi juga memberikan manfaat bagi lingkungan dan sektor pertanian.
3. Mengurangi kebutuhan untuk lokasi sampah imbunan karena ketersediaannya akan menjadi lebih terbatas, terutama di daerah pedesaan. Selain penggunaan praktisnya, biomassa juga menjadi habis sebagai produk utama untuk penyimpanan energi. Sawdust, jarak, dan kelapa sawit adalah beberapa jenis kedelai yang diproduksi khusus untuk digunakan sebagai bahan baku untuk biodiesel. Di sisi lain, ubi kayu, jagung, sorgum, dan sagu adalah spesies tanaman yang umumnya digunakan sebagai bahan baku untuk produksi bioetanol.

Menggunakan biomassa untuk menghasilkan panas dengan cara yang berkelanjutan, yaitu biomassa yang perlahan-lahan digoreng dan menghasilkan panas. Selain itu, data yang dikumpulkan akan dikonversi menjadi energi Listrik menggunakan generator dan turbin. Hasil pembakaran biomassa akan menghasilkan kapasitas boiler. Uap akan ditransfer ke dalam turbin untuk menghasilkan generator dan putaran. Turbin putaran diubah menjadi listrik energi menggunakan magnet di dalam generator. Agar dapat digunakan sebagai bahan bangunan, teknologi diperlukan untuk mengubah biomassa, di antaranya adalah beberapa jenis teknologi yang berbeda.

Ada perbedaan dalam alat yang digunakan untuk mengubah biomassa dan bahan baku yang diproduksi. Secara umum, teknologi yang mengubah biomassa menjadi bahan baku dapat dibagi menjadi tiga kategori. Pengimbaran utama, Langsung pembakaran merupakan teknologi yang sederhana, karena biomassa bisa terbakar secara langsung. Beberapa biomassa harus diidentifikasi secepat mungkin dan ditandai untuk penggunaan optimal. Konversi termokimiawi adalah teknologi yang membutuhkan operasi termal untuk mensimulasikan reaksi kimia yang mengakibatkan produksi bahan baku. Konversi Biokimiawi adalah teknologi konversi yang menggunakan katalis mikrobial untuk menghasilkan bahan baking.

1.5 Potensi Pengembangan

Penggunaan energi terbarukan dari minyak kelapa sebagai bahan bangunan di Indonesia secara konsisten menunjukkan peningkatan yang signifikan dari tahun ke tahun. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya populasi kelas buruh, perkantoran, jumlah besar produsen, dan industri yang secara signifikan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. (minyak bumi dan batu bara menurun setiap tahunnya). Penggunaan pupuk berbasis bahan bakar fosil perlu disesuaikan karena kekurangan mereka yang meningkat dan kebutuhan untuk waktu yang relatif lama untuk menyelesaikan proses pemurnian mereka - hingga satu tahun - untuk proses melakukannya.

Sebaliknya, menggunakan bahan bangunan berbasis bahan bakar fosil tidak selalu pilihan terbaik selama bulan-bulan musim dingin. Ini karena proses membersihkan bahan akan melepaskan karbon ke atmosfer, yang merupakan salah satu emisi gas rumah kaca utama. Jika bahan-bahan digunakan secara luas, ini dapat menyebabkan peningkatan tekanan atmosfer. Sebagai hasil dari situasi ini, para ilmuwan menemukan dan menciptakan bahan baku baru, yang berfungsi mirip dengan energi bahan bakar fosil tetapi memiliki kualitas lingkungan yang lebih kuat. Salah satu bentuk energi terbaru adalah biomassa, yang berasal dari tumbuhan dan hewan dan dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah, terutama di Indonesia. Hidrogen, Bio-Oil, biogas, alkohol, dan biodiesel adalah contoh dari biomassa. Biomassa didefinisikan sebagai sisa

material, atau limbah, dari setiap jenis proses produksi minyak. Limbah adalah bahan baku atau blok bangunan yang digunakan dalam proses pertanian.

Penggunaan biomassa sebagai sumber energi pengganti terhambat oleh proses panen / pemotongan lahan pertanian dengan cara yang mudah dimengerti dan kasar, yang pada akhirnya akan membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan sekitar. (pencemaran lingkungan). Energi alternatif berbasis biomassa memiliki potensi yang signifikan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil di masa depan. Namun, untuk melanjutkan dengan pengembangan sumber energi alternatif, harus dilakukan dengan hati-hati. Hal ini akan memastikan bahwa kemajuan sosial dan ekonomi masyarakat Indonesia bersifat konstruktif dan tidak memiliki dampak merugikan terhadap lingkungan.

Menggunakan limbah nabati (biomass) sebagai pengganti bahan baku dapat menghasilkan manfaat jangka panjang. Secara khusus, karena biomassa mengandung sejumlah besar energi, efisiensi energi meningkat dan tidak akan mudah rusak, menghemat uang. Hal ini karena nabati limbah sering lebih mudah dibuat daripada bahan-bahan lain, dan di daerah di mana perkotaan prevalen, kebutuhan untuk nabati limbah akan berkurang karena limbah nabati yang tersedia akan menjadi langka dan sulit.

Energi biomassa memiliki kelebihan, seperti dapat digunakan secara berkelanjutan karena sifat sumber daya terbarukan, meningkatkan efisiensi penggunaan sisa bahan tanaman dan tidak mengandung sulfur, yang menyebabkan udara polusi ketika digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Untuk memanfaatkan biomassa, ada beberapa teknologi yang tersedia untuk mengubah biomassa menjadi sumber energi. Hal ini dapat ditunjukkan dengan membandingkan berbagai alat yang digunakan untuk mengkonversi biomassa dan bahan baku yang dihasilkan. Ada tiga teknologi konversi biomassa umum: Progresi logis: biomassa secara bertahap disempurnakan dan standarisasi untuk aplikasi praktis. Konversi termal: Untuk menghasilkan bahan baku, panas harus diterapkan untuk menyebabkan reaksi kimia. Biokimiawi konversi: mikroba batuan terlengkap untuk menghasilkan bahan bakar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abimanyu, H., & Sunit, H. (2014), *Konversi Biomassa Untuk Alternatif Energi di Indonesia: Tinjauan Sumber Daya, Teknologi, Manajemen dan Kebijakan*, Jakarta, LIPI Press.
- Pendidikan D, (2020), *Energi Biomassa*, tersedia pada <https://www.dosenpendidikan.co.id/>
- Elyvani, (2015), *Konversi Energi Biomassa*, tersedia pada: <http://elyvani.blogspot.com/>
- Gioietta, K (2019), *When Fossil Fuels Run Out, What Then?* Tersediapada: <https://mahb.stanford.edu/libraryitem/fossil-fuels-run/>
- Larasati N H, (2020), *Pengertian Biomassa, Jenis, dan Manfaat dalam Kehidupan Sehari - hari*, Tersedia Pada: <https://www.diadona.id/d-stories/>
- M Syukri, (2018), *Strategi Perencanaan Pembangunan Pembangkit Listrik Berbasis Biomassa*, Tersedia Pada: https://www.academia.edu/Docu_ments/in/
- Nuswantoro, (2019), *Energi Terbarukan Indonesia, Berlimpah tetapi Masih Terabaikan*, tersedia pada: <https://www.mongabay.co.id/2019/12/29/energi-terbarukan-indonesia-berlimpahtetapi-masih-terabaikan/>
- L Parinduri, (2016), *Analisa Pemanfaatan Biomassa Pabrik Kelapa Sawit Untuk Sumber Pembangkit Listrik*, tersedia pada: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/jet/article/view/201/172>
- A Sugiyono dan A Nurrohim, (2020), *Prospect of Biomass Energy for Electricity Generation in Indonesia*, tersedia pada: <http://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JTE/article/view/617/465>
- M Zuhail, 2018, *Kekuatan Daya Saing Indonesia Mempersiapkan Masyarakat Berbasis Pengetahuan*, Penerbit Buku Kompas, Jakarta.

BAB 2

TEKNIK KONVERSI ENERGI BIOMASSA PADATAN

Oleh Ropiudin

2.1 Pendahuluan

Biomassa padatan adalah segala bentuk material organik yang berasal dari makhluk hidup (tumbuhan dan hewan) yang dapat digunakan sebagai sumber energi melalui berbagai proses konversi. Biomassa ini pada dasarnya mengandung energi kimia yang tersimpan dari proses fotosintesis, di mana tumbuhan mengubah energi matahari menjadi energi kimia yang disimpan dalam bentuk karbon dalam struktur biologisnya. Ketika biomassa dipanen dan diolah melalui berbagai metode, energi tersebut dapat dilepaskan dan digunakan sebagai energi panas, listrik, atau bahan bakar.

Biomassa padatan seperti kayu, limbah pertanian, limbah hutan, dan limbah organik lainnya, merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah. Konversi biomassa padatan menjadi energi adalah proses yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi dunia sambil mengurangi emisi gas rumah kaca.

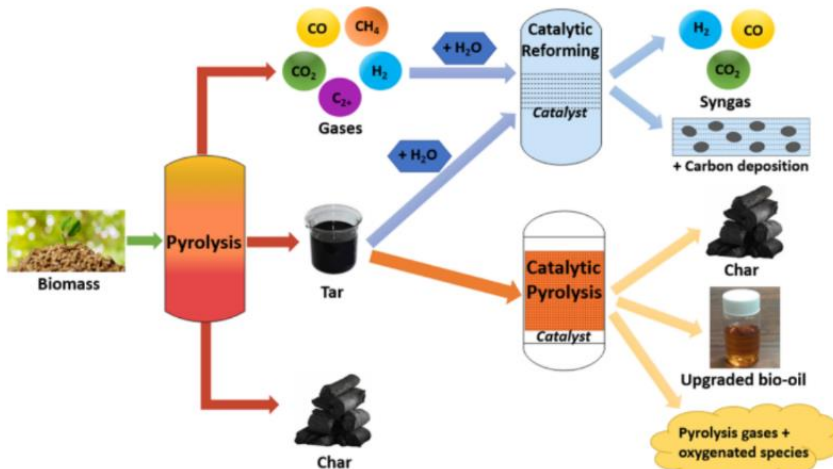
Pasokan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas alam akan habis dalam beberapa ratus tahun. Industrialisasi, urbanisasi, pertumbuhan populasi, dan kekhawatiran terhadap perubahan iklim telah menempatkan banyak negara dalam posisi krisis energi fosil. Negara-negara di dunia perlu mengambil langkah tegas untuk menyeimbangkan pembangunan ekonomi dengan keberlanjutan lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan sangat penting untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan yang berkelanjutan.

2.2 Metode Konversi Energi Biomassa Padatan

Konversi energi dari biomassa padatan dapat dilakukan melalui berbagai metode yang dikategorikan ke dalam dua jenis utama: konversi termokimia dan konversi biokimia.

2.2.1 Konversi Termokimia

Konversi termokimia adalah metode pemanfaatan energi biomassa padatan yang mengandalkan panas sebagai media utama untuk mengubah biomassa menjadi energi. Proses termokimia melibatkan pemanasan biomassa hingga suhu tertentu, dengan atau tanpa kehadiran oksigen, yang menyebabkan dekomposisi bahan organik menjadi energi. Ada tiga jenis utama proses konversi termokimia, yaitu pembakaran langsung, pirolisis, dan gasifikasi.



Gambar 2.1. Konversi termokimia pada biomassa

Pembakaran Langsung (*Combustion*)

Pembakaran langsung atau *combustion* adalah proses termokimia tertua dan paling sederhana dalam konversi energi dari biomassa. Proses ini melibatkan oksidasi biomassa dengan adanya udara (atau oksigen) untuk menghasilkan energi dalam bentuk panas. Panas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa dapat digunakan

langsung untuk pemanasan, memasak, atau digunakan dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap untuk menghasilkan listrik. Pembakaran biomassa secara langsung digunakan secara luas karena kemudahan teknologi dan biaya yang relatif rendah, namun proses ini memiliki tantangan efisiensi energi dan emisi polutan.

Pembakaran langsung melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu:

1. Pengeringan (*Drying*): Pada tahap awal, air yang terkandung dalam biomassa menguap. Pengeringan terjadi pada suhu sekitar 100°C hingga 200°C. Semakin rendah kandungan air dalam biomassa, semakin efisien proses pembakaran. Oleh karena itu, biomassa yang digunakan untuk pembakaran umumnya dikeringkan terlebih dahulu.
2. Pirolisis (*Pyrolysis*): Setelah proses pengeringan, biomassa mulai terurai pada suhu 200°C hingga 500°C melalui proses pirolisis. Dalam pirolisis, senyawa organik dipecah menjadi gas volatil, tar, dan char. Gas volatil akan terbakar lebih lanjut pada tahap pembakaran, sementara tar dan char dapat meninggalkan limbah.
3. Pembakaran Volatil (*Volatile Combustion*): Pada suhu sekitar 500°C hingga 1.000°C, gas-gas volatil yang dilepaskan selama pirolisis terbakar menghasilkan panas. Tahap ini merupakan sumber utama energi dalam proses pembakaran biomassa. Panas yang dihasilkan digunakan untuk aplikasi langsung atau untuk memanaskan air dalam sistem pembangkit uap.
4. Oksidasi Char (*Char Oxidation*): Setelah semua gas volatil terbakar, sisa padatan berupa char (karbon tereduksi) akan teroksidasi dengan adanya oksigen pada suhu tinggi. Proses ini menghasilkan panas tambahan, meskipun dengan intensitas lebih rendah dibandingkan pembakaran volatil.

Pirolisis

Pirolisis adalah metode konversi energi biomassa padatan yang melibatkan pemanasan biomassa dalam kondisi tanpa atau dengan sangat sedikit oksigen. Proses ini menyebabkan dekomposisi termal biomassa menjadi tiga produk utama, yaitu biochar (padatan), bio-oil (cairan), dan gas pirolisis (gas). Pirolisis terjadi pada suhu antara 300°C hingga 900°C, tergantung pada jenis biomassa dan produk yang diinginkan. Pirolisis memiliki potensi besar menghasilkan

bahan bakar alternatif dan bahan kimia berharga, serta memberikan kontribusi pada teknologi yang ramah lingkungan.

Pirolisis dilakukan dalam kondisi anaerob atau semi-anaerob, di mana biomassa dipanaskan tanpa kehadiran oksigen yang cukup untuk pembakaran lengkap. Proses ini menyebabkan senyawa organik dalam biomassa terurai menjadi bentuk yang lebih sederhana, yang terbagi menjadi tiga fase: padatan (biochar), cairan (bio-oil), dan gas (syngas) secara detail sebagai berikut:

1. **Biochar (Padatan):** Biochar adalah sisa karbon padat yang tersisa setelah pirolisis. Biochar mengandung karbon yang relatif stabil, yang tidak terdegradasi dengan cepat. Aplikasi: Biochar digunakan sebagai pupuk tanah untuk meningkatkan kesuburan, meningkatkan retensi air, dan menyimpan karbon untuk mengurangi emisi karbon. Biochar dapat digunakan sebagai bahan bakar padat atau bahan dalam industri.
2. **Bio-oil (Cairan):** Bio-oil adalah cairan kental dan kompleks yang terdiri dari campuran senyawa organik, termasuk air, asam organik, fenol, aldehyd, dan alkohol. Aplikasi: Bio-oil dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif, terutama untuk mesin pembakaran atau boiler. Selain itu, bio-oil juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam industri kimia untuk menghasilkan produk bernilai tinggi seperti resin, pelarut, dan bahan kimia lainnya.
3. **Gas Pirolisis (Gas):** Gas pirolisis atau syngas terdiri dari campuran gas yang sebagian besar terdiri dari karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2), metana (CH_4), dan hidrokarbon lainnya. Aplikasi: Gas pirolisis dapat dibakar untuk menghasilkan panas atau listrik. Gas ini juga dapat digunakan sebagai bahan baku untuk proses kimia lebih lanjut, seperti Fischer-Tropsch untuk menghasilkan bahan bakar cair.

Gasifikasi

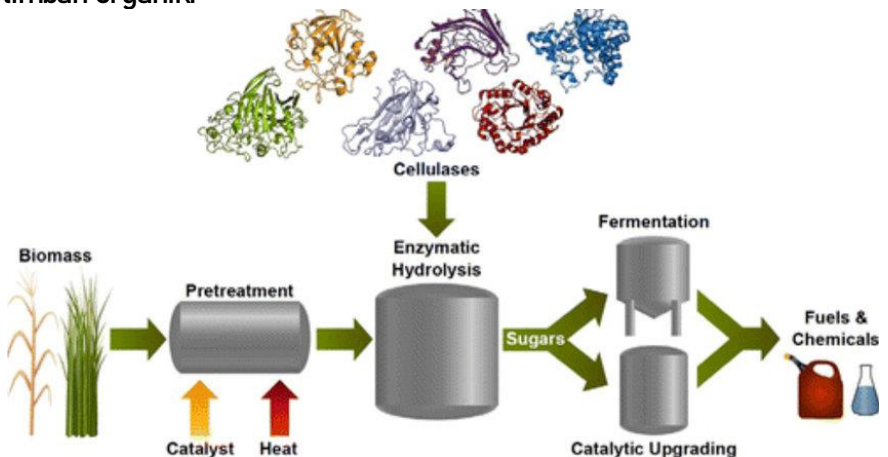
Gasifikasi adalah salah satu metode konversi termokimia yang bertujuan untuk mengubah biomassa padatan menjadi gas sintetis yang dikenal sebagai syngas (singkatan dari synthetic gas). Proses gasifikasi melibatkan pemanasan biomassa pada suhu tinggi (antara $700^{\circ}C$ hingga $1500^{\circ}C$) dengan jumlah oksigen atau uap air yang

terbatas. Gasifikasi menghasilkan syngas, yang terdiri dari campuran gas-gas utama, seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2), metana (CH_4), dan karbon dioksida (CO_2).

Syngas yang dihasilkan dari proses ini memiliki nilai kalor tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam pembangkit listrik, mesin, atau diolah lebih lanjut menjadi bahan bakar cair (melalui proses Fischer-Tropsch) dan bahan kimia berharga lainnya.

2.2.2 Konversi Biokimia

Metode biokimia melibatkan mikroorganisme atau enzim untuk menguraikan biomassa menjadi energi. Proses ini umumnya lebih lambat dibandingkan konversi termokimia, namun cocok untuk biomassa yang lebih lembut seperti limbah pertanian basah atau limbah organik.



Gambar 2.2. Konversi biokimia pada biomassa

Fermentasi Anaerobik

Fermentasi anaerobik adalah proses konversi biokimia yang menggunakan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen. Proses ini menghasilkan biogas, yang terutama terdiri dari metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik, panas, atau bahan bakar untuk kendaraan.

Fermentasi anaerobik biasanya diterapkan pada biomassa yang lembut atau memiliki kadar air tinggi, seperti limbah pertanian

basah, limbah organik rumah tangga, atau kotoran hewan. Sistem ini umum digunakan dalam skala besar pada instalasi pengolahan limbah dan di sektor pertanian untuk menangani limbah organik dan menghasilkan energi terbarukan.

Fermentasi anaerobik berlangsung dalam beberapa tahap yang melibatkan kelompok mikroorganisme yang berbeda, dengan peran spesifik dalam menguraikan biomassa menjadi biogas:

1. Hidrolisis: Tahap pertama adalah hidrolisis, di mana polimer organik yang kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lemak diuraikan menjadi molekul yang lebih sederhana seperti gula, asam amino, dan asam lemak. Enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme hidrolitik memecah struktur organik menjadi bentuk yang dapat digunakan dalam tahap berikutnya.
2. Asidogenesis: Produk hasil hidrolisis kemudian dikonversi oleh bakteri asidogenik menjadi asam organik seperti asam asetat, asam propionat, butirat, serta senyawa lain seperti hidrogen (H_2) dan karbon dioksida (CO_2). Asidogenesis merupakan tahap pembentukan senyawa antara yang nantinya akan digunakan dalam proses metanogenesis.
3. Asetogenesis: Tahap asetogenesis melibatkan mikroorganisme asetogenik yang mengkonversi produk asidogenesis (seperti asam propionat dan butirat) menjadi asam asetat, CO_2 , dan H_2 . Asam asetat ini adalah prekursor penting dalam tahap pembentukan metana.
4. Metanogenesis: Pada tahap terakhir, mikroorganisme metanogen mengubah asam asetat, H_2 , dan CO_2 menjadi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Metanogenesis adalah tahap kritis dalam proses fermentasi anaerobik karena di sinilah biogas diproduksi. Mikroorganisme metanogen bekerja secara optimal dalam lingkungan tanpa oksigen dan suhu yang terkontrol.

Fermentasi Alkoholik

Fermentasi alkoholik adalah proses konversi biokimia yang menggunakan mikroorganisme, terutama ragi (yeast), untuk mengubah biomassa yang kaya gula atau pati menjadi etanol (C_2H_5OH), yang dikenal juga sebagai bioethanol. Proses ini sering digunakan pada biomassa yang mengandung gula alami atau pati yang

dapat dihidrolisis menjadi gula, seperti jagung, singkong, tebu, dan gandum. Bioethanol yang dihasilkan dari fermentasi ini dapat digunakan sebagai bahan bakar bio, yang dapat dicampur dengan bensin untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Proses fermentasi alkoholik melibatkan beberapa tahap kunci:

1. **Persiapan Biomassa (Pretreatment):** Biomassa yang mengandung pati, seperti jagung atau singkong, harus melalui proses hidrolisis terlebih dahulu. Pati diubah menjadi gula sederhana (glukosa) menggunakan enzim amilase. Biomassa yang mengandung gula langsung, seperti tebu atau buah-buahan, bisa langsung digunakan tanpa proses hidrolisis.
2. **Fermentasi:** Setelah gula tersedia dalam bentuk sederhana, mikroorganisme ragi, seperti *Saccharomyces cerevisiae*, digunakan untuk memfermentasi gula menjadi etanol dan karbon dioksida (CO_2).
3. **Distilasi:** Setelah proses fermentasi selesai, etanol yang dihasilkan biasanya bercampur dengan air dan senyawa organik lainnya. Untuk memurnikan etanol hingga tingkat yang bisa digunakan sebagai bahan bakar, dilakukan proses distilasi, yang memisahkan etanol dari campuran dengan cara pemanasan dan penguapan.
4. **Dehidrasi:** Bioethanol yang diperoleh dari distilasi biasanya memiliki kadar air sekitar 5-10%. Agar bisa digunakan sebagai bahan bakar bio yang efisien, etanol perlu melalui tahap dehidrasi untuk menghilangkan sisa air, menghasilkan etanol dengan kemurnian lebih dari 99%.

2.3 Pemanfaatan Energi dari Biomassa Padatan

Setelah melalui proses konversi, energi dari biomassa padatan dapat dimanfaatkan dalam berbagai bentuk sesuai dengan kebutuhan. Beberapa bentuk pemanfaatan energi tersebut meliputi: pembangkit listrik berbasis biomassa, pemanasan dan pengeringan, dan produksi bahan bakar cair.

2.3.1 Pembangkit Listrik berbasis Biomassa

Pembangkit listrik berbasis biomassa adalah sistem pembangkit energi yang menggunakan biomassa padatan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik. Biomassa padatan yang digunakan bisa berupa limbah pertanian, kayu, atau biomassa hasil pengolahan industri. Proses pembangkit listrik berbasis biomassa memanfaatkan energi termal dari pembakaran biomassa atau gas hasil gasifikasi untuk menggerakkan turbin yang terhubung ke generator, sehingga listrik dapat diproduksi. Beberapa pembangkit listrik berbasis biomassa yang umum digunakan meliputi:

1. **Pembangkit Listrik Skala Kecil (CHP - Combined Heat and Power):** Merupakan pembangkit listrik skala kecil yang tidak hanya menghasilkan listrik, tetapi juga panas digunakan untuk keperluan lain seperti pemanas ruang atau proses industri. Sistem CHP ini digunakan di daerah yang memiliki sumber biomassa lokal dan kebutuhan energi termal yang signifikan.
2. **Pembangkit Listrik Berbasis Gasifikasi:** Teknologi gasifikasi digunakan untuk mengonversi biomassa menjadi syngas, yang kemudian dibakar dalam turbin gas untuk menghasilkan listrik. Gasifikasi menghasilkan lebih sedikit emisi dibandingkan pembakaran langsung dan sering kali lebih efisien dalam penggunaan bahan bakar.
3. **Pembangkit Listrik Termal Berbahan Bakar Campuran:** Beberapa pembangkit listrik menggunakan co-firing, di mana biomassa dicampur dengan bahan bakar fosil (seperti batu bara) dalam proses pembakaran. Ini memungkinkan pembangkit listrik konvensional untuk beralih ke bahan bakar yang lebih ramah lingkungan secara bertahap, tanpa harus mengubah seluruh infrastruktur pembangkit.

2.3.2 Pemanasan dan Pengeringan

Biomassa padatan memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi termal dalam proses pemanasan dan pengeringan, baik untuk keperluan domestik maupun industri. Penggunaan energi biomassa ini menawarkan alternatif ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil, sekaligus

membantu dalam pengelolaan limbah pertanian atau kehutanan yang seringkali tersedia secara melimpah di banyak wilayah.

Energi biomassa juga banyak digunakan dalam proses pengeringan, khususnya di sektor pertanian dan industri. Pengeringan berbasis biomassa dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasi, terutama di wilayah yang memiliki ketersediaan biomassa lokal yang melimpah. Berikut adalah beberapa penerapan pengeringan dengan memanfaatkan biomassa padatan:

1. **Pengeringan Bahan Pertanian:** Proses pengeringan sangat penting untuk pengawetan bahan pertanian, seperti biji-bijian (beras, jagung), rempah-rempah, kopi, dan produk hortikultura. Pengeringan dengan menggunakan energi biomassa mengandalkan panas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa padatan, seperti kayu bakar, sekam padi, atau limbah pertanian lainnya. Pengeringan ini biasanya dilakukan dalam sistem pengeringan langsung atau tidak langsung, di mana panas dari pembakaran biomassa digunakan untuk mengeringkan udara yang kemudian dialirkan ke bahan pertanian yang akan dikeringkan.
2. **Pengeringan Industri:** Di sektor industri, biomassa padatan digunakan untuk pengeringan bahan mentah atau produk setengah jadi dalam berbagai proses manufaktur. Industri kayu, misalnya, menggunakan tungku berbahan bakar biomassa untuk pengeringan kayu sebelum diolah lebih lanjut. Dalam industri pulp dan kertas, serbuk kayu sering digunakan sebagai bahan bakar untuk memanaskan udara yang digunakan dalam proses pengeringan kertas. Proses pengeringan industri lain yang sering memanfaatkan biomassa termasuk pengeringan makanan, bahan kimia, dan produk pertanian dalam skala besar. Penggunaan biomassa sebagai sumber energi dalam pengeringan ini memungkinkan efisiensi energi yang lebih tinggi dan pengurangan biaya operasional, terutama di wilayah yang memiliki limbah biomassa yang melimpah.
3. **Pengeringan Biji-Bijian:** Pengeringan biji-bijian, seperti padi dan jagung, biomassa padatan digunakan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan dalam proses pengeringan mekanis. Pengeringan gabah secara mekanis menggunakan udara panas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa untuk mengurangi kadar air biji-bijian

hingga tingkat yang aman untuk penyimpanan jangka panjang. Pengeringan ini penting untuk menghindari kerusakan akibat kapang, menjaga kualitas produk, dan mengurangi kehilangan pasca-panen.

4. Pengeringan Komoditas Hortikultura: Beberapa komoditas hortikultura seperti cabai, buah-buahan kering, dan rempah-rempah sering kali memerlukan pengeringan yang tepat untuk meningkatkan daya simpan dan mempertahankan kualitas produk. Penggunaan tungku biomassa untuk menghasilkan panas yang stabil pada pengeringan ini dapat membantu meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan dibandingkan dengan pengeringan yang hanya mengandalkan matahari.

2.3.3 Produksi Bahan Bakar Cair

Produksi bahan bakar cair dari biomassa padatan merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi yang semakin berkembang, terutama dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Bahan bakar cair yang dihasilkan dari biomassa padatan mencakup bio-oil yang diperoleh melalui proses pirolisis, serta bioetanol yang dihasilkan dari proses fermentasi. Kedua bahan bakar ini menghasilkan energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan dengan bahan bakar fosil, seperti bensin atau diesel. Terdapat dua metode utama dalam memproduksi bahan bakar cair dari biomassa padatan: pirolisis untuk produksi bio-oil dan fermentasi untuk produksi bioetanol.

Pirolisis untuk Produksi Bio-Oil

Pirolisis adalah proses termokimia yang melibatkan pemanasan biomassa pada suhu tinggi (300-900°C) dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan oksigen terbatas. Pada proses ini, biomassa padatan, seperti kayu, cangkang kelapa sawit, atau limbah pertanian lainnya, diuraikan menjadi tiga komponen utama: Bio-oil (cairan), Biochar (padatan karbon), dan Syngas (gas sintetis). Dari ketiga produk tersebut, bio-oil atau minyak pirolisis merupakan komponen cair yang bisa digunakan sebagai bahan bakar cair alternatif.

Fermentasi untuk Produksi Bioetanol

Fermentasi adalah proses biokimia yang memanfaatkan mikroorganisme, seperti ragi (yeast), untuk mengubah biomassa yang mengandung gula atau pati menjadi etanol. Bahan bakar cair yang dihasilkan dari proses fermentasi dikenal sebagai bioetanol. Proses ini umumnya melibatkan beberapa tahap utama:

1. Pemecahan Starch atau Gula: Biomassa yang mengandung pati atau gula, seperti jagung, singkong, tebu, atau ubi, dihidrolisis menjadi gula sederhana (glukosa).
2. Fermentasi: Ragi mengubah glukosa menjadi etanol melalui proses fermentasi anaerobik.
3. Distilasi: Etanol yang dihasilkan kemudian dipisahkan dari air dan senyawa lain melalui proses distilasi, menghasilkan bioetanol dengan kemurnian tinggi.

Tabel 2.1. Perbandingan antara bio-oil dan bioetanol

Aspek	Bio-Oil (Minyak Pirolisis)	Bioetanol
Proses Produksi	Pirolisis (termokimia)	Fermentasi (biokimia)
Bahan Baku	Biomassa padatan (kayu, limbah pertanian)	Biomassa kaya gula/pati (jagung, tebu)
Aplikasi	Boiler, pembangkit listrik, industri	Bahan bakar campuran untuk kendaraan
Kualitas Bahan Bakar	Kualitas rendah, butuh pengolahan lebih lanjut	Kualitas tinggi, dapat digunakan langsung
Emisi	Lebih tinggi (memerlukan kontrol emisi)	Lebih rendah (pembakaran lebih bersih)
Tantangan	Kandungan air tinggi, viskositas	Keterbatasan bahan baku non-makanan

2.4 Teknologi terkini dalam Konversi Energi Biomassa Padatan

Seiring perkembangan teknologi, konversi energi biomassa padatan semakin efisien dan ramah lingkungan. Beberapa teknologi terkini yang sedang dikembangkan meliputi: kogenerasi (), pengembangan biochar, dan teknologi peningkatan gas sintesis.

2.4.1 Kogenerasi (*Cogeneration*)

Kogenerasi juga dikenal sebagai *Combined Heat and Power* (CHP), adalah teknologi yang memungkinkan produksi listrik dan panas secara bersamaan dari satu sumber energi, dalam hal ini biomassa padatan. Teknologi ini memiliki keunggulan utama dalam efisiensi energi karena memanfaatkan panas yang biasanya terbuang dalam proses pembangkitan listrik konvensional. Dengan menggunakan sistem kogenerasi, efisiensi energi dapat mencapai 80% atau lebih, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan pembangkit listrik biasa yang umumnya hanya mencapai efisiensi sekitar 30-40%.

Pada dasarnya, sistem kogenerasi terdiri dari dua tahapan utama:

1. **Pembangkitan Listrik:** Proses dimulai dengan pembakaran biomassa (seperti serpihan kayu, pelet, atau limbah pertanian) untuk menghasilkan uap. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin yang menghasilkan listrik.
2. **Pemanfaatan Panas Sisa:** Setelah digunakan untuk menggerakkan turbin, panas sisa yang dihasilkan tidak dibuang begitu saja. Panas ini dapat digunakan untuk keperluan pemanasan (seperti pemanas ruangan), pemanasan air, atau proses industri lainnya. Penggunaan ini mengoptimalkan seluruh energi yang dihasilkan dari biomassa, yang dalam sistem pembangkit konvensional sering kali terbuang sebagai limbah panas ke lingkungan.

2.4.2 Pengembangan Biochar

Biochar adalah salah satu produk yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa, yaitu dekomposisi termal biomassa pada kondisi tanpa oksigen. Biochar berbentuk padatan yang kaya akan karbon, memiliki struktur berpori, dan stabil dalam jangka panjang. Teknologi ini semakin berkembang karena tidak hanya berfungsi sebagai

sumber energi, tetapi juga memiliki berbagai manfaat lain yang dapat membantu mitigasi perubahan iklim serta meningkatkan kesuburan tanah.

Biochar dihasilkan melalui proses pirolisis pada suhu sekitar 300–900°C. Pada suhu ini, biomassa seperti limbah kayu, limbah tanaman, atau limbah pertanian diuraikan menjadi tiga produk utama: Biochar (padatan karbon yang stabil), Bio-oil (minyak cair), dan Syngas (gas sintesis yang bisa digunakan sebagai bahan bakar).

Proses pirolisis ini dilakukan dalam kondisi minim oksigen, sehingga biomassa tidak mengalami pembakaran total, melainkan hanya sebagian yang terdekomposisi. Produk utama dari pirolisis ini, biochar, dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, baik sebagai bahan energi maupun dalam sektor pertanian.

2.4.3 Teknologi Peningkatan Gas Sintesis

Gas sintetis (syngas) adalah campuran utama dari karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄), yang dihasilkan dari proses gasifikasi biomassa. Gas ini dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik, transportasi, dan juga sebagai bahan baku dalam industri kimia. Namun demikian, kualitas syngas yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa sering kali memerlukan pemurnian dan peningkatan efisiensi agar bisa digunakan lebih optimal. Oleh karena itu, berbagai teknologi peningkatan gas sintetis sedang dikembangkan untuk menghasilkan syngas yang lebih murni dan kaya energi.

Gasifikasi biomassa melibatkan reaksi biomassa dengan oksigen atau uap air pada suhu tinggi (700–1500°C). Dalam proses ini, biomassa yang biasanya berupa limbah pertanian, limbah kehutanan, atau limbah industri diubah menjadi syngas melalui proses kimiawi yang melibatkan penguraian bahan organik. Produk akhir syngas dapat digunakan sebagai bahan bakar bersih atau bahan kimia dasar dalam industri, seperti produksi metanol, hidrogen, atau amonia.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A. and Watson, I., 2018. Biomass conversion technologies. In Greenhouse gas balances of bioenergy systems (pp. 107-139). Academic Press.
- Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A. and Watson, I., 2018. Biomass conversion technologies. In Greenhouse gas balances of bioenergy systems (pp. 107-139). Academic Press.
- Bajpai, P., 2019. Biomass to energy conversion technologies: the road to commercialization. Elsevier.
- Banerjee, N., 2023. Biomass to energy—an analysis of current technologies, prospects, and challenges. *BioEnergy Research*, 16(2), pp.683-716.
- Capareda, S., 2023. Introduction to biomass energy conversions. CRC press.
- Chen, H. and Wang, L., 2016. Technologies for biochemical conversion of biomass. Academic Press.
- Dahlquist, E. ed., 2013. Technologies for converting biomass to useful energy: combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation. CRC Press.
- Dayton, D.C. and Foust, T.D., 2019. Analytical methods for biomass characterization and conversion. Elsevier.
- De Jong, W. and van Ommen, J.R., 2014. Biomass as a sustainable energy source for the future: fundamentals of conversion processes. John Wiley & Sons.
- Kurchania, A.K., 2012. Biomass energy. In Biomass conversion: the interface of biotechnology, chemistry and materials science (pp. 91-122). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Pallath, N., Sajeena, T.A.M., Chemparathy, S.M. and Varghese, S., 2024. Biomass: Conversion, Utilization, and Environmental Impact. In Handbook of Advanced Biomass Materials for Environmental Remediation (pp. 13-29). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Pande, M. and Bhaskarwar, A.N., 2012. Biomass conversion to energy. In Biomass conversion: the interface of biotechnology, chemistry and materials science (pp. 1-90). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Pande, M. and Bhaskarwar, A.N., 2012. Biomass conversion to energy. In Biomass conversion: the interface of biotechnology, chemistry and materials science (pp. 1-90). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ropiudin, R. and Syska, K., 2023. Analisis Kualitas Biobriket Karbonisasi Limbah Bambu Dengan Perekat Tepung Singkong dan Tepung Nasi Aking. Jurnal Agritechno, pp.1-12.
- Ropiudin, R., Dwiasi, D.W., Sudarmaji, A. and Syska, K., 2023. Pelatihan Pembuatan Biobriket sebagai Sumber Energi Pengolahan Gula Kelapa Kristal pada UMKM Gula Kelapa Kristal Desa Sunyalangu Kabupaten Banyumas. Nanggroe: Jurnal Pengabdian Cendikia, 2(7), pp.10-19.
- Ropiudin, R., Syska, K., Budiman, A., Wijaya, K., Kuncoro, P.H., Sudarmaji, A., Sulisty, S.B., Budiya, F., Kurniawan, A. and Nurhayati, A.D., 2023. Sosialisasi pemanfaatan energi terbarukan pada pengolahan minuman fungsional kulit buah pala untuk pengembangan wilayah perdesaan. Nanggroe: Jurnal Pengabdian Cendikia, 2(4).
- Ropiudin, Rusman, Rachmanita, R.E., Budaraga, I.K., Rahmanto, D.E., Aprianto, M.C., Pramudibyo, S., & Prihandono, D.E. 2024. Teknologi Energi Terbarukan. CV Hei Publishing Indonesia.
- Saleh, T.A., 2024. A review on the technologies for converting biomass into carbon-based materials: sustainability and economy. Bioresource Technology Reports, p.101771.
- Singh, V., 2024. Energy resources. In Textbook of Environment and Ecology (pp. 185-206). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Vaz Jr, S. ed., 2016. Analytical techniques and methods for biomass. Springer.

BAB 3

TEKNOLOGI PROSES PEMBUATAN BIODIESEL

Oleh Pande Putu Indira Prima Dewi

3.1 Pendahuluan

Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar yang dijadikan sebagai alternatif minyak bumi karena bersifat ramah lingkungan. Biodiesel tidak mempengaruhi kesehatan ketika digunakan sebagai bahan bakar kendaraan yang dapat menurunkan emisi jika dibandingkan dengan minyak diesel. Biodiesel berasal dari bahan baku minyak nabati yang dapat diperbaharui. Biodiesel dibuat melalui suatu proses kimia yang disebut transesterifikasi dimana terjadi reaksi antara senyawa ester dengan senyawa alkohol (methanol). Pada proses ini akan menghasilkan dua product yaitu metal ester (biodiesel) dan gliserol (dapat dimanfaatkan dalam pembuatan product skincare) (Rahayu, 2008).

Biodiesel adalah campuran alkil ester asam lemak yang diperoleh dari transesterifikasi (pertukaran ester) minyak nabati dan lemak hewani. Bahan baku lipid ini terdiri dari 90-98% (berat) trigliserida dan sejumlah kecil mono dan digliserida, asam lemak bebas (umumnya 1-5%), dan sejumlah sisa fosfolipid, fosfatida, karoten, tokoferol, senyawa sulfur, dan jejak air. Dalam reaksi transesterifikasi, katalis homogen atau heterogen, asam atau basa biasanya digunakan untuk meningkatkan laju reaksi, meskipun untuk beberapa proses mungkin tidak perlu menggunakan katalis. Namun, biodiesel memiliki proporsi senyawa karbon berikatan banyak yang lebih tinggi yang lebih mudah terpirolisis dan mesin dapat mengalami kerak pada ruang bakar dan nozel injektor, gumming dan lengketnya cincin piston (Mata *et al*, 2015).

Biodiesel diproduksi melalui transesterifikasi dengan gliserol sebagai produk sampingan. Hasil lebih dari 90% dari minyak mentah dapat dicapai dengan kondisi konversi 35 - 60 ° C pada tekanan

atmosfer. Tekanan atmosferik, di mana rasio molar minyak terhadap alkohol adalah 3:1 - 6:1 (Peralta et al., 2010). Pada transesterifikasi asam dan basa, metanol dan katalis dicampur sebelum dipompa ke dalam tangki reaktor, jumlah metanol dan katalis dikontrol untuk menghindari jumlah yang berlebih, yang mengurangi kualitas produk akhir dan meningkatkan energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan kelebihan alkohol (Peralta *et al*, 2018).

Produksi biodiesel dapat dilakukan secara berkala dan berkelanjutan. Pendekatan jenis pertama umumnya dilakukan pada instalasi kecil, yang bekerja untuk satu atau beberapa kelompok petani. Jumlah biodiesel yang diperoleh dengan cara ini biasanya kurang dari 20 ribu ton per tahun, dan satu siklus periodik membutuhkan waktu 6 hingga 24 jam. Untuk mencapai pencampuran substrat yang memadai, reaktor khusus dengan mixer mekanis (baling-baling aksial) digunakan dalam prosesnya. Reaktor-reaktor tersebut diisi dengan minyak nabati dan campuran katalis dalam jumlah yang sesuai yang terdiri dari metanol dan katalis. Kemudian, selama sekitar 1 jam, campuran reaksi dicampur. Solusi yang diusulkan di sini diterapkan oleh banyak perusahaan yang menyediakan instalasi FAME (fatty acid methyl ester) (Lewandowski, 2013).

3.2 Teknik Produksi Biodiesel

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang dapat digunakan pada mesin diesel. Biodiesel mulai menjadi pusat perhatian di Amerika Serikat setelah mencapai tingkat kesuksesan yang cukup besar di Eropa. Salah satu keuntungan biodiesel ini adalah bahan bakar yang paling terbarukan yang saat ini tersedia dan juga tidak beracun dan dapat terurai secara hayati. Selain itu dapat juga digunakan secara langsung disebagian besar mesin diesel tanpa memerlukan modifikasi mesin yang ekstensif (Athar *et al*, 2004). Biodiesel dapat diproduksi dengan menggunakan proses produksi yang berbeda. Proses produksi yang akan yang akan dikembangkan tergantung pada ketersediaan bahan baku (bahan baku) dan kemudahan aplikasi dari teknologi produksi yang tersedia. Metode produksi biodiesel yang dikaji dalam dibahas di bawah ini.

1. Proses Pirolisis

Kata "pirolisis" berasal dari kata *pyro* (yang dapat diartikan sebagai "api") dan *lysis* (yang diartikan sebagai "memisahkan"). Oleh karena itu, pirolisis dapat secara sederhana didefinisikan sebagai penguraian atau disintegrasi senyawa organik pada suhu yang sangat tinggi, dibantu dengan adanya katalis yang sesuai atau tidak adanya udara. Reaksi ini tidak dapat diubah yang melibatkan perubahan simultan dalam perilaku fisik dan kimia dari bahan yang digunakan untuk menghasilkan bahan lain yang berguna karena penerapan panas (Harold, 2013).

Bahan organik seperti lemak hewani, minyak nabati, alami trigliserida dapat dipirolisis (Lee *et al.*, 2013). Komponen cair dari lemak dan trigliserida yang dipirolisis meliputi biodiesel yang memiliki fungsi sebagai solar pada mesin diesel. Biodiesel memiliki angka setana, titik nyala, titik tuang, nilai kalor dan viskositas yang mirip dengan diesel minyak bumi (Masjuki *et al.*, 2013). Pirolisis bahan apa pun umumnya dianggap tidak ramah lingkungan karena karena pelepasan residu karbon yang tinggi, gas hijau dan kandungan abu yang melebihi jumlah yang diperoleh dari bahan bakar fosil. Selain itu, teknologi yang digunakan juga mahal. Hal-hal tersebut menghambat penerimaannya secara luas sebagai proses utama produksi bahan bakar nabati.

2. *Trans-esterification process*

Untuk meningkatkan volatilitas bahan bakar mesin dan mengurangi viskositasnya, lipid (minyak nabati atau lemak hewani) mengalami tranesterifikasi. Salah satu metode produksi biodiesel yang umum digunakan karena kemudahan dalam penggunaannya. Proses ini melibatkan reaksi reversibel antara trigliserida dari lipid dan alkohol berantai pendek (metanol, etanol, atau propanol), dengan adanya katalis yang sesuai untuk menghasilkan alkil ester asam lemak (biodiesel) dan gliserol (Ayoola *et al.*, 2017).

Proses ini juga dikenal sebagai alkoholisis (metanolisis, jika menggunakan metanol dan etanolisis, jika menggunakan etanol). Berdasarkan katalis yang digunakan, proses ini dapat disebut sebagai proses transesterifikasi yang dikatalisis oleh enzim,

trans-esterifikasi yang dikatalisis oleh asam, atau basa. Hal ini juga dapat dilihat sebagai proses reaksi homogen jika katalis yang digunakan dalam bentuk cair sebagai reagen yang terlibat. itu disebut proses reaksi heterogen jika katalis padat yang digunakan. Contoh katalis yang digunakan pada proses reaksi homogen adalah KOH, NaOH, CH₃ONa dan H₂SO₄ sedangkan contoh katalis yang dibutuhkan untuk reaksi heterogen adalah CaO, dan MgO (Conrad *et al.*, 2020).

3. Proses Produksi Biodiesel Mikroalga

Proses kimia ini melibatkan ekstraksi minyak atau lipid dari biomassa mikroalga. Kesulitan utama yang terkait dengan teknik ini adalah rendahnya hasil minyak atau lipid yang diekstraksi dari sel mikroalga, dan ini pada akhirnya mengakibatkan rendahnya hasil biodiesel yang ekonomis. Ekstraksi lipid dapat dilakukan melalui berbagai metode seperti pengepresan mekanis, ekstraksi pelarut, dan ekstraksi fluida superkritis. Lipid yang telah diekstraksi kemudian dapat diproses lebih lanjut menjadi produksi biodiesel melalui teknik yang berbeda seperti transesterifikasi. Hasil yang rendah dari minyak yang diekstraksi minyak yang diekstraksi dan tingginya biaya peralatan bioreaktor otomatis yang diperlukan untuk produksi biodiesel membuat teknik ini tidak digunakan sebagai teknik yang umum dilakukan (Conrad *et al.*, 2020).

Biodiesel diproduksi dari trigliserida asam lemak. Beberapa jenis minyak nabati lainnya, seperti bunga matahari, jagung, dan minyak zaitun, tersedia melimpah di banyak daerah, bersama dengan beberapa limbah, seperti minyak jelantah dan lemak hewani, yang menarik untuk produksi biodiesel (Adaileh *et al.*, 2012). Minyak jelantah adalah jenis minyak nabati yang merupakan sisa dari berbagai jenis minyak goreng, seperti minyak dari sayuran, jagung, dan lain-lain. Definisi minyak jelantah adalah minyak yang telah digunakan untuk menggoreng lebih dari dua atau tiga kali dan dikategorikan sebagai limbah karena dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan. Minyak jelantah banyak dijumpai pada kegiatan rumah tangga dan industri pengolahan makanan, seperti rumah makan dan restoran cepat saji.

Indonesia memiliki potensi yang tinggi untuk memanfaatkan minyak jelantah sebagai bahan baku produksi biodiesel. Konsumsi minyak jelantah di Indonesia relatif tinggi karena Uni Eropa memproduksi 22,7 juta ton, Amerika Serikat sekitar 16 juta ton, India 23 juta ton, dan Indonesia 18,422 juta ton. Sayangnya, hanya 18,5 persen yang dapat dikumpulkan sebagai bahan baku minyak jelantah. Keuntungannya, dari segi biaya produksi, lebih hemat 35%. Jika 1,2 juta kiloliter biodiesel yang berasal dari minyak CPO dialihkan ke minyak jelantah yang terkumpul, maka dapat menghemat sekitar Rp 4,2 triliun. pemanfaatan minyak jelantah dan pengolahannya menjadi biodiesel membutuhkan pengelolaan aliran material, aliran informasi, dan aliran uang yang terintegrasi. Semua aliran tersebut akan melibatkan pihak-pihak seperti konsumen minyak goreng, pengumpul jelantah, pengolah biodiesel, Pertamina, dan konsumen biodiesel. Masing-masing memiliki peran dan kepentingan yang berbeda. Hal ini juga perlu diperhatikan agar sistem rantai pasok biodiesel dapat diatasi dengan mempertimbangkan kepentingan semua pihak yang terlibat (Elfadina, 2021).

Di dalam reaktor, Trigliserida yang terkandung dalam minyak jelantah kemudian direaksikan dengan metanol 98% yang menyebabkan terjadinya reaksi transesterifikasi membentuk produk metil ester (Biodiesel) dan produk samping gliserin dengan konversi reaksi sebesar 97%. Selanjutnya produk metil ester, gliserin, air, FFA, NaOH dan metanol, serta trigliserida sisa dipisahkan dengan menggunakan dekanter dan kolom distilasi. Campuran produk Metil Ester yang keluar dari reaktor masuk ke dalam dekanter untuk dipisahkan dari gliserin. Gliserin, NaOH, dan air akan keluar sebagai produk under flow dan kemudian disimpan dalam tangki penampung. Sementara itu, metil ester yang masih mengandung FFA, trigliserida, dan sisa metanol dipisahkan dengan menggunakan kolom distilasi. Bahan yang memiliki titik didih lebih rendah akan menguap sebagai produk atas (Methanol dan trigliserida). Sedangkan produk metil ester dan FFA akan keluar sebagai produk bawah yang akan didinginkan terlebih dahulu, menggunakan cooler hingga suhunya kemudian dialirkan ke dalam tangki penampungan produk metil ester. Campuran metanol trigliserida kemudian dipisahkan dengan menggunakan kolom distilasi II untuk memurnikan metanol. Trigliserida yang

merupakan produk bawah dialirkan ke Waste Treatment Plant (WTP) (Saputro *et al.*, 2022).

3.3 *Economic assessment of biofuels*

Biaya produksi biofuel termasuk biaya bahan baku dari waktu ke waktu, ditambah biaya konversi yang diperkirakan, termasuk biaya sumber daya, bahan kimia dan enzim, biaya listrik, biaya operasi dan pemeliharaan, dikurangi nilai produk samping dari waktu ke waktu. Biaya produksi semua biofuel generasi pertama di Eropa dan negara lainnya sebagian besar disubsidi. Harga tanaman pangan yang lebih tinggi membuat biofuel generasi pertama lebih kompetitif. Sebagian produk bahan baku biofuel, seperti jagung di negara Eropa, permintaan yang meningkat dengan cepat mengakibatkan peningkatan harga. Dengan demikian, biofuel berasal dari bahan baku dengan biaya rendah. Biaya minimum diperkirakan untuk etanol jagung, sementara batas diperkirakan untuk biodiesel alga. Biaya modal per unit kapasitas produksi menurun seiring dengan peningkatan ukuran pabrik untuk pabrik yang relatif besar (Hari *et al.*, 2015).

Secara umum, penurunan biaya dianggap cukup untuk menutupi biaya biomassa yang meningkat akibat jarak transportasi rata-rata yang lebih panjang terkait dengan ukuran output yang lebih tinggi. Ekonomi yang berkembang lebih serius dalam proses termokimia daripada konversi biokimia tetapi keduanya menghadapi tantangan. Inisiatif bahan bakar nabati generasi pertama di Eropa lebih progresif meski masih menghadapi masalah kritis seperti kurangnya lahan pasokan dan efisiensi lingkungan yang moderat. Proses industri biodiesel generasi pertama dan kedua dilakukan di beberapa negara (Efroymson *et al.*, 2015).

Biaya pengolahan biomassa mendominasi kedua biodiesel alga dan *rapeseed*. Faktor penting termasuk produksi biomassa dari alga, pasokan karbon, panen, dan sumber air. Meskipun biaya tanah rendah untuk pengembangan biomassa alga, biaya infrastruktur dan pencampuran lebih tinggi. Namun, biaya daur ulang energi alga offset sebagian besar keuntungan. Di sisi biodiesel *rapeseed*, kenaikan biaya terbesar adalah efek harga makanan dan emisi GHG. Produksi

biomethane dari tiga sumber terpisah dianalisis. Diantara ketiganya, fraksi organik limbah padat kota adalah yang termurah, diikuti oleh limbah rumah tangga, rumput, dan lumpur. Harga bahan bakar transportasi bensin di pompa bensin, sementara lebih mahal, difokuskan pada biomethane yang diproduksi dari rumput dan lumpur. Biomethane, menghemat sekitar 85% emisi CO₂, lebih disukai daripada bahan bakar cair (Kumar *et al.*, 2013).

DAFTAR PUSTAKA

- Athar, M., & Zaidi, S. (2004). Biodiesel Production Technologies. In K. Shaine Tyson (Ed.), National Renewable Energy Laboratory (August 200, Issue July). National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.1002/9781119724957.ch8>.
- Ayoola, A. A., Hymore, K. F., Omonhinmin, C. A. (2017). Optimization of biodiesel production from selected waste oils using response surface methodology. *Biotechnology*, 16, 1–9.
- Adaileh WM, Alqdah KS. Performance of diesel engine fuelled by a biodiesel extracted from a waste cooking oil. *Energy Procedia* 2012;18:1317–1334.
- Conrad, O., Enameguono, O., Ayodeji, A., Evans, E. (2020). Utilization of moringa oleifera oil for biodiesel production: a systematic review. *AIMS Energy*, 8(1), 102–121.
- Elfadina E. Analisa minyak goreng bekas sebagai biodiesel. *Jurnal Teknik* 2021;2(1):21–27.
- Efroymson R.A., Dale V.H. (2015) Environmental indicators for sustainable production of algal biofuels, *Ecol. Indic.* 49, 1–13.
- Harold H. S. (2013). Chemistry of fossil fuels and biofuels. Cambridge University Press, New York. ISBN 978-0-521-11400.
- Hari T.K, Yaakob Z, Binitha N.N. (2015) Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42, 1234–1244.
- Kumar S., Shrestha P., Salam P.A. (2013) A review of biofuel policies in the major biofuel producing countries of ASEAN: Production, targets, policy drivers and impacts, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 822–836.
- Lewandowski, W. M., Januszewicz, K., Klugmann-radziemska, E., Ciunel, K., Produkcji, M., Ciek, B., Przyk, Y. C. H. N. A., & Biodiesla, A. (2013). Methods of Liquid Biofuel Production -. *Proceedings of ECOpole* 2013;7(2), 7(2), 10–13. [https://doi.org/10.2429/proc.2013.7\(2\)067](https://doi.org/10.2429/proc.2013.7(2)067).
- Lee S., Shah Y. T. (2013). Biofuels and bioenergy: processes and technologies. CRC Press, Taylor and Francis Group, 6000

Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL ISBN
978-1-4200-8955-4

- Mata, T. M., & Martins, A. A. (2015). Biodiesel Production Processes. Recent Progress in Chemical Engineering, August, 313–343.
- Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Mofijur, M. (2013). Biofuel: policy, standardization and recommendation for sustainable future energy supply. Energy Procedia, 42, 577–586.
- Peralta-Ruiz, Y., Obregon, L. G., & González-Delgado, Á. (2018). Design of biodiesel and bioethanol production process from microalgae biomass using exergy analysis methodology. Chemical Engineering Transactions, 70, 1045–1050. <https://doi.org/10.3303/CET1870175>.
- Rahayu, M. (2008). Teknologi Proses Produksi Biodiesel. Prospek Pengembangan Bio-Fuel Sebagai Substitusi Bahan Bakar Minyak TEKNOLOGI, 17–28.
- Saputro, E. A., Rizaldi, A., Simamora, T., Erliyanti, N. K., & Yogaswara, R. (2022). A Biodiesel Production Technology from Used Cooking Oil: A Review. IPTEK The Journal for Technology and Science, 33(1), 59. <https://doi.org/10.12962/j20882033.v33i1.11729>

BAB 4

PENGOLAHAN BIODIESEL DENGAN KATALIS

Oleh Ni Made Suaniti

4.1 Pendahuluan

Biodiesel merupakan bahan bakar mesin diesel dari lipida alami terbarukan atau sebagai bahan bakar nabati (BBN) yaitu bahan baku berupa lemak atau minyak dari tumbuh-tumbuhan atau nabati. Sebagian besar tanaman Indonesia berpotensi sebagai sumber minyak seperti minyak kelapa dan minyak kelapa, dan minyak kedelai. Salah satunya metode pembuatan minyak kelapa dapat diperoleh secara konvensional dengan cara pemanasan, saat ini telah berkembang melalui cara enzimatik yang dikenal sebagai minyak kelapa murni atau Virgin Coconut Oil atau VCO yang telah dipublikasikan analisis dengan dan tanpa penambahan antioksidan (Sanjiwani *et al.*, 2015; Suaniti *et al.*, 2016; 2019; 2021a; 2021b). Minyak nabati hasil penggorengan berbagai pangan yang dikenal dengan minyak jelantah dapat sebagai bahan baku biodiesel dikarenakan mengandung asam lemak bebas yang tinggi. Kualitas minyak goreng terjadi perubahan akibat suhu pemanasan (Manurung *et al.*, 2018). Minyak nabati lainnya juga dapat digunakan sebagai bahan pembuatan biodiesel yaitu minyak jarak pagar, minyak nyamplung, dan minyak zaitun (Kunahyo *et al.*, 2013), saat ini dikenal sebagai energi BBN (Sudrajat, 2006, Richana, 2011). BBN cair paling luas digunakan karena fleksibel dan dikenal tiga jenis yaitu (a) bioetanol, berbahan dasar ubi kayu atau tetes tebu yang dipakai sebagai pencampur bensin atau gasohol; (b) bio-oil, produk konversi kayu atau lignoselulosa diubah menjadi bentuk cair melalui proses pirolisa eksplosif; (c) biodiesel, sebagai pencampur solar untuk mobil dan alat pertanian.

Secara kimiawi, biodiesel adalah monoalkil ester dari asam – asam lemak yang memiliki rantai karbon panjang sekitar 12–20 (Drapcho *et al.*, 2008), diperoleh melalui reaksi esterifikasi dan transesterifikasi asam-asam lemak dengan alkohol menggunakan katalis. Hasil biodiesel terdeteksi sebagai ester baik bentuk metil

maupun etil yang kedua senyawa ester (Hamelinck *et al.*, 2007; Suaniti *et al.*, 2020a; 2020b) ini relatif stabil dan berwujud cair pada suhu ruang dengan titik leleh antara 4-18°C, tidak-korosif, dan titik didihnya rendah (Knothe, 2006). Bahan bakar diesel (solar) memiliki kandungan sulfur dan nitrogen yang tinggi sehingga dapat menyebabkan hujan asam (Ambarita, 2002) sehingga upaya pembuatan bahan bakar alternatif ramah lingkungan telah dilakukan sebagai penelitian pendahuluan (Adnyana *et al.*, 2023).

Biodiesel menjadi penting dikembangkan di Indonesia karena sejak tahun 2005 Indonesia telah berubah statusnya dari eksportir menjadi *net importer* BBM dengan defisit sekitar 100 juta liter. Harga BBM meningkat seiring konsumsi meningkat, namun belum sejalan dengan persediaan bahan baku sehingga berdampak pada berbagai bidang kehidupan, pemakai minyak tanah, minyak residu, solar untuk PLN, Pertamina, dan industri (Sudrajat, 2006). Oleh karena tren ke depan konsumsi minyak dunia terus meningkat sesuai pertumbuhan penduduk tetapi cadangan menurun, diperlukan upaya mengolah limbah hasil penggorengan minyak kelapa agar dapat berdampak ekonomi di dalam negeri. Produksi BBN bisa dilakukan dalam skala kecil sehingga dapat lebih bertahan apabila negara mengalami guncangan ekonomi, salah satu penambahan katalis dalam pembuatan biodiesel terkarakterisasi sesuai mutu BBM serta memenuhi syarat Standar Nasional Indonesia (SNI).

4.2 Biodiesel Dan Standar Mutunya

Reaksi hidrolisis sebagai reaksi awal biodiesel yaitu suatu reaksi atau proses antara reaktan dan air sehingga senyawa dapat terurai. Contohnya adalah hidrolisis trigliserida menjadi tiga reaksi atau tiga tahap, pertama trigliserida dihidrolisis menjadi digliserida dan asam lemak bebas, kedua digliserida dihidrolisis menjadi monogliserida dan asam lemak bebas. Selanjutnya ketiga, monogliserida dihidrolisis menjadi gliserol dan asam lemak bebas (Micic *et al.*, 2015). Proses hidroesterifikasi dapat dilakukan secara hidroesterifikasi bebas katalis, hidroesterifikasi kimia, dan hidroesterifikasi secara enzimatik. Proses hidrolisis esterifikasi dapat digunakan untuk mengatasi masalah minyak nabati yang memiliki

persentase asam lemak bebas dan kandungan air yang tinggi (Pourzolfaghar *et al.*, 2016).

Jenis-jenis reaksi hidrolisis:

1. Hidrolisis murni yaitu reaktan penghidrolisis hanya menggunakan air. Kelemahan proses hidrolisis menggunakan air adalah proses hidrolisis terjadi secara lambat dan mendapatkan hasil yang kurang baik. Percepatan reaksi hidrolisis dengan air dapat digunakan alternatif dengan penambahan uap air bersuhu tinggi (Setyawadhani *et al.*, 2013). Reaksi hidrolisis minyak dengan air menghasilkan produk samping berupa gliserol. Hidrolisis dengan air dapat dilakukan pada suhu 240 – 260 °C pada tekanan 45 – 50 bar. Kondisi ini mampu menghasilkan derajat pemisahan hingga 99% (Maulida *et al.*, 2017).
2. Hidrolisis dengan katalis larutan asam (asam pekat atau encer). Asam yang dapat digunakan berupa asam sulfat (H_2SO_4) atau asam klorida (HCl). Asam sulfat memiliki harga yang relatif lebih mahal dibandingkan dengan asam klorida sehingga penggunaan asam klorida lebih disukai dan lebih reaktif dibandingkan dengan asam sulfat (Setyawadhani *et al.*, 2013).
3. Hidrolisis dengan katalis larutan basa (basa pekat atau encer). Penggunaan basa padat dalam proses reaksi umumnya hampir sama dengan basa pekat atau encer, namun penggunaan basa padat biasanya dipergunakan untuk peleburan benzene menjadi phenol (Setyawadhani *et al.*, 2013).
4. Hidrolisis dengan katalis enzim. Katalis enzim dihasilkan dari suatu mikroorganisme yang penggunaannya dapat digunakan dalam proses pembuatan alkohol dari tetes tebu oleh enzim (Setyawadhani, *et al.*, 2013).
5. Esterifikasi
Esterifikasi merupakan tahap konversi asam lemak bebas menjadi ester, kandungan asam lemak bebas tinggi atau lebih dari 5 mg-KOH/g dapat membentuk biodiesel.

Esterifikasi merupakan reaksi *reversible* dari asam lemak dengan suatu alkil alkohol membentuk ester dan air (Pratiwi *et al.*, 2022). Hasil samping berupa air dapat diatasi dengan penggunaan metanol berlebih dalam reaksi, air yang terbentuk saat reaksi terlarut

dalam metanol sehingga tidak akan menghambat proses reaksi (Suleman *et al.*, 2019). Alkohol yang digunakan dalam reaksi esterifikasi diberikan dalam jumlah berlebih untuk menggeser reaksi kearah produk. Kenaikan suhu pada esterifikasi asam lemak bebas dapat meningkatkan rendemen metil ester. Rendemen terbesar dapat diperoleh saat suhu reaksi mencapai 60 °C dengan jumlah katalis H₂SO₄ sebanyak 5 mL/liter (Yoel, 2020).

Katalis homogen memiliki kelemahan yaitu sulit dipisahkan dan membutuhkan biaya yang lebih mahal dalam pemurniannya serta katalis homogen tidak dapat digunakan berulang kali. Penggunaan katalis heterogen tentu lebih banyak disukai dikarenakan lebih mudah dipisahkan saat pemurnian dan dapat digunakan kembali (Fadhillah dan Sari, 2023). Katalis heterogen umumnya memiliki fase padat sedangkan reaktan memiliki fase cair atau gas. Katalis yang termasuk basa padat dapat berupa oksida logam, zeolit, material mesoporous, dan oxynitrida. Selain katalis basa padat, terdapat juga katalis asam padat, katalis asam padat merupakan katalis yang pada permukaannya terdapat gugus asam. Katalis asam padat (katalis heterogen) lebih ramah lingkungan dikarenakan mengurangi masalah korosif dibandingkan katalis asam homogen serta tidak dipengaruhi oleh konsentrasi asam lemak bebas didalam minyak. Katalis heterogen bersifat asam dapat diperoleh dari sulfonasi oksida logam dan sulfonasi karbon dari bahan-bahan organik. Keuntungan lain dari penggunaan katalis asam padat yakni dalam reaksi esterifikasi tidak akan membentuk reaksi penyabunan atau saponifikasi (Ikhsan dan Nizar, 2020).

Katalis heterogen (bersifat asam) berbasis karbon dapat digunakan karena dinilai lebih menguntungkan dari segi preparasi katalis yang lebih mudah, efektivitas tinggi, ramah lingkungan, dan biaya produksi murah (Sisca, 2018). Materi karbon dalam pembuatan katalis asam padat dapat berasal dari pati dan selulosa terkarbonasi yang akan membentuk suatu karbon polisiklik dalam struktur tetrahedral. Sulfonasi karbon dapat dilakukan untuk pembuatan katalis asam padat. Sulfonasi merupakan reaksi substitusi aromatik elektrofilik, atom hidrogen dalam hidrokarbon aromatik akan digantikan oleh gugus fungsional asam sulfonat. Sulfonasi juga merupakan proses memasukkan gugus *sulfonic acid* (-SO₂OH) atau

sulfonil halida ($-\text{SO}_2\text{Cl}$) terhadap bahan baku senyawa organik hidrokarbon (Manfaati *et al.*, 2015). Semakin banyaknya gugus sulfonat yang menempel pada permukaan suatu katalis maka aktivitas katalis yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Sulfonasi karbon dari karbonisasi bahan organik dapat dilakukan dari gula, pati, selulosa, dan lignoselulosa akan lebih menghasilkan padatan yang stabil (Ikhsan dan Nizar, 2020).

Di Indonesia, standar mutu biodiesel telah di bahas di tahun 2006 pada tingkat Departemen Energi, konsepnya disusun oleh Tim Forum Biodiesel Indonesia (FBI) yang dipimpin oleh Dr. Tatang Soerawidjaja. Standar Nasional Indonesia (SNI): 04-7182-2006 dibandingkan dengan standar biodiesel versi Eropa, Amerika Serikat, dan Indonesia (Tabel 4.1). Secara kimia biodiesel dibuat dengan serangkaian teknologi atau proses kimia yang berfungsi untuk mengubah suatu minyak menjadi biodiesel (Sudradjat, 2006).

Tabel 4.1. Nilai Beberapa Parameter Biodiesel menurut Standar Eropa, Amerika, dan Indonesia

No	Parameter	Eropa (EN 14214)	Amerika (ASTM D6751)	Indonesia (SNI:04-7182- 2006)
1	Massa jenis (densitas): 40°C, g/cm ³	0,86- 0,90	-	0,850-0,890
2	Viskositas: 40°C, mm ² /s (cSt)	3,5-5,0	1,9-6,0	2,3-6,0
3	Titik nyala (<i>flash point</i>), °C	Min 120	Min 130	Min 100
4	Angka asam, mg- KOH/g	-	Maks 0,8	Maks 0,8
5	Kadar Ester alkil, %-b	Min 96,5	-	Min 96,5

Sumber: Sudrajat, 2006; SNI

Beberapa pengertian parameter /sifat fisik /karakteristik Biodiesel sebagai berikut:

1. Massa jenis adalah perbandingan massa persatuan volume karakteristik yang berkaitan dengan nilai kalor dan daya yang dihasilkan oleh mesin diesel persatuan volume bahan bakar. Kerapatan suatu fluida dapat didefinisikan sebagai massa per satuan volume, yaitu: $\rho = m/v$ (4.1)

Dengan, ρ = rapat massa (g/cm^3)

m = massa (g)

v = volume (cm^3)

2. Viskositas adalah sifat intrinsik fluida yang menunjukkan resistensi fluida terhadap alirannya, karena adanya gesekan di dalam bagian cairan yang berpindah dari suatu tempat ke tempat yang lain yang mempengaruhi pengatoman bahan bakar dengan injeksi kepada ruang pembakaran, akibatnya terbentuk pengendapan pada mesin. Viskositas yang tinggi akan mengakibatkan kecepatan aliran akan lebih lambat sehingga proses derajat atomisasi bahan bakar akan terlambat pada ruang bakar. Untuk mengatasi hal ini perlu dilakukan proses kimia yaitu transesterifikasi untuk menurunkan nilai viskositas minyak nabati tersebut sampai mendekati viskositas solar. Viskositas ditentukan dengan SUS (*Saybolt Universal Seconds*) atau dengan persamaan $\mu = K \times t$ (4.2)

Dengan μ = viskositas (centi stokes/cSt)

K = Konstanta viscometer Ostwald

t = waktu mengalir fluida di dalam pipa viskometer (dt)

3. Titik Nyala (*Flash point*)

Titik nyala adalah uap dari bahan bakar dan udara akan terbakar dengan cepat bila didekatkan dengan nyala api. Titik bakar (*Pire point*) adalah suhu dari suatu bahan bakar bila didekatkan dengan nyala api akan terjadi nyala secara kontinyu minimal selama 5 menit. Titik nyala yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan keterlambatan penyalaan dan sebaliknya titik nyala terlalu rendah akan mengakibatkan timbulnya denotasi (ledakan kecil) yang terjadi sebelum bahan bakar masuk ruang bakar. Semakin

- tinggi titik nyala dari suatu bahan bakar semakin aman penanganan dan penyimpanannya.
4. Angka setana
Angka setan menyatakan sebagai skala patokan pengukuran kecendrungan bahan bakar untuk tidak berdetonasi pada motor diesel.
 5. Spesifik Gravity adalah densitas bahan bakar dibagi dengan densitas air pada suhu yang sama.
 6. Nilai Kalor merupakan jumlah energi yang terkandung di dalam suatu bahan bakar yang dinyatakan dalam satuan energi persatuan massa atau volume.

4.3 Reaksi Esterifikasi dan Transesterifikasi Biodiesel

Biodiesel merupakan suatu bahan bakar yang diproduksi dari minyak nabati senyawa ester alkil dengan alkohol yang dihasilkan dari proses transesterifikasi atau esterifikasi. Biodiesel memiliki sifat mudah terdegradasi (*biodegradable*), tidak mengandung senyawa aromatik, dan sulfur sehingga hal tersebut dapat menghasilkan emisi gas buang yang lebih sedikit dibandingkan dengan minyak solar. Bahan dasar yang digunakan untuk produksi biodiesel memiliki kualitas yang berbeda-beda dikarenakan asam lemak yang dikandungnya juga berbeda. Biodiesel yang telah diproduksi dilakukan karakterisasi seperti angka setana, bilangan iod, viskositas, bilangan asam, bilangan ester, dan kandungan gliserol (Suaniti *et al.*, 2020a; b). Karakterisasi biodiesel diantaranya indeks setana, viskositas, titik nyala hingga titik kabut. Indeks setana dari suatu biodiesel menunjukkan kemampuan dari bahan bakar motor diesel dapat menyala dengan sendirinya pada ruang bakar motor diesel. Viskositas merupakan angka kekentalan cairan dalam suatu biodiesel yang perlu dikarakterisasi dikarenakan viskositas mempengaruhi pelumasan, gesekan antar bagian yang bergerak dan menghindari terjadinya keausan mesin (Nurdyaningrum dan Nasrudin, 2013).

Biodiesel dapat diaplikasikan murni 100% (B100) atau campuran dengan minyak solar pada tingkat konsentrasi tertentu (Bxx), seperti 10% biodiesel dicampur dengan 90% solar yang dikenal

dengan nama B10. Dibandingkan dengan solar, biodiesel memiliki kelebihan diantaranya (Hambali *et al.*, 2007):

1. Bahan bakar ramah lingkungan karena menghasilkan emisi yang lebih baik
2. *Cetane number* lebih tinggi sehingga efisiensi pembakaran lebih baik dibandingkan dengan minyak kasar
3. Memiliki sifat pelumasan terhadap piston mesin
4. Dapat terurai (*biodegradable*)
5. Merupakan *renewable energy* karena terbuat dari bahan alam yang dapat diperbaharui
6. Meningkatkan independensi suplai bahan bakar karena dapat diproduksi secara lokal

Menurut Syah (2006), karakteristik emisi pembakaran biodiesel dibandingkan dengan solar adalah:

1. Emisi karbon dioksida (CO₂) netto berkurang 100%
2. Emisi sulfur dioksida berkurang 100%
3. Emisi debu berkurang 40-60%
4. Emisi karbon monoksida (CO) berkurang 10-50%
5. Emisi hidrokarbon berkurang 10-50%
6. Hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH = *polycyclic aromatic hydrocarbon*) berkurang, terutama PAH beracun seperti: phenanthren berkurang 98%, benzofloroanthen berkurang 56%, benzapyren berkurang 71%, serta aldehida dan senyawa aromatik berkurang 13%.

Emisi gas buang dari B20 sebesar 10 – 20% lebih rendah daripada minyak solar, sedangkan B30 berkisar antara 5 – 20% lebih rendah dibandingkan dengan B20. Biodiesel dapat diaplikasikan untuk mesin atau motor diesel yang berupa ester metil asam lemak (*fatty acid methyl ester*, FAME) yang diproduksi dari minyak nabati atau lemak hewani sesuai dengan standar mutu yang ditetapkan. Persyaratan mutu biodiesel secara spesifikasi teknik telah diatur dalam SK Dirjen EBTKE No. 189.K/10/DJE/2019. Biodiesel murni atau tanpa campuran biasanya disebut dengan B100 (biodiesel tanpa campuran minyak solar). Biodiesel (B100) memiliki karakteristik yang hampir sama dengan minyak solar, sehingga pencampuran antara

biodiesel dengan minyak solar diperbolehkan. Biodiesel memiliki manfaat sebagai pengganti minyak solar atau hanya sebagai pencampur minyak solar dengan perbandingan tertentu. B30 artinya bahwa terdapat campuran 30% biodiesel dan 70% minyak solar. Begitupun dengan B20 dapat diartikan sebagai campuran 20% biodiesel dan 80% minyak solar (Solikhah *et al.*, 2020). Standar mutu dan spesifikasi biodiesel serta solar berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Standar Mutu dan Spesifikasi Biodiesel di Indonesia Sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI)

No.	Parameter Uji	Satuan	Syarat Mutu
1	Massa jenis (40 °C)	Kg/m ³	850 – 890
2	Viskositas kinematik (40 °C)	cSt	2,3 – 6,0
3	Angka setana	Min	51
4	Titik nyala	°C, min	18
5	Temperatur distilasi 90%	°C, maks	360
6	Abu tersulfatkan	%-massa, maks	0,02
7	Gliserol bebas	%-massa, maks	0,02
8	Gliserol total	%-massa, maks	0,24
9	Kadar ester metil	%-massa, min	96,5
10	Angka iodium	%-massa (g-I ₂ /100 g), maks	115
11	Angka asam	Mg-KOH/g, maks	0,4
12	Kadar air	Mg/kg, maks	350
13	Total kontaminan	Mg/L, maks	20

(Sumber: Solikhah *et al.*, 2020)

Dilihat dari kedua standar mutu biodiesel dan minyak solar, keduanya memiliki sifat fisika yang hampir mirip. Oleh karena itu memungkinkan untuk biodiesel dan minyak solar dicampur. Sifat dan

karakteristik dari biodiesel dan minyak solar yang tertuang pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Perbedaan Sifat dan Karakteristik antara Biodiesel dan Minyak Solar

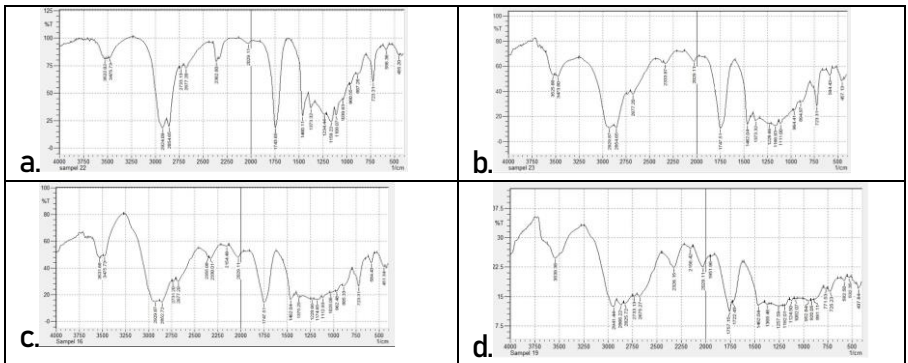
Biodiesel (B100)	Minyak Solar (B0)
Energi terbarukan yang diproduksi dari minyak nabati	Energi tidak terbarukan dari minyak bumi (fosil lainnya)
Mengandung campuran ester metil, asam-asam lemak jenuh, dan tidak jenuh	Mengandung senyawa hidrokarbon panjang ($C_{14}-C_{18}$)
Kandungan sulfur rendah	Kandungan sulfur tinggi
Mengandung oksigen (O_2)	Tidak ada oksigen (O_2)
Bersifat <i>biodegradable</i>	Sangat sulit terdegradasi
Kestabilan oksidasi sedang	Kestabilan oksidasi tinggi
Berpengaruh terhadap material karet alam dan dipengaruhi oleh logam (katalis oksidasi)	Lebih praktis, tidak berpengaruh terhadap karet alam dan tidak dipengaruhi oleh logam (katalis oksidasi)
Aman, titik nyala lebih tinggi	Titik nyala rendah sehingga harus disimpan dengan baik
Berat jenis lebih berat dari B0	Berat jenis relatif lebih ringan dari B100

(Sumber: Solikhah et al., 2020)

Kelebihan penggunaan biodiesel memiliki sifat diperbaharui atau renewable, mudah digunakan, lebih efisien, baik sebagai pengganti bahan bakar diesel karena kandungan sulfur rendah, dapat mengurangi emisi udara beracun, dapat didegradasi secara biologi, titik nyala cukup tinggi sehingga aman disimpan (Sudradjat, 2006).

Minyak yang memiliki kandungan asam lemak bebas rendah, dilakukan proses transesterifikasi sehingga dapat dibuat metil ester sedangkan kandungan asam lemak bebas tinggi harus melalui dua tahap yaitu tahap esterifikasi yang menggunakan katalis berupa asam dan tahap transesterifikasi menggunakan katalis berupa basa (Ambarita, 2002).

Biodiesel dapat dibuat melalui reaksi esterifikasi asam lemak bebas atau transesterifikasi trigliserida dari minyak nabati atau minyak kelapa murni dan minyak hasil penggorengan beberapa jam pada berbagai pangan direaksikan dengan alkohol menggunakan katalis basa sehingga diperoleh alkil ester. Pereaksi metanol akan diperoleh *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) sedangkan bila digunakan etanol akan diperoleh *Fatty Acid Ethyl Ester* (FAEE). Dugaan gugus fungsi ester seperti telah dipublikasikan, terlihat dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Spektra Fourier Transform Infrared FAME dan FAEE dari minyak jelantah hasil penggorengan ayam selama 7 jam dengan katalis asam sulfat dan asam sulfat toluena

Analisis gugus ester yang terbentuk dari hasil FAEE dan FAME ditunjukkan oleh spectra FT-IR dengan asam sulfat dan asam toluena sulfonat (Gambar 4.1). Hasilnya menunjukkan bahwa bilangan gelombang gugus ester adalah 3392 cm^{-1} yang diduga merupakan gugus CH_2 alkohol yang diperkuat dengan munculnya spektrum pada $1739,79\text{ cm}^{-1}$ adalah ester, C-C dari spektrum pada bilangan gelombang $1635,64\text{ cm}^{-1}$ dan CO 1165 cm^{-1} yang menurut literatur CO berkisar antara $900\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$. Fourier Transform Infra Red efektif dan sangat sederhana digunakan untuk menganalisis Fatty Acid Methyl Ester dalam biodiesel. Serapan kuat di sekitar bilangan gelombang ester adalah 1745 cm^{-1} sebagai ikatan karbonil ester pada bilangan gelombang dari daerah "sidik jari" diketahui di $1500\text{--}900\text{ cm}^{-1}$. Gugus ester yang umum digambarkan sebagai $\text{R}_1\text{-C=O (OR}_2\text{)}$ dalam minyak dan sebagai $\text{R}_1\text{-C=O (OCH}_3\text{)}$ dalam biodiesel. R_1 adalah rantai panjang

hidrokarbon seperti $-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$ dari asam palmitat, laurat, oleat dan asam linoleat tetapi R2 sebagai gugus alkil.

Biodiesel dapat dibentuk dengan deteksi gugus ester (COOR), ester muncul pada frekuensi sekitar 1750 dan 1300-1000 cm^{-1} . Intensitas yang kuat diperoleh sebagai Etil Asam Lemak. Ester pada kedua jenis katalis yang digunakan. Gugus aldehida juga muncul pada keempat spektra frekuensi di 2900-2700 cm^{-1} dengan intensitas yang lemah. Urutan intensitas terlemah adalah FAME_TS, FAME- H_2SO_4 , FAEES_TS dan FAEES- H_2SO_4 . Spektra katalis FAME Toluene Sulphuric acid menunjukkan intensitas yang lemah pada gelombang

Penentu kemurnian dalam suatu biodiesel yaitu kandungan metil ester dari biodiesel tersebut. Penyumbatan pada mesin disebabkan oleh senyawa monogliserida, digliserida, trigliserida, dan gliserol yang merupakan senyawa selain metil ester. Pengkaratan pada mesin dikarenakan adanya senyawa asam lemak bebas. Ketidaksempurnaan proses trans-esterifikasi dikarenakan di dalam biodiesel terdapat kandungan monogliserida, digliserida, trigliserida sehingga mengakibatkan hasil metil ester pada biodiesel tidak terbentuk sempurna (Knothe, 2006).

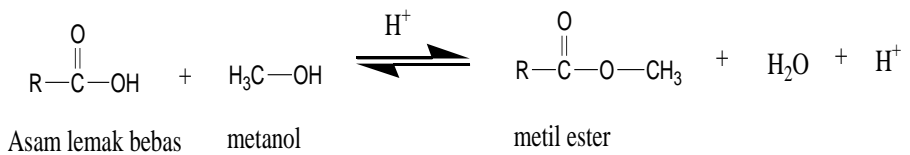
4.3.1 Esterifikasi

Esterifikasi merupakan reaksi kimia asam lemak bebas dengan alkohol yang menggunakan katalis yang bersifat asam sehingga membentuk metil ester dan molekul air. Reaksi esterifikasi ini bersifat reversibel (bolak-balik). Pada umumnya, reaksi esterifikasi menggunakan katalis asam seperti HCl , H_2SO_4 , dan H_3PO_4 (Drapcho *et al.*, 2008). Kecepatan reaksi esterifikasi lebih rendah dibandingkan dengan reaksi transesterifikasi yang menggunakan katalis basa (Haas *et al.*, 2005).

Dalam mendorong agar reaksi berlangsung secara sempurna pada suhu rendah (paling besar 120°C), produk samping berupa air harus dihilangkan dari fase minyak. Adapun reaksi esterifikasi suatu asam lemak dengan katalis asam dapat dilihat pada Gambar 4.2 (Drapcho *et al.*, 2008).

Reaksi esterifikasi merupakan reaksi endotermis (memerlukan panas), esterifikasi memerlukan bantuan katalis asam seperti asam sulfat (H_2SO_4), asam fosfat (H_3PO_4), dan asam sulfonat (-

SO₂OH). Katalis asam homogen memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi, namun sulit dipisahkan antara katalis dan produk (Imaduddin dan Samik, 2023). Hal tersebut dapat diatasi dengan penggunaan berupa katalis heterogen yang bersifat ramah lingkungan, tidak korosif, mudah dalam proses pemisahan dengan produk, dan katalis heterogen dapat digunakan berulang kali. Penggunaan katalis heterogen juga memiliki kelebihan seperti tidak terjadi saponifikasi melalui netralisasi asam lemak bebas (Rahman *et al.*, 2016).



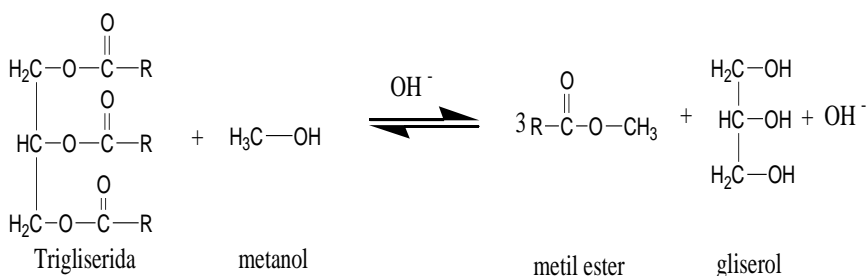
Gambar 4.2. Reaksi Esterifikasi

Pembuatan biodiesel dari minyak dengan kadar FFA tinggi, pada tahap esterifikasi FFA diubah menjadi senyawa metil ester, dilanjutkan dengan tahap transesterifikasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi esterifikasi antara lain (Ketta, 1978):

1. Waktu Reaksi
Semakin lama waktu reaksi maka terjadi kontak semakin kuat antara senyawa yang ada.
2. Pengadukan
Pengadukan semakin besar maka reaksi berlangsung semakin cepat dan sempurna akibat jumlah tumbukan molekul pereaksi dengan molekul zat terlarut bertambah.
3. Katalis
Pada reaksi, katalis memiliki fungsi sebagai pengurang energi aktivasi sehingga pada suhu tertentu semakin besar nilai konstanta suatu kecepatan reaksinya.
4. Suhu
Suhu reaksi yang tinggi maka produk yang dihasilkan semakin banyak sehingga reaksi berjalan lebih cepat dan produk reaksi semakin besar.

4.3.2 Transesterifikasi

Transesterifikasi merupakan reaksi antara senyawa trigliserida dengan alkohol yang menggunakan katalis basa seperti NaOH sehingga menghasilkan metil ester sebagai produk utama dan gliserol sebagai produk sampingnya. Adapun reaksi dari transesterifikasi diperlihatkan dalam Gambar 4.3 (Drapcho *et al.*, 2008):



Gambar 4.3. Reaksi Transesterifikasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi (Freedman, 1984):

1. Katalis
Katalis basa yang dapat digunakan untuk mempercepat reaksi transesterifikasi antara lain KOH, NaOH, KOCH₃, dan NaOCH₃.
2. Air
Pada proses transesterifikasi semua bahan yang digunakan tidak boleh ada air, untuk menghindari reaksi antara katalis dengan air.
3. Suhu
Suhu reaksi transesterifikasi saat menggunakan pereaksi metanol 60°C–70 °C karena titik didihnya adalah 30–65°C, diperlukan suhu yang tinggi sehingga perbandingan produk utama dan produk samping memiliki konversi yang meningkat.
4. Asam lemak bebas
Dalam proses transesterifikasi kandungan asam lemak bebas pada minyak nabati harus rendah yaitu lebih kecil dari 0,5%.

4.4 Alkohol

Alkohol yang lebih dikenal adalah etanol digunakan sebagai pereaksi, diproduksi dengan cara fermentasi menggunakan bahan baku nabati seperti ubi kayu, jagung, umbi-umbian, prinsipnya bahan yang mengandung gula (tebu, aren, palem) serta bahan berserat seperti jerami, sekam, tongkol jagung, baggas tebu, kulit kakao, dan kopi). Etanol selain diklasifikasikan berdasarkan bahan baku dan prosesnya juga berdasarkan kandungan airnya, sehingga ada etanol 95-96% dan etanol 99,5% (*anhydrous ethanol*) dengan kandungan air 0,05%. Selanjutnya etanol juga diklasifikasikan menurut pemanfaatannya, untuk industri sebagai pelarut, pembuatan vernis, minyak wangi, di laboratorium sebagai pelarut senyawa polar, di bidang kedokteran sebagai bahan baku pembuatan kloroform, dan iodoform (Richana, 2011). Untuk minuman beralkohol dengan kadar sesuai peraturan perundang-undangan Menteri Kesehatan RI Nomor 1516/A/SK/V/81 dan Nomor 86/Menkes/Per/IV/77. Penentuan kadar etanol dalam arak (sebagai minuman yang berasal dari tumbuh-tumbuhan) sebagai bagian kecil hasil produksi minuman beralkohol di Bali telah dilakukan terhadap dua jenis sampel arak yaitu arak enau dengan kadar 46,45 % (b/v) dan arak kelapa adalah 31,20% (Suaniti, 2009). Arak sebagai etanol golongan C mengandung alkohol 20 – 55%. Akhir-akhir ini etanol mulai diproduksi untuk bahan bakar (*fuel grade ethanol*) yang dikenal dengan nama *bioethanol* yang telah disusun oleh panitia teknis Energi Baru dan Terbarukan (PTEB) berdasarkan Standar Nasional Indonesia DT 27-0001-2006, tanggal 27 Desember 2006. Ciri khas etanol adalah berbentuk cairan, tidak berwarna dengan bau khas, dapat melarutkan zat organik, mudah menguap, titik didih 78°C, berat molekul 46,07; panas penguapan 204 kal/g, titik beku -144°C, panas pelarutan 24,9 kal/g, dan panas jenis 0,7939 g/mL (Richana, 2011).

4.5 Minyak Nabati

Minyak nabati adalah minyak tumbuhan yang dapat digunakan sebagai minyak goreng misalnya minyak goreng yang umum dari sawit dan minyak kelapa yang hasil penggorengan dikenal sebagai minyak jelantah. Minyak jelantah merupakan minyak goreng yang

telah digunakan berkali-kali untuk menggoreng. Penggunaan minyak goreng secara berulang, menurunkan kualitasnya sehingga berdampak pada penurunan kualitas bahan yang digoreng (Erna dan Wiwit, 2017). Minyak jelantah mengandung senyawa-senyawa karsinogenik yang apabila dikonsumsi secara berkelanjutan dapat menyebabkan kanker, pengendapan lemak dalam pembuluh darah, dan dapat mengurangi kecerdasan. Nilai peroksida minyak jelantah semakin tinggi seiring dengan meningkatnya frekuensi penggorengan minyak. Tingginya peroksida yang terkandung tentu sangat berbahaya bagi kesehatan apabila dikonsumsi. Minyak yang dipanaskan dengan suhu tinggi ($> 170\text{ }^{\circ}\text{C}$) secara berulang kali menyebabkan minyak mengalami proses oksidasi. Proses oksidasi pada minyak menyebabkan kandungan asam lemak tidak jenuh (cis) menjadi posisi trans (Alamsyah *et al.*, 2017).

Minyak jelantah merupakan limbah yang dalam pemanfaatannya secara tepat dapat meningkatkan nilai ekonomis sebagai bahan bakar terbarukan yaitu biodiesel. Kandungan trigliserida mengalami oksidasi dan terhidrolisis sehingga terpecah menjadi senyawa asam lemak bebas. Asam lemak bebas yang terkandung dapat direaksikan dengan metanol dengan bantuan katalis untuk memproduksi biodiesel (Ramadhani *et al.*, 2017). Minyak bekas pakai atau minyak jelantah masih mengandung senyawa yang sama dengan minyak kelapa yang belum dipakai, namun dengan kadar yang berbeda seperti Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Kandungan Asam Lemak Bebas dalam Minyak Goreng Sebelum dan Setelah dipakai untuk Proses Menggoreng

Asam Lemak Bebas	Konsentrasi (g/100 g)	
	Sebelum mengalami Proses Penggorengan	Setelah mengalami Proses penggorengan
Kaprilat	0,02	0,00
Laurat	0,17	0,14
Miristat	0,92	0,82
Palmitat	37,71	38,46
Stearat	3,76	4,00
Arakhidat	0,31	0,12

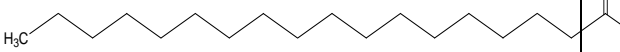
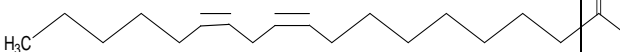
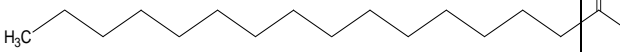
Asam Lemak Bebas	Konsentrasi (g/100 g)	
	Sebelum mengalami Proses Penggorengan	Setelah mengalami Proses penggorengan
Oleat	42,56	39,15
Linoleat	13,59	11,04
Eikosenat	0,00	0,14

Sumber: Taufik dan Seftiono, 2018)

Minyak goreng bekas merupakan minyak yang kadar asam lemak bebasnya meningkat akibat dari proses pemanasan yang terus menerus, sehingga proses pembuatan biodiesel dari minyak goreng bekas biasanya dilakukan melalui dua tahap proses yaitu esterifikasi dan transesterifikasi. Menurut Julianus (2006), tahap esterifikasi diperlukan untuk mengesterifikasi asam lemak bebas (FFA) dalam minyak bekas agar jumlahnya tidak terlalu banyak. Konsentrasi asam lemak bebas yang terlalu tinggi dapat mempersulit pemisahan gliserol dari produknya.

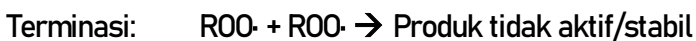
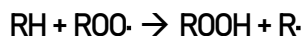
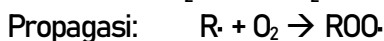
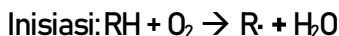
Minyak jelantah merupakan minyak yang digunakan kembali untuk keperluan kuliner (Raharjo, 2007). Komposisi asam lemak tak jenuh minyak jelantah sebesar 30% sedangkan asam lemak jenuh sebesar 70% (Kusuma, 2003). Adapun kandungan asam lemak dari minyak jelantah dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Kandungan dan Struktur Asam lemak pada Minyak Jelantah (Zappi *et al.*, 2003)

Asam lemak	Struktur
Asam stearate (asam lemak jenuh)	
Asam linoleat (asam lemak tak jenuh)	
Asam palmitat (asam lemak jenuh)	

Minyak hasil penggorengan secara berulang mengakibatkan pembentukan gugus peroksida (hidroperoksida) dan monomer siklik karena ikatan rangkap mengalami reaksi oksidasi. Kerusakan minyak goreng berawal dari pembentukan akrolein, bila dikonsumsi dapat memberikan efek pada tenggorokan yang diawali dengan rasa gatal. Akrolein merupakan aldehid tidak jenuh yang terbentuk dari dehidrasi gliserol. Akibat reaksi oksidasi dan minyak jelantah ini disimpan sehingga dapat menyebabkan ketengikan yang menimbulkan bau. Bau tengik dapat terjadi karena penyimpanan yang salah dalam jangka waktu tertentu mengakibatkan terurainya trigliserida sehingga terbentuknya gliserol dan asam lemak bebas (FFA) (Ketaren, 1986; Ingold, 1962).

Mekanisme oksidasi pada minyak diawali dengan tahap inisiasi membentuk radikal bebas ($R\cdot$) pada saat minyak terkena panas, cahaya, ion logam, dan oksigen. Tahap selanjutnya propagasi yaitu reaksi antara radikal bebas dengan oksigen menghasilkan radikal peroksida ($ROO\cdot$). Radikal peroksida bereaksi dengan ion hidrogen dari minyak membentuk hidroperoksida ($ROOH$) dan radikal bebas yang baru. Tahap terakhir terminasi yaitu reaksi antara sesama radikal bebas membentuk senyawa yang tidak aktif. Mekanisme oksidasi pada minyak dapat digambarkan pada Gambar 4.4 (Ingold, 1962):



Gambar 4.4. Mekanisme Reaksi Oksidasi pada Minyak

Keterangan :

$R\cdot$: radikal bebas

RH : hidrokarbon (minyak)

$ROO\cdot$: radikal peroksida

$ROOH$: hidroperoksida

Kerusakan minyak dan lemak karena oksidasi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu (Ingold, 1962):

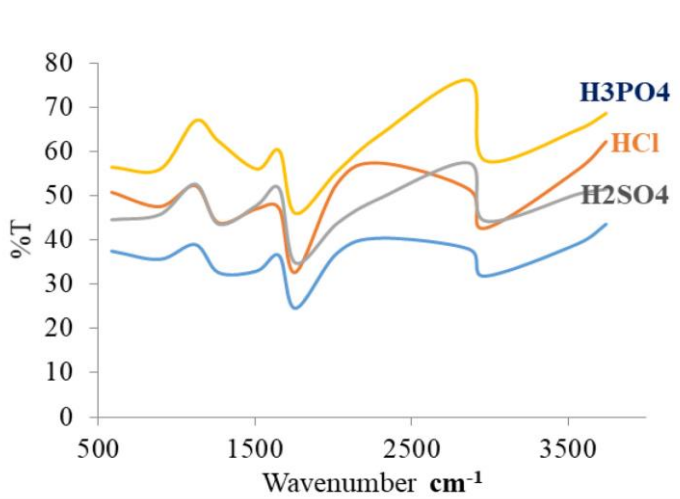
1. *Auto-oxidation*

Terjadi apabila lemak dan minyak terpapar udara pada suhu ruang dan proses oksidasi terjadi secara perlahan-lahan sehingga peroksida terakumulasi di dalam minyak dan lemak.

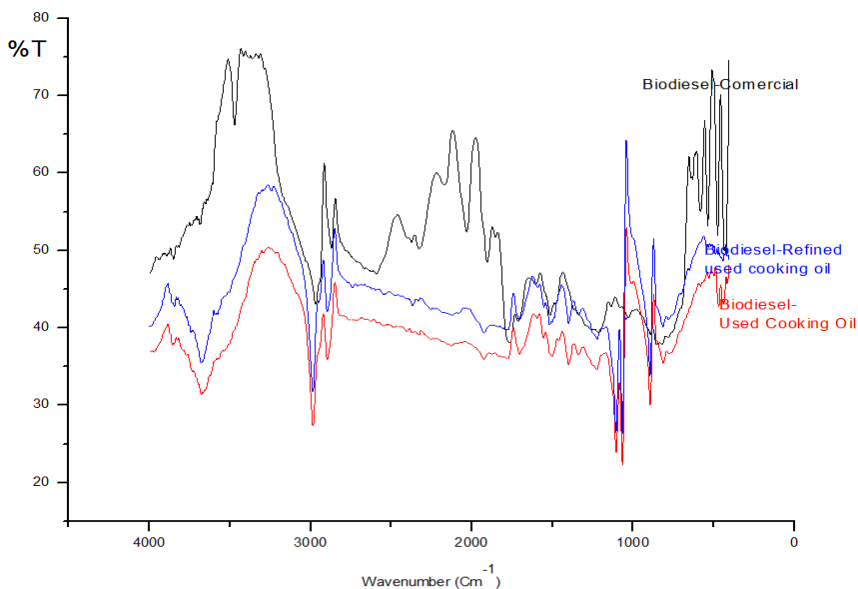
2. *Thermal oxidation*

Thermal oxidation adalah suatu fenomena dimana laju reaksi oksidasi meningkat pada lemak dan minyak karena suhu tinggi. Selain hidrogen peroksida juga terbentuk gugus karbonil seperti aldehid atau polimer sehingga kekentalannya meningkat. Stabilitas oksidasi sebagai parameter penting dapat mempengaruhi operasional mesin, baik jangka pendek maupun panjang. Kualitas biodiesel dengan standar stabilitas oksidasi EN 14112 adalah biodiesel yang diuji harus memiliki stabilitas oksidasi minimal 6 jam. Penggunaan biodiesel yang tidak memenuhi standar oksidasi, dalam jangka panjang dapat merusak elemen mesin, seperti injektor, tangki bahan bakar dan pada mesin (Knothe, 2005).

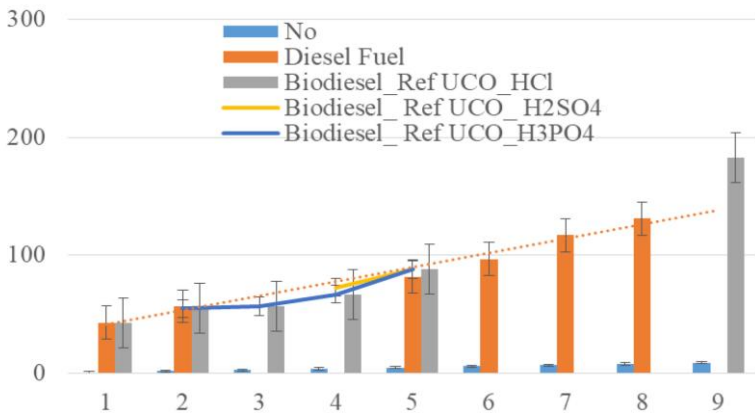
Spektrogram FTIR Biodiesel dari Minyak Jelantah yang Dimurnikan dengan Berbagai Asam dibandingkan dengan kontrol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan 4.6. serta secara GC-MS pada Gambar 4.7 dan Tabel 4.6.



Gambar 4.5. Spektra FTIR Biodiesel (Kontrol/komersial) warna biru dibandingkan dengan Biodiesel dari minyak jelantah yang Dimurnikan dengan HCl, H₂SO₄, dan H₃PO₄



Gambar 4.6. Spektrogram FTIR Minyak Goreng Komersial, Minyak Goreng Bekas, dan Minyak Goreng Bekas Olahan Minyak Biodiesel



Gambar 4.7. Fragmentasi (m/z) dan Intensitas Relatif dengan Spektrometri Massa Biodiesel dari Bahan Bakar Diesel Komersial dan Minyak Jelantah yang Dimurnikan Menggunakan HCl, H₂SO₄, dan H₃PO₄

Tabel 4.6. Fragmentasi berbagai biodiesel

Kinds of Diesel	Fragmentasi (mass/ion= m/z)
Diesel fuel	43, 57, 82, 97, 117, 131 (9,68 minutes)
Biodiesel Ref UCO HCl	43, 55, 57, 67, 88, 183 (28,16 minutes)
Biodiesel Ref UCO H ₂ SO ₄	73, 88 (13 Minutes)
Biodiesel Ref UCO H ₃ PO ₄	55, 57, 67, 88 (26,84 minutes)

Karakteristik biodiesel dari minyak jelantah yang dimurnikan menggunakan asam fosfat lebih unggul dibandingkan asam sulfat dan asam klorida. Enam puncak dengan fragmen m/z 88 sebagai penanda etil ester asam lemak dan dua puncak yang diidentifikasi sebagai etil linoleat dan etil oleat sebagai asam lemak tak jenuh yang ditandai oleh GC-MS. FTIR menunjukkan peningkatan intensitas pada bilangan gelombang 2500-1500 cm^{-1} adalah ikatan yang lemah. Gugus fungsi yang sama diidentifikasi oleh FTIR dari biodiesel yang berbeda biodiesel yang berbeda dengan intensitas yang lebih rendah dari bahan bakar diesel komersial. Etil ester asam lemak adalah termasuk dalam kelompok ester karboksilat dengan gugus C=O sebagai puncak yang paling khas.

Ester ester asam lemak diidentifikasi dengan GC-MS dalam biodiesel dari penyulingan minyak goreng bekas dengan fragmen ion m/z 88 sebagai karakteristik spesifik dari beberapa etil ester. Gugus

fungsi yang serupa diidentifikasi oleh FTIR dalam biodiesel dari pemurnian minyak goreng bekas diperoleh intensitas yang lebih rendah daripada bahan bakar diesel komersial

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyana, I W. B., Suaniti, N. M., Tjokorda Gde Tirta Nindhia, T. G. T. 2023, Refining Process of Used Cooking Oil Using Moringa Seed Powder to Improve Biodiesel Quality, *Eur. Chem. Bull.*, 12(10): 3550-3557.
- Alamsyah, M., Kalla, R., Ifa, L. 2017. Pemurnian Minyak Jelantah dengan Proses Adsorpsi. *Journal of Chemical Process Engineering*. 2(2): 22-26.
- Ambarita, M. T. D., 2002, Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas Untuk Produksi Metil Ester, *Tesis*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Drapcho, C. M., Nham, N. P. dan Walker, T. H. 2008. *Biofuels Engineering Process Technology*, McGraw-Hill Companies. America.
- Erna, N. S., Wiwit, P. W. S. 2017. Pengolahan Minyak Goreng Bekas (Jelantah) sebagai Pengganti Bahan Bakar Minyak Tanah (*Biofuel*) bagi Pedagang Gorengan di Sekitar FMIPA UNNES. *Rekayasa*. 15(2): 89-95.
- Kuncahyo, P., M. Fathallah, A. Z., Semin. 2013. Analisa Prediksi Potensi Bahan Baku Biodiesel sebagai Suplemen Bahan Bakar Motor Diesel di Indonesia. *Jurnal Teknik POMITS*. 2(1): 62-66.
- Manurung, M., Suaniti, N. M., Dharma Putra, K.G. 2018. Perubahan Kualitas Minyak Goreng akibat lamanya pemanasan. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*. 12(1): 59-63.
- Maulida, Kartika, T., Harahap, M. B., and Ginting, M. H. S. 2017. Utilization of mango seed starch in manufacture of bioplastic reinforced with microparticle clay using glycerol as plasticizer. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 309 (2018) 012068 doi:10.1088/1757-899X/309/1/012068. TALENTA-CEST.
- Micic, R. D., Tomic, M. D., Kiss, F. E., Emilika, B. N. D., Mirko, D. S. 2015. Optimization of Hydrolysis in Subcritical Water as a Pretreatment Step for Biodiesel Production by Esterification in Supercritical Methanol. *The Journal of Supercritical Fluids*, 103(1): 90-100.

- Nurdyaningrum, F. D., Nasrudin, H. 2013. Pemurnian dan Karakterisasi Biodiesel dari Minyak Biji Kelor (*Moringa oleifera*) dengan Menggunakan Adsorbent Bentonit. *UNESA Journal of Chemistry*. 2(1): 48-53.
- Pourzolfaghar, H., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., Aroua, M. K. 2016. A Review of The Enzymatic Hydroesterification Process for Biodiesel Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 61(1): 245-257.
- Pratiwi, S.W., Nurmallasari, R., Pinarti, I., Rahmi. 2022. Optimasi Jumlah Katalis Natrium Metoksi 5% pada Reaksi Transesterifikasi dalam Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah. *JAK-STABA*, 6(1): 19-24.
- Richana, N. 2011. Bioetanol. Bandung. Nuansa. 72 hal.
- Ramadhani, R. A., Riyadi, D. H. S., Triwibowo, B., Kusumaningtyas, R. D. 2017. Review Pemanfaatan Design Expert untuk Optimasi Komposisi Campuran Minyak Nabati sebagai Bahan Baku Sintesis Biodiesel. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, 1(1): 11-16.
- Sanjiwani, N. M. S., Suaniti, N. M., dan Rustini, N. L. 2015. Bilangan Peroksida, Bilangan Asam, dan Kadar FFA Biodiesel dengan Penambahan Antioksidan dari Kulit Buah Pisang Kepok (*Musa Paradisiaca* Linn.). *Jurnal Kimia*. 9 (2): 259-266.
- Setyawardhani, D. A., Distantina, S., Budiyanto, R., Swarte, W. 2013. Penggeseran Reaksi Keseimbangan Hidrolisis Minyak dengan Pengambilan Gliserol untuk Memperoleh Asam Lemak Jenuh dari Minyak Biji Karet. *Ekulibrium*. 12(2): 53-67.
- Suaniti, N. M., Adnyana, I W.B., Manurung, M., Hartasiwi N. 2016. Methyl Laurate Characterization From Enzymatic Esterification-Transesterification Process of Virgin Coconut Oil (VCO). *Materials Science Forum* 864: 77-80.
- Suaniti, N. M., Manurung, M., Ratnayani, O., Dewi, AAISJ. 2019. The Quality of Coconut Oil Prepared Using Heating Technique With Addition Of Carrot Powder (*Daucus Carrota* L) As Natural Antioxidant. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*. 13(1): 117-124.
- Suaniti, N. M., Adnyana, I W. B., Manurung, M., Fudholi, A. 2021a. Profile of ethyl esters of virgin coconut oil with enfleurage of

- cymbopogon nardus leaves, *International Journal of Pharmaceutical Research*, 13 (1): 2953-2959.
- Suaniti, N. M., Adnyana, I W. B., Manurung, M., Riyadi, T., Ariati, K. 2021b Technique Mixed Enzymatic Virgin Coconut Oil And Ethanol Extract Of Lemongrass Improving Antioxidant And Ester Content, *Nat. Volatiles & Essent. Oils* 8(6): 3932-3938.
- Sudrajat, (2006), *Mengelola Sampah Kota*, Jakarta: Penabar Suwadaya.
- Suaniti, N. M., Adnyana, I W. B., and Ratnayani, O. 2020a. Characterization and Identification of Fatty Acid Ethyl Esters from Refined Used Cooking Oil as Biodiesel by Using Spectroscopic Techniques Approach. *Key Engineering Materials* 877: 172-179.
- Suaniti, N. M., Adnyana, I W. B., and Nindhia, T. G. T. 2020b. Ester Group Detection of Biodiesel from Used Cooking Oil with Sulphuric and Toluene Sulphuric Acid Catalysts. *Key Engineering Materials* 2020; 877: 153-159.
- Suleman, N., Abas. Paputungan, M. 2019. Esterifikasi dan Transesterifikasi Stearin Sawit untuk Pembuatan Biodiesel. *Jurnal Teknik* 17(1): 66-77.
- Suaniti, NM. 2009. Perbedaan Kadar Etanol dalam Arak Enau dan Arak Kelapa Hasil Industri Rumah Tangga yang diproduksi di Bali dengan Kromatografi Gas. Seminar Nasional Kimia. Surabaya, 28 Juli 2009. Jurusan Kimia F.MIPA ITS.
- Hambali, Erliza, dan Hendroko, Roy. 2007. *Teknologi Bioenergi*, Jakarta: Agro Media Pustaka.
- Syah, A.N.A. 2006. *Mengenal Lebih Dekat Biodiesel Jarak Pagar Bahan Bakar Alternatif Yang Ramah Lingkungan*. Jakarta: Agromedia.
- Solikhah, M.D., Barus, B.R., Karuana, F., Wimada, A.R., Amri, K. 2020. *Pedoman Penanganan dan Penyimpangan Biodiesel dan Campuran Biodiesel (B30)*. Jakarta: Direktorat Bioenergi.
- Taufik, M., Seftiono, H. 2018. Karakteristik Fisik dan Kimia Minyak Goreng Sawit Hasil Proses Penggorengan dengan Metode Deep-Fat Frying. *Jurnal Teknologi*. 10(2):123-129.
- Ketaren, S., 1986, *Pengantar Teknologi Minyak dan Lemak Pangan*, Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- Julianus, 2006, *Optimasi Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah*. Makassar: Jurusan Teknik Kimia UKI Paulus.

- Ingold, K.U., 1962, Metal Catalysis, 93-121. Di dalam Schultz, H.W., Day, E. A. dan Sinnhuber, R. O., *Symposium on Foods: Lipid and Their Oxidation*, The AVI Publishing Co, Inc, Wesport, Connecticut.
- Knothe, G. 2006. Analyzing Biodiesel: Standards and other methods. *Journal American Oil Chemical Society*. 83 (10): 823-833.
- Hamelinck, C., Schober, S., Mittelbach, M., Verolet, J., dehue, B., 2007. Bioscopes Fatty acid Ethyl Ester. Ecofys. Uni Craz.
- Ikhsan, M. H, Nizar, U. K. 2020. Katalis Asam Padat Berbasis Karbon Tersulfonasi pada Proses Pembuatan Biodiesel. *Periodic*. 9(1): 51-54.
- Sisca, V. 2018. Application Solid Catalyst in Biodiesel Production. *Jurnal zarah*, 6(1): 30-38.
- Manfaati, R, Rahman, D. D., Widiati, N. S. 2015. Optimasi Sulfonating Agent H_2SO_4 dan Temperatur Operasi pada Sintesis Senyawa α -Naftalen Sulfonat. *Jurnal Fluida*, 11(2): 15-21.
- Rahman, E.D., Ulfah, M. Sari, E, Praputri, E. 2016. Esterifikasi Asam Lemak Bebas Minyak Biji Karet Menggunakan Katalis Alumina Tersulfatasi. *Seminar Nasional Teknik Kimia – Teknologi Oleo Petro Kimia Indonesia*.
- Fadhillah, G. N, Sari, D. A. 2023. Produksi Biodiesel yang Berbahan Baku Kelapa Sawit dengan Melibatkan Katalis Homogen dan Heterogen. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 37(2): 87-94.
- Freedman, B, Pryde, E.H, Mounts, T. L, 1984, *Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils*
- Ketta, Mc, J. J., 1978, Encyclopedia of Chemical Processing and Design, *Marcel Dekker*, 1
- Raharjo, S., 2007, Strategi menghindari kerusakan mutu produk pangan goreng, <http://www.hariskal.wordpress.com>, Diunduh tanggal 2 Maret 2014
- Zappi, M., Hernandez, M., Spark, D. J., Brough, M., 2003, *A Review of the Engineering Aspects of the Biodiesel Industry*, MSU Environmental Technology Research and Applications Laboratory Dave C, Swalm School of Chemical Engineering Mississippi State University, Mississippi.

Haas, M. J., 2005, Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: vegetable oil soapstock, *Journal Fuel Process Technol.* 86: 1087–1096

BAB 5

PENGOLAHAN BIODIESEL NON KATALIS

Oleh Andi Abdul Halik Lateko

5.1 Pendahuluan

Biodiesel adalah bahan bakar alternatif yang semakin populer sebagai pengganti bahan bakar fosil. Proses produksi biodiesel melibatkan reaksi transesterifikasi minyak nabati atau lemak dengan alkohol, menghasilkan metil ester (biodiesel) dan gliserin sebagai produk sampingan (Susila, I. W. 2009). Metode yang paling umum digunakan adalah dengan menggunakan katalis, baik asam maupun basa. Namun, dalam pengembangan teknologi, metode non-katalis juga menarik perhatian karena beberapa keunggulannya.

Metode katalis menggunakan asam atau basa sebagai katalis untuk mengubah minyak nabati menjadi biodiesel (Ruhaiya, F. dkk. 2020). Namun, metode ini memiliki beberapa kelemahan:

1. Waktu Produksi Lama: Proses transesterifikasi dengan katalis memerlukan waktu yang cukup lama.
2. Biaya Produksi Tinggi: Penggunaan katalis memerlukan bahan tambahan seperti magnesol sebagai absorban, yang meningkatkan biaya produksi.
3. Masalah Pencucian: Metode pencucian basah menggunakan air dapat merusak komponen mesin dan memerlukan proses tambahan.

Metode non-katalis, khususnya metode superheated methanol, dapat mengatasi kelemahan di atas (Ruhaiya, F. dkk. 2020). Dalam metode ini, transesterifikasi berlangsung pada temperatur tinggi dan tekanan atmosfer. Beberapa keunggulan metode non-katalis adalah:

1. Sederhana dan Cepat: Proses transesterifikasi langsung tanpa tahap pendahuluan seperti degumming, esterifikasi, atau pencucian.

2. Kualitas Biodiesel Lebih Baik: Densitas, angka setana, titik tuang, dan angka asam metode non-katalis lebih baik daripada metode katalis.
3. Spesifik dan Efisien: Reaksi dapat diarahkan secara spesifik tanpa reaksi samping yang tidak diinginkan.

Namun, perlu dicatat bahwa residu karbon mikro dalam biodiesel metode non-katalis masih perlu diperhatikan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan proses produksi biodiesel non-katalis.

Pengolahan biodiesel non-katalis merupakan pendekatan yang menarik dalam produksi biodiesel, terutama dari limbah minyak goreng (Heryani, H. 2018). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa meskipun penggunaan katalis seringkali lebih umum, metode non-katalis dapat memberikan alternatif yang efisien dan ramah lingkungan.

5.2 Teori Dasar Biodiesel

Biodiesel adalah bahan bakar yang terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani melalui proses transesterifikasi. Biodiesel dapat digunakan sebagai pengganti atau campuran bahan bakar diesel konvensional. Biodiesel memiliki beberapa karakteristik penting yang membuatnya menjadi alternatif bahan bakar yang menarik:

1. Biodegradabilitas: Biodiesel dapat terurai secara alami, mengurangi risiko pencemaran lingkungan.
2. Non-Toksik: Biodiesel memiliki tingkat toksisitas yang rendah dibandingkan dengan diesel konvensional.
3. Rendah Emisi: Penggunaan biodiesel dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya.
4. Renewable: Sumber daya bahan baku biodiesel dapat diperbarui, seperti tanaman minyak nabati dan limbah lemak hewani.

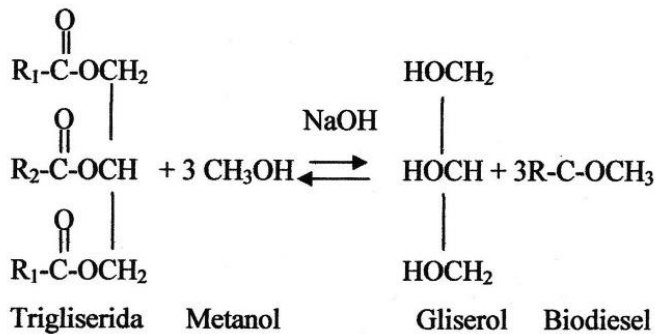
5.3 Proses Transesterifikasi

Transesterifikasi adalah reaksi kimia yang mengubah trigliserida (minyak dan lemak) menjadi metil ester (biodiesel) dan gliserol. Reaksi ini melibatkan pemecahan ikatan ester dalam

trigliserida dengan bantuan alkohol (biasanya metanol atau etanol) dan katalis (Oko, S. dan Syahrir, I. 2017).

Tahapan Proses Transesterifikasi:

1. Pencampuran: Minyak atau lemak dicampur dengan alkohol dan katalis (jika menggunakan katalis).
2. Reaksi: Campuran dipanaskan dan diaduk untuk mempercepat reaksi transesterifikasi.
3. Pemurnian: Setelah reaksi selesai, campuran dipisahkan menjadi biodiesel dan gliserol. Biodiesel kemudian dimurnikan melalui proses pencucian dan pengeringan.



Gambar 5.1. Proses Transesterifikasi

Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai jenis katalis, seperti basa (misalnya, natrium hidroksida), asam (misalnya, asam sulfat), atau enzimatik. Namun, dalam pengolahan non katalis, katalis tidak digunakan, sehingga prosesnya lebih ramah lingkungan dan dapat mengurangi biaya.

5.4 Sifat-Sifat Fisik dan Kimia Biodiesel

Biodiesel memiliki beberapa sifat fisik dan kimia yang penting yang mempengaruhi kinerja dan penggunaannya sebagai bahan bakar (Suresh, J. dkk. 2024).

Sifat Fisik:

1. **Kepadatan:** Biodiesel memiliki kepadatan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan diesel konvensional.
2. **Viskositas:** Biodiesel memiliki viskositas yang lebih tinggi, yang mempengaruhi karakteristik aliran dan penyemprotan dalam mesin diesel.
3. **Titik Nyala:** Biodiesel memiliki titik nyala yang lebih tinggi, menjadikannya lebih aman untuk penanganan dan penyimpanan.

Sifat Kimia:

1. **Komposisi Asam Lemak:** Komposisi asam lemak dalam biodiesel bervariasi tergantung pada sumber bahan baku, mempengaruhi sifat-sifat seperti titik beku dan stabilitas oksidasi.
2. **Stabilitas Oksidasi:** Biodiesel lebih rentan terhadap oksidasi dibandingkan dengan diesel konvensional, sehingga membutuhkan penambahan antioksidan untuk meningkatkan umur simpannya.

5.5 Prinsip Pengolahan Biodiesel Non Katalis

Pengolahan biodiesel non katalis merupakan proses konversi minyak nabati atau lemak hewani menjadi biodiesel tanpa menggunakan katalis kimia (Budiman, A dkk. 2018). Proses ini mengandalkan kondisi operasi ekstrim, seperti suhu dan tekanan tinggi, untuk memfasilitasi reaksi transesterifikasi.

Pada suhu dan tekanan tinggi, metanol atau etanol yang digunakan sebagai alkohol dalam reaksi transesterifikasi dapat mencapai kondisi superkritikal. Dalam kondisi ini, alkohol memiliki sifat seperti gas dan cairan, yang meningkatkan solubilitas minyak dan mempercepat reaksi transesterifikasi.

Beberapa faktor penting yang mempengaruhi efisiensi dan hasil proses pengolahan biodiesel non katalis meliputi:

1. **Suhu:** Suhu tinggi (biasanya di atas 240°C) diperlukan untuk mencapai kondisi superkritikal. Peningkatan suhu meningkatkan laju reaksi tetapi juga meningkatkan kebutuhan energi.

2. Tekanan: Tekanan tinggi (biasanya di atas 8 MPa) membantu menjaga alkohol dalam kondisi superkritikal. Tekanan tinggi juga meningkatkan kelarutan minyak dalam alkohol superkritikal.
3. Rasio Mol Alkohol terhadap Minyak: Rasio molar alkohol terhadap minyak yang tinggi diperlukan untuk memastikan konversi lengkap trigliserida menjadi biodiesel.
4. Waktu Reaksi: Waktu reaksi yang cukup diperlukan untuk mencapai konversi maksimum. Namun, waktu reaksi yang terlalu lama dapat mengakibatkan dekomposisi produk.

5.6 Bahan Baku untuk Biodiesel Non Katalis

Bahan baku utama untuk produksi biodiesel meliputi berbagai jenis minyak nabati dan lemak hewani (Pasae, Y. 2020). Pilihan bahan baku ini sangat mempengaruhi kualitas dan sifat biodiesel yang dihasilkan.

Minyak nabati adalah sumber utama untuk produksi biodiesel. Beberapa jenis minyak nabati yang umum digunakan meliputi:

1. Minyak Kelapa Sawit: Minyak kelapa sawit adalah salah satu bahan baku yang paling umum digunakan karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya produksi yang relatif rendah.
2. Minyak Kedelai: Minyak kedelai memiliki profil asam lemak yang baik untuk biodiesel, tetapi harganya cenderung lebih tinggi dibandingkan minyak kelapa sawit.
3. Minyak Biji Rapeseed: Minyak biji rapeseed, atau minyak kanola, juga digunakan secara luas, terutama di Eropa.
4. Minyak Biji Jarak: Minyak ini memiliki kandungan asam lemak tinggi yang cocok untuk biodiesel, tetapi produksinya terbatas.

Lemak hewani dapat digunakan sebagai bahan baku alternatif untuk biodiesel, terutama di daerah dengan produksi minyak nabati yang terbatas. Jenis-jenis lemak hewani yang umum digunakan meliputi:

1. Lemak Sapi: Lemak sapi, atau tallow, adalah sumber lemak hewani yang banyak tersedia dan dapat diolah menjadi biodiesel dengan kualitas baik.

2. Lemak Ayam: Lemak dari unggas, seperti ayam, merupakan sumber lemak yang cukup besar dan dapat digunakan dalam produksi biodiesel.

5.7 Metode Pengolahan Biodiesel Non Katalis

Superkritikal Metanol

Superkritikal metanol adalah salah satu metode utama dalam pengolahan biodiesel non katalis. Metode ini memanfaatkan metanol dalam kondisi superkritikal, di mana metanol berada pada suhu dan tekanan di atas titik kritisnya, sehingga memiliki sifat-sifat campuran antara gas dan cairan yang meningkatkan efisiensi reaksi transesterifikasi.

Pada kondisi superkritikal, metanol dapat melarutkan minyak dan lemak dengan sangat baik, yang memungkinkan reaksi transesterifikasi terjadi tanpa memerlukan katalis. Kondisi superkritikal metanol biasanya dicapai pada suhu sekitar 240–270°C dan tekanan 8–12 MPa.

Ultrasonikasi

Ultrasonikasi adalah metode yang menggunakan gelombang ultrasonik untuk meningkatkan laju reaksi transesterifikasi. Gelombang ultrasonik menciptakan kavitasi dalam campuran reaksi, yang menghasilkan mikrojet dan zona tekanan tinggi yang membantu memecah trigliserida menjadi metil ester dan gliserol.

Ultrasonikasi melibatkan penggunaan transduser ultrasonik untuk menghasilkan gelombang ultrasonik frekuensi tinggi dalam campuran reaksi. Kavitasi yang dihasilkan oleh gelombang ultrasonik meningkatkan kontak antara metanol dan minyak, mempercepat reaksi transesterifikasi.

Hidrotermal

Proses hidrotermal melibatkan penggunaan air pada suhu dan tekanan tinggi untuk mengkonversi minyak dan lemak menjadi biodiesel. Metode ini sering disebut sebagai proses hidrotermal karena melibatkan air dalam kondisi subkritis atau superkritis.

Dalam proses hidrotermal, air bertindak sebagai pelarut dan katalis untuk reaksi transesterifikasi. Suhu dan tekanan tinggi meningkatkan kelarutan minyak dalam air dan mempercepat reaksi. Kondisi subkritis biasanya berada pada suhu 200–300°C dan tekanan 5–15 MPa.

5.8 Penggunaan Biodiesel di Sektor Kelistrikan

Biodiesel memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik (Dharmawan, A. H. dkk. 2018). Penggunaannya dalam sektor kelistrikan dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, meningkatkan keberlanjutan energi, dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Penggunaan biodiesel sebagai bahan bakar pembangkit listrik menawarkan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Reduksi Emisi: Mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan partikel-partikel berbahaya lainnya.
2. Keberlanjutan: Sumber bahan baku terbarukan yang dapat diperoleh dari berbagai tanaman energi dan limbah.
3. Biodegradabilitas: Biodiesel dapat terurai secara alami, mengurangi risiko pencemaran lingkungan.

Tabel 5.1. Perbandingan Emisi antara Biodiesel dan Diesel Konvensional

Parameter	Diesel Konvensional	Biodiesel
CO ₂	Tinggi	Rendah
SO ₂	Tinggi	Rendah
Partikulat	Tinggi	Rendah
Biodegradabilitas	Rendah	Tinggi

Biodiesel dapat digunakan dalam berbagai jenis pembangkit listrik, termasuk:

1. Generator Diesel

Generator diesel yang menggunakan biodiesel sebagai bahan bakar dapat ditemukan di banyak aplikasi, termasuk pembangkit listrik skala kecil di daerah pedesaan dan lokasi terpencil.

2. Pembangkit Listrik Berbahan Bakar Campuran

Beberapa pembangkit listrik menggunakan campuran biodiesel dan diesel konvensional (misalnya B20) untuk meningkatkan keberlanjutan energi dan mengurangi emisi.

3. Microgrid dan Sistem Off-Grid

Biodiesel dapat digunakan dalam microgrid dan sistem off-grid untuk menyediakan listrik di daerah yang tidak terhubung dengan jaringan listrik utama. Ini membantu meningkatkan akses listrik di daerah terpencil.

5.9 Ringkasan dan Kesimpulan

Pengolahan biodiesel non katalis merupakan teknologi yang menjanjikan dalam menghasilkan bahan bakar terbarukan yang ramah lingkungan dan ekonomis. Dalam buku ini, kita telah membahas berbagai aspek dari produksi biodiesel non katalis, mulai dari prinsip dasar, bahan baku, metode pengolahan, hingga potensinya untuk digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Berikut adalah beberapa poin utama yang dapat disimpulkan:

1. Prinsip Dasar: Pengolahan biodiesel non katalis menghilangkan kebutuhan akan katalis kimia, yang mengurangi biaya dan kompleksitas pemurnian.
2. Bahan Baku: Berbagai jenis minyak nabati dan lemak hewani dapat digunakan sebagai bahan baku, dengan persiapan dan pengolahan awal yang tepat untuk memastikan kualitas produk akhir.
3. Metode Pengolahan: Metode superkritikal metanol, ultrasonikasi, dan hidrotermal adalah beberapa teknik utama yang digunakan dalam pengolahan biodiesel non katalis.
4. Biodiesel memiliki potensi besar sebagai bahan bakar pembangkit listrik, yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, meningkatkan keberlanjutan energi, dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiman, A. dkk. 2018. Biodiesel: Bahan Baku, Proses, dan Teknologi. Edisi Pertama. Yogyakarta: UGM Press.
- Dharmawan, A. H. dkk. 2018. Pengembangan Bioenergi di Indonesia. Brief Info No. 227.
- Heryani, H. 2018. Teknologi Produksi Biodiesel. Edisi Pertama. Banjarmasin: Universitas Lambung Mangkurat Press.
- Oko, S. dan Syahrir, I. 2017. Sistesis Biodiesel dari Minyak Sawit Menggunakan Katalis CaO Superbasa dari Pemanfaatan Limbah Cangkang Telur Ayam. Jurnal Teknologi Vol. 10 No. 2 pp 113-121.
- Pasae, Y. 2020. Biodiesel dari Asam Lemak Bercabang: Karakteristik, Bahan Baku & Teknologi Proses. Edisi Pertama, Makassar: Nas Media Pustaka.
- Ruhaiya, F. dkk. 2020. Jurnal Review: Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit pada Produksi Biodiesel dengan Katalis Heterogen CaO . Jurnal Teknik dan Teknologi Vol. 15 No. 30 pp 23-29.
- Suresh, J. dkk. 2024. Developments in Biodiesel: Feedstock, Production, and Properties. Edisi Pertama. UK: Royal Society of Chemistry.
- Susila, I. W. 2009. Pengembangan Proses Produksi Biodiesel Biji Karet Metode Non-Katalis "*Superheated Methanol*" pada Tekanan Atmosfer. Jurnal Teknik Mesin Vol. 11 No. 2 pp 115-123.

BAB 6

TEKNIK PENGOLAHAN BIOHIDROGEN

Oleh Wayan Budiarsa Suyasa

Biohidrogen merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Produksi biohidrogen secara biologis memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode konvensional, seperti kondisi operasi yang lebih ringan dan pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku.

6.1 Produksi Biohidrogen dengan Metode Fermentasi Gelap

Energi merupakan salah satu kebutuhan mendasar bagi kehidupan manusia. Dengan semakin menipisnya sumber energi fosil dan meningkatnya kesadaran akan dampak negatif penggunaan bahan bakar fosil terhadap lingkungan, penelitian dan pengembangan energi terbarukan menjadi sangat penting. Biohidrogen, sebagai salah satu bentuk energi terbarukan, telah menarik perhatian banyak peneliti karena potensinya yang besar sebagai sumber energi bersih. Biohidrogen dapat diproduksi melalui beberapa metode, salah satunya adalah fermentasi gelap. Artikel ini akan membahas secara mendalam tentang produksi biohidrogen menggunakan metode fermentasi gelap, mencakup mekanisme dasar, faktor-faktor yang mempengaruhi produksi, serta prospek dan tantangan dalam pengembangan teknologi ini. Fermentasi gelap merupakan salah satu metode utama dalam produksi biohidrogen. Proses ini melibatkan penguraian substrat organik oleh mikroorganisme anaerob dalam kondisi tanpa cahaya. Beberapa bakteri yang umum digunakan antara lain *Clostridium* dan *Enterobacter*. Kelebihan metode ini adalah kemampuannya menggunakan berbagai jenis limbah organik sebagai substrat, sehingga berpotensi mengurangi masalah lingkungan. Namun, tantangan utamanya adalah yield hidrogen yang relatif rendah dan terbentuknya produk samping yang tidak diinginkan (Hallenbeck, P. C., & Ghosh, 2009).

6.1.1 Mekanisme Dasar Fermentasi Gelap

Fermentasi gelap adalah proses biologis yang dilakukan oleh mikroorganisme anaerob untuk mengonversi bahan organik menjadi hidrogen dan asam organik tanpa adanya cahaya. Proses ini berbeda dengan fermentasi terang yang memerlukan cahaya untuk fotosintesis. Mikroorganisme yang sering digunakan dalam fermentasi gelap meliputi bakteri *Clostridium*, *Enterobacter*, dan *Escherichia coli*. Mekanisme dasar fermentasi gelap dapat dijelaskan melalui reaksi biokimia sebagai berikut:



Glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dipecah oleh mikroorganisme menjadi asam asetat (CH_3COOH), hidrogen (H_2), dan karbon dioksida (CO_2). Namun, produk sampingan seperti asam butirat, asam laktat, dan etanol juga dapat terbentuk tergantung pada kondisi operasional dan jenis mikroorganisme yang digunakan.

6.1.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Produksi Biohidrogen

1. Jenis Substrat

Substrat yang digunakan dalam fermentasi gelap sangat berpengaruh terhadap efisiensi produksi hidrogen. Substrat yang sering digunakan antara lain glukosa, limbah pertanian, dan limbah organik lainnya. Pemilihan substrat yang tepat dapat meningkatkan produksi hidrogen dan menurunkan biaya produksi.

2. Mikroorganisme

Pemilihan mikroorganisme yang efisien dalam memproduksi hidrogen sangat penting. Bakteri dari genus *Clostridium* adalah salah satu yang paling efektif karena kemampuannya untuk memproduksi hidrogen dalam kondisi anaerobik yang ketat. Selain itu, rekayasa genetika pada mikroorganisme juga dapat dilakukan untuk meningkatkan produksi hidrogen.

3. pH

pH merupakan faktor penting dalam fermentasi gelap. Sebagian besar mikroorganisme yang digunakan untuk fermentasi gelap memiliki rentang pH optimal antara 5,5 hingga 6,5. pH yang

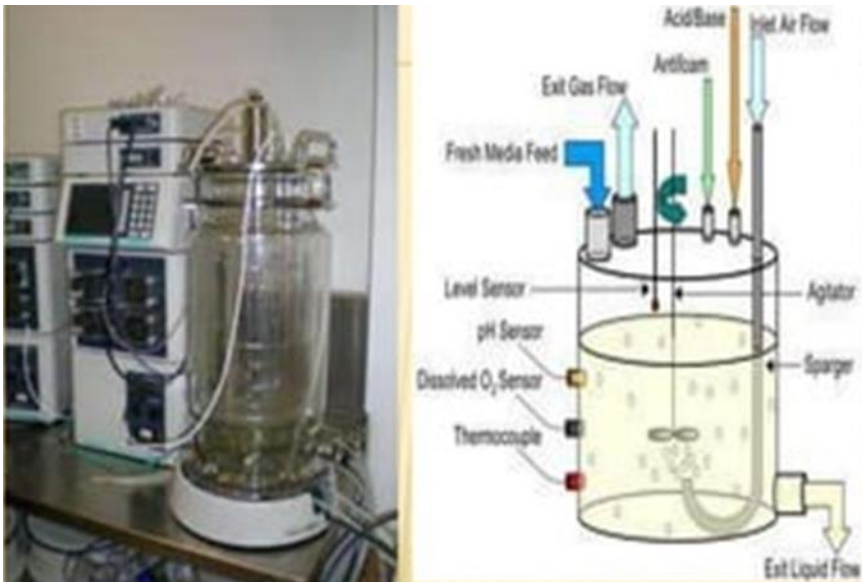
terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat aktivitas mikroorganisme dan menurunkan produksi hidrogen.

4. Suhu

Suhu operasi juga mempengaruhi aktivitas mikroorganisme. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat mengurangi efisiensi fermentasi. Suhu optimal untuk fermentasi gelap biasanya berada pada rentang 30°C hingga 37°C.

5. Waktu Retensi Hidrolik (HRT)

Waktu retensi hidrolik adalah waktu yang diperlukan oleh substrat untuk berada dalam reaktor fermentasi. HRT yang terlalu singkat dapat mengurangi waktu yang tersedia bagi mikroorganisme untuk memecah substrat menjadi hidrogen, sementara HRT yang terlalu lama dapat menyebabkan penumpukan produk sampingan yang menghambat produksi hidrogen.



Gambar 6.1. Bioreaktor Fermentasi Gelap

6.1.3 Metode Fermentasi Gelap

1. Fermentasi Batch

Fermentasi batch adalah metode di mana substrat dimasukkan ke dalam reaktor pada awal proses dan tidak ada penambahan

substrat selama proses berlangsung. Setelah waktu fermentasi yang ditentukan, produk dipanen. Metode ini sederhana dan mudah dioperasikan, tetapi memiliki keterbatasan dalam hal kontinuitas produksi.

2. Fermentasi Kontinu

Fermentasi kontinu melibatkan penambahan substrat secara terus-menerus ke dalam reaktor sambil produk hasil fermentasi dikeluarkan secara bersamaan. Metode ini lebih efisien dalam hal produksi hidrogen karena memungkinkan mikroorganisme untuk bekerja secara terus-menerus tanpa gangguan.

3. Fermentasi Semi-Kontinu

Fermentasi semi-kontinu adalah kombinasi antara fermentasi batch dan kontinu. Pada metode ini, substrat ditambahkan secara periodik dalam jumlah tertentu, dan produk dikeluarkan setelah waktu fermentasi tertentu. Metode ini memberikan fleksibilitas lebih dalam hal pengaturan proses fermentasi.

6.1.4 Tantangan dalam Produksi Biohidrogen dengan Fermentasi Gelap

Meskipun fermentasi gelap memiliki potensi besar dalam produksi biohidrogen, terdapat beberapa tantangan yang harus diatasi untuk meningkatkan efisiensi dan skala produksi. Beberapa tantangan utama meliputi:

- 1. Inhibisi Produk Sampingan:** Produk sampingan seperti asam organik dapat menghambat aktivitas mikroorganisme dan menurunkan produksi hidrogen. Pengembangan strategi untuk mengendalikan atau menghilangkan produk sampingan ini sangat penting.
- 2. Kinetika Reaksi yang Lambat:** Fermentasi gelap cenderung memiliki kinetika reaksi yang lebih lambat dibandingkan dengan proses termokimia lainnya. Penggunaan mikroorganisme yang lebih efisien atau rekayasa genetika dapat menjadi solusi.
- 3. Pengembangan Teknologi Reaktor:** Desain reaktor yang optimal diperlukan untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen. Ini termasuk pengembangan reaktor dengan sistem pencampuran yang baik dan kontrol parameter proses yang tepat.
- 4. Ekonomi Produksi:** Biaya produksi biohidrogen dengan fermentasi gelap masih relatif tinggi dibandingkan dengan sumber energi

konvensional. Penelitian lebih lanjut untuk menemukan substrat murah dan teknologi proses yang lebih efisien diperlukan untuk membuat produksi biohidrogen lebih ekonomis.

6.1.5 Prospek Masa Depan

Fermentasi gelap memiliki prospek yang menjanjikan dalam produksi biohidrogen sebagai sumber energi terbarukan. Dengan kemajuan dalam bidang bioteknologi dan rekayasa proses, diharapkan efisiensi dan skala produksi biohidrogen dapat ditingkatkan. Selain itu, pemanfaatan limbah organik sebagai substrat fermentasi tidak hanya membantu dalam mengurangi limbah tetapi juga memberikan nilai tambah melalui produksi energi bersih. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi tantangan yang ada dan mengoptimalkan proses fermentasi gelap. Kolaborasi antara peneliti, industri, dan pemerintah sangat penting untuk mengembangkan teknologi ini sehingga dapat diterapkan secara luas dan berkontribusi dalam mengatasi krisis energi global. Produksi biohidrogen melalui metode fermentasi gelap menawarkan potensi besar sebagai sumber energi terbarukan yang bersih dan berkelanjutan. Meskipun terdapat beberapa tantangan yang harus diatasi, kemajuan dalam teknologi dan penelitian memberikan harapan bahwa fermentasi gelap dapat menjadi metode yang efisien dan ekonomis untuk produksi hidrogen di masa depan. Pemanfaatan limbah organik sebagai substrat fermentasi tidak hanya memberikan manfaat lingkungan tetapi juga ekonomi, menjadikan fermentasi gelap sebagai solusi potensial dalam mengatasi tantangan energi dan lingkungan yang dihadapi saat ini.

6.2 Fotofermentasi

Fotofermentasi memanfaatkan bakteri fotosintetik seperti *Rhodobacter* untuk menghasilkan hidrogen dari asam organik dengan bantuan energi cahaya. Metode ini dapat menghasilkan yield hidrogen yang lebih tinggi dibandingkan fermentasi gelap. Integrasi fotofermentasi dengan fermentasi gelap dalam sistem dua tahap telah menunjukkan peningkatan efisiensi konversi substrat menjadi hidrogen (Argun, H., & Kargi, 2011). Tantangan dalam pengembangan teknik ini terletak pada desain bioreaktor yang efisien dan

optimalisasi kondisi operasi. Fotofermentasi melibatkan mikroorganisme fotosintetik seperti bakteri anoksigenik ungu dan hijau yang dapat menghasilkan hidrogen dari substrat organik di bawah kondisi anaerobik dan cahaya. Bakteri ini memiliki pigmen fotosintetik, seperti bakterioklorofil, yang memungkinkan mereka memanfaatkan cahaya sebagai sumber energi.

6.2.1 Reaksi Dasar Fotofermentasi

Proses fotofermentasi dapat digambarkan melalui reaksi kimia dasar berikut:



6.2.2 Mikroorganisme yang Digunakan

Bakteri fotofermentatif seperti *Rhodobacter sphaeroides*, *Rhodopseudomonas palustris*, dan *Rhodospirillum rubrum* merupakan contoh bakteri yang umum digunakan dalam proses ini. Mikroorganisme ini mampu memanfaatkan berbagai macam substrat organik seperti asam organik, glukosa, dan produk limbah organik lainnya.

1. *Rhodobacter sphaeroides*

Rhodobacter sphaeroides adalah salah satu bakteri yang paling efektif dalam produksi biohidrogen melalui fotofermentasi. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk tumbuh dalam kondisi aerobik dan anaerobik serta mampu menggunakan berbagai sumber karbon dan nitrogen.

2. *Rhodopseudomonas palustris*

Rhodopseudomonas palustris juga merupakan bakteri fotofermentatif yang efisien. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk memanfaatkan cahaya pada berbagai panjang gelombang, membuatnya sangat fleksibel dalam berbagai kondisi lingkungan.

6.2.3 Mekanisme Fotofermentasi

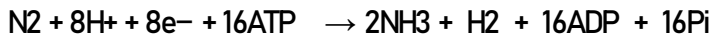
Fotofermentasi melibatkan serangkaian reaksi biokimia yang dikendalikan oleh enzim-enzim khusus. Proses ini dapat dibagi menjadi beberapa tahap utama:

1. **Absorpsi Cahaya:** Pigmen fotosintetik dalam bakteri menyerap cahaya dan mentransfer energi ke pusat reaksi fotosintetik.

2. **Transport Elektron:** Energi yang diserap digunakan untuk memindahkan elektron melalui rantai transport elektron, menghasilkan energi dalam bentuk ATP.
3. **Produksi Hidrogen:** Elektron yang dihasilkan digunakan oleh enzim nitrogenase atau hidrogenase untuk mengurangi proton menjadi hidrogen gas (H_2).

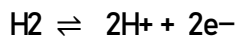
6.2.4 Nitrogenase

Nitrogenase adalah enzim utama yang berperan dalam produksi hidrogen pada banyak bakteri fotosintetik. Enzim ini mengkatalisis reaksi reduksi proton menjadi hidrogen gas dalam kondisi anaerobik. proses biokimia yang mirip dengan fiksasi nitrogen yang terjadi pada beberapa mikroorganisme, di mana nitrogen (N_2) diubah menjadi amonia (NH_3) dengan bantuan enzim nitrogenase.



6.2.5 Hidrogenase

Selain nitrogenase, hidrogenase juga memainkan peran penting dalam proses produksi hidrogen pada beberapa mikroorganisme. Hidrogenase mengkatalisis reaksi reversibel yang melibatkan hidrogen gas dan ion hidrogen. Reaksi yang menggambarkan disosiasi hidrogen molekuler (H_2) menjadi proton (H^+) dan elektron (e^-), yang merupakan setengah reaksi redoks.



6.2.6 Substrat untuk Fotofermentasi

Pemilihan substrat yang tepat sangat penting untuk efisiensi produksi biohidrogen. Substrat yang umum digunakan meliputi:

1. Asam organik (seperti asam asetat dan asam laktat)
2. Karbohidrat (seperti glukosa dan pati)
3. Limbah organik (seperti limbah industri makanan dan pertanian)

6.2.7 Asam Organik

Asam organik seperti asam asetat sering digunakan sebagai substrat karena mudah diuraikan oleh bakteri fotofermentatif. Proses ini juga menghasilkan CO₂ sebagai produk sampingan.

6.2.8 Karbohidrat

Karbohidrat seperti glukosa dapat diubah menjadi hidrogen melalui jalur metabolik tertentu dalam bakteri. Proses ini sering kali lebih kompleks dan memerlukan kondisi lingkungan yang tepat untuk mencapai efisiensi maksimal.

6.2.9 Limbah Organik

Penggunaan limbah organik sebagai substrat tidak hanya mendukung produksi hidrogen, tetapi juga membantu dalam pengelolaan limbah, menjadikannya solusi dua-dalam-satu untuk masalah lingkungan dan energi.

6.2.10 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produksi Biohidrogen

Produksi biohidrogen melalui fotofermentasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk:

1. **Intensitas Cahaya:** Intensitas dan panjang gelombang cahaya sangat mempengaruhi laju produksi hidrogen. Kondisi optimal berbeda untuk setiap jenis bakteri.
2. **pH dan Suhu:** Kondisi pH dan suhu yang optimal sangat penting untuk aktivitas enzim dan pertumbuhan mikroorganisme.
3. **Komposisi Nutrisi:** Ketersediaan sumber karbon dan nitrogen mempengaruhi efisiensi konversi substrat menjadi hidrogen.
4. **Kondisi Anaerobik:** Kondisi bebas oksigen diperlukan untuk menghindari penghambatan enzim yang bertanggung jawab atas produksi hidrogen.

6.2.11 Aplikasi dan Keuntungan Biohidrogen

Biohidrogen memiliki berbagai aplikasi potensial, terutama sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan dan sumber energi untuk pembangkit listrik. Keuntungan utama dari biohidrogen meliputi:

1. **Sumber Energi Terbarukan:** Hidrogen dapat dihasilkan dari bahan-bahan yang dapat diperbaharui, seperti limbah organik dan biomassa.
2. **Ramah Lingkungan:** Proses produksi dan pembakaran hidrogen menghasilkan emisi gas rumah kaca yang sangat rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil.
3. **Efisiensi Energi Tinggi:** Hidrogen memiliki densitas energi yang tinggi, membuatnya sangat efisien sebagai sumber bahan bakar.

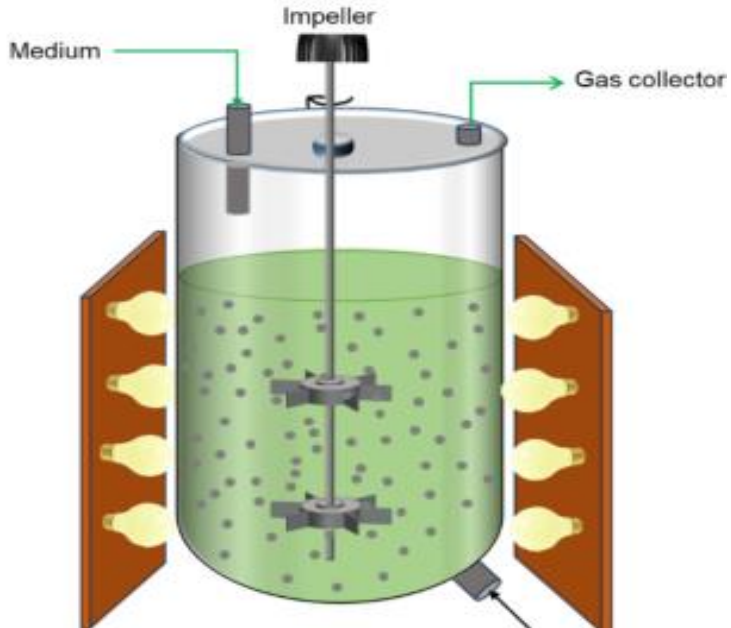
Meskipun memiliki banyak keuntungan, produksi biohidrogen melalui fotofermentasi masih menghadapi beberapa tantangan, termasuk:

1. **Biaya Produksi:** Proses produksi biohidrogen saat ini masih relatif mahal dibandingkan dengan bahan bakar fosil.
2. **Skalabilitas:** Skalabilitas produksi hidrogen menggunakan teknologi fotofermentasi masih perlu ditingkatkan untuk memenuhi kebutuhan energi yang besar.
3. **Kestabilan Proses:** Kestabilan dan konsistensi produksi hidrogen memerlukan kontrol yang ketat terhadap kondisi proses.

Namun, dengan kemajuan penelitian dan pengembangan teknologi, prospek biohidrogen sebagai sumber energi masa depan sangat cerah. Inovasi dalam rekayasa genetika mikroorganisme, optimasi kondisi proses, dan pengembangan reaktor fotofermentasi yang lebih efisien diharapkan dapat mengatasi tantangan yang ada. Produksi biohidrogen melalui metode fotofermentasi menawarkan solusi yang menjanjikan untuk masalah energi dan lingkungan saat ini. Dengan memanfaatkan mikroorganisme fotosintetik dan substrat organik, biohidrogen dapat diproduksi secara berkelanjutan dan ramah lingkungan. Meskipun masih menghadapi beberapa tantangan, penelitian yang berkelanjutan dan inovasi teknologi di bidang ini memiliki potensi besar untuk merevolusi cara kita memproduksi dan menggunakan energi di masa depan.

6.3 Produksi Biohidrogen dengan Metode Biofotolisis

Biofotolisis merupakan proses pemecahan air menjadi hidrogen dan oksigen menggunakan mikroalga atau sianobakteri. Teknik ini menawarkan potensi produksi hidrogen langsung dari air dan CO₂ menggunakan energi matahari. Tantangan utamanya adalah sensitivitas enzim hidrogenase terhadap oksigen dan efisiensi konversi energi cahaya yang masih rendah (Eroglu, E, & Melis, 2016). Biohidrogen merupakan sumber energi terbarukan yang menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Salah satu metode produksi biohidrogen adalah biofotolisis, yang memanfaatkan kemampuan mikroorganisme fotosintetik untuk mengubah energi cahaya menjadi hidrogen. Tulisan ini membahas mekanisme dasar biofotolisis, jenis mikroorganisme yang digunakan, kondisi optimal produksi, serta tantangan dan prospek di masa depan. Referensi dari berbagai literatur ilmiah disertakan untuk mendukung penjelasan ini. Penggunaan bahan bakar fosil telah menyebabkan masalah lingkungan seperti polusi udara dan perubahan iklim. Oleh karena itu, perlu dikembangkan sumber energi alternatif yang bersih dan terbarukan. Hidrogen adalah salah satu kandidat utama karena hanya menghasilkan air sebagai produk sampingan saat digunakan dalam sel bahan bakar. Di antara berbagai metode produksi hidrogen, biofotolisis merupakan metode yang menjanjikan karena memanfaatkan energi matahari, yang berlimpah dan terbarukan.



Gambar 6.2. Reaktor Biofotolisis

6.3.1 Mekanisme Dasar Biofotolisis

Biofotolisis adalah proses di mana mikroorganisme fotosintetik mengubah energi cahaya menjadi hidrogen. Proses ini melibatkan dua tahap utama: fotofosforilasi dan reaksi enzimatik.

1. Fotofosforilasi

Fotofosforilasi adalah proses di mana energi cahaya digunakan untuk memompa proton melintasi membran tilakoid, menghasilkan gradien proton yang digunakan untuk mensintesis ATP. Proses ini melibatkan dua fotosistem: Fotosistem II (PSII) dan Fotosistem I (PSI). PSII memisahkan air menjadi oksigen, proton, dan elektron melalui reaksi berikut: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$

Elektron yang dihasilkan oleh PSII ditransfer melalui rantai transpor elektron ke PSI, yang menggunakan energi cahaya tambahan untuk memompa elektron ke tingkat energi yang lebih tinggi. Elektron tersebut kemudian digunakan untuk mereduksi NADP^+ menjadi NADPH, yang berperan penting dalam reaksi enzimatik selanjutnya.

2. Reaksi Enzimatik

Hidrogenase dan nitrogenase adalah enzim utama yang terlibat dalam produksi hidrogen. Hidrogenase mengkatalisis reaksi berikut: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

Nitrogenase, yang biasanya terlibat dalam fiksasi nitrogen, juga dapat mengkatalisis produksi hidrogen sebagai produk sampingan. Aktivitas kedua enzim ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti ketersediaan cahaya, konsentrasi oksigen, dan sumber karbon.

6.3.2 Jenis Mikroorganisme yang Digunakan

Berbagai mikroorganisme fotosintetik telah dipelajari untuk produksi biohidrogen melalui biofotolisis, termasuk alga hijau dan bakteri fotosintetik.

1. Alga Hijau

Alga hijau seperti *Chlamydomonas reinhardtii* adalah salah satu organisme model yang paling banyak digunakan. Organisme ini memiliki kemampuan untuk menginduksi produksi hidrogen di bawah kondisi anoksik (tanpa oksigen). Salah satu keuntungan utama alga hijau adalah kemampuan mereka untuk beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan, yang memungkinkan fleksibilitas dalam produksi hidrogen.

2. Bakteri Fotosintetik

Bakteri fotosintetik, seperti *Rhodobacter sphaeroides* dan *Rhodospseudomonas palustris*, juga telah menunjukkan potensi besar dalam produksi hidrogen. Bakteri ini memiliki sistem fotosintetik yang berbeda dari alga hijau, yang memungkinkan mereka untuk beroperasi di bawah kondisi cahaya rendah dan ketersediaan karbon organik yang berbeda.

6.3.3 Kondisi Optimal Produksi

Produksi hidrogen melalui biofotolisis sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan kondisi kultur. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi produksi hidrogen termasuk intensitas cahaya, konsentrasi oksigen, pH, dan sumber karbon.

1. Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya yang optimal sangat penting untuk memaksimalkan aktivitas fotosintetik dan produksi hidrogen. Terlalu sedikit cahaya akan membatasi energi yang tersedia untuk fotosintesis, sementara terlalu banyak cahaya dapat menyebabkan fotoinhibisi, di mana organisme menjadi tidak aktif karena kerusakan pada sistem fotosintetik mereka. Oleh karena itu, intensitas cahaya yang tepat harus dikendalikan secara hati-hati.

2. Konsentrasi Oksigen

Oksigen adalah inhibitor kuat dari hidrogenase, enzim kunci dalam produksi hidrogen. Oleh karena itu, kondisi anoksik atau hipoksik (oksigen rendah) harus dipertahankan untuk mengoptimalkan produksi hidrogen. Metode untuk mengurangi konsentrasi oksigen termasuk aerasi terbatas dan penggunaan sistem kultur tertutup.

3. pH

pH medium kultur juga mempengaruhi aktivitas enzim dan stabilitas mikroorganisme. pH yang optimal untuk produksi hidrogen biasanya berkisar antara 7 hingga 8. Kondisi pH harus dipantau dan disesuaikan secara berkala untuk memastikan kondisi yang optimal.

4. Sumber Karbon

Sumber karbon organik seperti asetat, glukosa, dan laktat dapat digunakan oleh bakteri fotosintetik untuk mendukung pertumbuhan dan produksi hidrogen. Pemilihan sumber karbon yang tepat sangat penting untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen.

Meskipun biofotolisis menawarkan potensi besar untuk produksi hidrogen yang berkelanjutan, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi. Efisiensi konversi energi dari cahaya menjadi hidrogen masih relatif rendah dibandingkan dengan metode produksi hidrogen lainnya. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi ini, termasuk rekayasa genetika mikroorganisme untuk meningkatkan aktivitas enzim kunci dan optimalisasi kondisi kultur. Tantangan berikutnya adalah skala produksi, produksi hidrogen

melalui biofotolisis saat ini masih dalam skala laboratorium. Pengembangan sistem reaktor yang efisien dan ekonomis untuk produksi skala besar adalah tantangan utama. Desain reaktor yang dapat memaksimalkan paparan cahaya dan kontrol kondisi lingkungan secara tepat akan sangat penting. Stabilitas dan ketahanan mikroorganisme, mikroorganisme yang digunakan dalam biofotolisis harus memiliki stabilitas dan ketahanan yang tinggi terhadap kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Penggunaan mikroorganisme rekombinan atau strain yang telah dioptimalkan melalui seleksi alam dapat membantu mengatasi masalah ini. Integrasi produksi biohidrogen dengan sistem energi terbarukan lainnya, seperti panel surya atau sistem fotobioreaktor, dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan dan menyediakan solusi energi yang lebih berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan teknologi integrasi ini (Ghirardi, M. L., Dubini, A., Yu, J., & Maness, 2009).

Biofotolisis merupakan metode produksi hidrogen yang berpotensi besar untuk menjadi solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan. Meskipun masih ada berbagai tantangan yang perlu diatasi, kemajuan dalam penelitian dan pengembangan teknologi dapat meningkatkan efisiensi dan skala produksi biohidrogen. Integrasi dengan sistem energi terbarukan lainnya juga dapat memperkuat posisi biohidrogen sebagai sumber energi masa depan.

6.4 Produksi Biohidrogen dengan Metode Elektrolisis Mikrobal

Teknologi sel elektrolisis mikrobal (MEC) memanfaatkan bakteri elektrogenesis untuk mengoksidasi substrat organik dan menghasilkan elektron yang dialirkan ke katoda untuk memproduksi hidrogen. MEC memiliki keunggulan dapat menghasilkan hidrogen dari substrat yang sulit didegradasi. Namun, isu utama dalam pengembangannya adalah kebutuhan energi listrik eksternal dan mahalnya material elektroda. (Logan, B. E., 2008). Biohidrogen merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang menjanjikan sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Hidrogen memiliki densitas energi yang tinggi dan pembakarannya hanya menghasilkan air sebagai produk sampingan, menjadikannya sumber energi yang

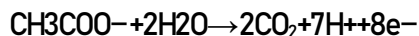
ramah lingkungan. Produksi biohidrogen dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk fermentasi gelap, fermentasi foto, dan elektrolisis mikrobial. Metode elektrolisis mikrobial (*Microbial Electrolysis Cells*/MECs) menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian terbaru karena potensinya dalam memanfaatkan mikroorganisme untuk menghasilkan hidrogen dari bahan organik.

6.4.1 Mekanisme Dasar Elektrolisis Mikrobial

Elektrolisis mikrobial adalah proses di mana mikroorganisme digunakan sebagai biokatalis untuk mendegradasi bahan organik dan menghasilkan elektron. Dalam sel elektrolisis mikrobial, terdapat dua elektroda utama yaitu anoda dan katoda. Pada anoda, mikroorganisme melakukan oksidasi bahan organik dan melepaskan elektron serta proton. Elektron kemudian mengalir melalui sirkuit eksternal menuju katoda, di mana proton dan elektron bergabung untuk membentuk gas hidrogen.

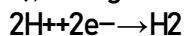
Persamaan Reaksi pada Anoda:

Reaksi oksidasi dalam reaksi ini, ion asetat (CH_3COO^-) dioksidasi menjadi karbon dioksida (CO_2), dan dalam prosesnya, ia melepaskan elektron ($8e^-$), persamaan reaksi berikut:



Persamaan Reaksi pada Katoda:

reaksi reduksi ion hidrogen (H^+) menjadi gas hidrogen (H_2) dengan penambahan dua elektron (e^-), sebagai berikut :



6.4.2 Komponen Utama dalam Sel Elektrolisis Mikrobial

1. Elektroda:

- a. **Anoda:** Biasanya terbuat dari material konduktif seperti grafit atau karbon, tempat mikroorganisme melekat dan melakukan oksidasi bahan organik.
- b. **Katoda:** Dibuat dari material konduktif yang memungkinkan terjadinya reaksi reduksi, seperti platina atau logam lain yang dapat mengkatalisis pembentukan hidrogen.

2. Mikroorganisme:

Mikroorganisme yang umum digunakan adalah bakteri elektrogenik seperti *Geobacter sulfurreducens* dan *Shewanella oneidensis* yang mampu menghasilkan elektron melalui respirasi anaerobik.

3. Substrat Organik:

Substrat yang digunakan dapat berupa limbah organik, air limbah domestik, atau bahan organik lainnya yang mengandung sumber karbon untuk mikroorganisme.

6.4.3 Keuntungan dan Tantangan

Keuntungan:

1. **Energi Terbarukan:** Menggunakan bahan organik sebagai substrat, sehingga memanfaatkan limbah dan mengurangi pencemaran lingkungan.
2. **Ramah Lingkungan:** Menghasilkan hidrogen tanpa emisi gas rumah kaca.
3. **Efisiensi Energi:** Proses ini dapat berlangsung pada kondisi lingkungan yang lebih moderat dibandingkan dengan metode elektrolisis konvensional yang memerlukan suhu dan tekanan tinggi.

Tantangan:

1. **Biaya Produksi:** Penggunaan material elektroda yang mahal seperti platina dapat meningkatkan biaya produksi.
2. **Stabilitas Sistem:** Mikroorganisme perlu dipertahankan dalam kondisi optimal untuk memastikan efisiensi produksi hidrogen yang tinggi.
3. **Kontaminasi:** Sistem perlu dirancang untuk menghindari kontaminasi mikroorganisme yang dapat mengganggu proses elektrolisis.

Penelitian terbaru berfokus pada pengembangan material elektroda yang lebih murah dan efektif, serta rekayasa mikroorganisme untuk meningkatkan produksi hidrogen. Beberapa studi juga mengeksplorasi penggunaan sumber substrat alternatif, seperti limbah pertanian dan industri.

Salah satu studi kasus menarik adalah penggunaan air limbah domestik sebagai substrat untuk produksi biohidrogen. Air limbah mengandung bahan organik yang melimpah, yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme dalam MECs. Penelitian yang dilakukan oleh Zhang, T., Zhang, Y., & Liu, (2016) menunjukkan bahwa penggunaan air limbah domestik dalam MECs dapat menghasilkan hidrogen dengan efisiensi yang cukup tinggi, sekaligus mengurangi beban pencemaran pada lingkungan. Masa depan produksi biohidrogen dengan metode elektrolisis mikrobial sangat menjanjikan, terutama dengan perkembangan teknologi dan rekayasa genetika yang terus berkembang. Tantangan yang ada saat ini, seperti biaya dan stabilitas sistem, diharapkan dapat diatasi dengan inovasi-inovasi baru. Produksi biohidrogen dengan metode elektrolisis mikrobial merupakan salah satu solusi potensial untuk memenuhi kebutuhan energi terbarukan di masa depan. Metode ini tidak hanya menghasilkan energi yang bersih, tetapi juga memanfaatkan limbah organik yang melimpah sebagai sumber substrat. Meskipun masih menghadapi beberapa tantangan, perkembangan teknologi dan penelitian terus memberikan harapan untuk aplikasi komersial di masa depan.

Upaya peningkatan produksi biohidrogen juga dilakukan melalui pengembangan strain unggul dan rekayasa jalur metabolisme. Pendekatan ini meliputi overekspresi gen-gen kunci dalam lintasan produksi hidrogen, inaktivasi jalur kompetitor, dan introduksi gen heterolog. Beberapa contoh keberhasilan mencakup peningkatan aktivitas hidrogenase dan penurunan pembentukan produk samping (Kapdan, I. K., & Kargi, 2006).

6.5 Optimasi Bioreaktor dan Kondisi Operasi

Biohidrogen adalah salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Produksi biohidrogen melalui proses fermentasi biologis menjadi topik penelitian yang sangat penting. Tulisan ini membahas optimasi bioreaktor dan kondisi operasi yang mempengaruhi produksi biohidrogen. Berbagai faktor seperti pH, suhu, jenis substrat, dan desain bioreaktor akan dianalisis

untuk menemukan kondisi optimal yang dapat meningkatkan efisiensi produksi biohidrogen. Kebutuhan akan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan semakin mendesak dengan adanya krisis energi global dan perubahan iklim. Biohidrogen menawarkan solusi potensial sebagai sumber energi bersih yang dapat dihasilkan melalui proses biologis seperti fermentasi anaerob. Penelitian mengenai optimasi kondisi operasi dan desain bioreaktor untuk produksi biohidrogen sangat penting untuk mengembangkan teknologi ini lebih lanjut (Lee, H. S., & Rittmann, 2009).

6.5.1 Produksi Biohidrogen

Desain bioreaktor yang tepat dan optimasi parameter operasi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi produksi biohidrogen. Penggunaan reaktor membran, reaktor packed bed, dan reaktor fluidized bed telah menunjukkan peningkatan produktivitas. Optimasi kondisi seperti pH, suhu, konsentrasi substrat, dan laju pengadukan juga berperan penting dalam maksimalisasi yield hidrogen (Show, K. Y., Lee, D. J., & Chang, 2011).

Produksi biohidrogen dapat dilakukan melalui beberapa metode, termasuk fermentasi gelap, fermentasi foto, dan biophotolysis. Fermentasi gelap menggunakan mikroorganisme anaerob untuk mengkonversi bahan organik menjadi hidrogen dan asam organik. Proses ini tidak memerlukan cahaya, sehingga dapat dilakukan dalam kondisi gelap.

6.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Produksi Biohidrogen

1. **pH** pH adalah salah satu parameter penting yang mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam bioreaktor. pH yang optimal bervariasi tergantung pada jenis mikroorganisme yang digunakan, namun umumnya berkisar antara 5,5 hingga 6,5 untuk fermentasi gelap.
2. **Suhu**: Suhu operasi yang optimal juga sangat penting untuk memaksimalkan produksi hidrogen. Kebanyakan mikroorganisme yang digunakan untuk fermentasi gelap bekerja dengan baik pada suhu mesofilik (30–40°C) atau termofilik (50–60°C).
3. **Jenis Substrat**: Sumber karbon dan nitrogen dalam substrat memainkan peran penting dalam produksi biohidrogen. Bahan

organik seperti limbah pertanian, limbah makanan, dan air limbah dapat digunakan sebagai substrat.

4. **Desain Bioreaktor:** Desain bioreaktor mempengaruhi efisiensi transfer massa dan kondisi mikro lingkungan untuk mikroorganisme. Beberapa desain bioreaktor yang umum digunakan termasuk bioreaktor CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), dan bioreaktor membran.

6.5.3 Teknologi dan Inovasi dalam Bioreaktor

Berbagai inovasi dalam desain dan teknologi bioreaktor telah dikembangkan untuk meningkatkan produksi biohidrogen. Misalnya, penggunaan sistem hibrid yang mengkombinasikan fermentasi gelap dengan proses fotofermentasi telah menunjukkan peningkatan efisiensi produksi hidrogen. Selain itu, penggunaan material nano dan enzim immobilisasi dalam bioreaktor juga menjadi fokus penelitian terkini. Variabel yang mempengaruhi produksi biohidrogen adalah pH, suhu, jenis substrat, dan desain bioreaktor. Factor -faktor yang mempengaruhi produksi hidrogen meliputi :

1. **Mikroorganisme:** Strain bakteri *Clostridium* sp. dan *Enterobacter* sp. yang diketahui efektif dalam produksi biohidrogen.
2. **Substrat:** Glukosa, limbah makanan, dan air limbah.
3. **Bioreaktor:** Bioreaktor tipe CSTR dan UASB dengan kapasitas 5 liter.

Kondisi pH optimal untuk produksi hidrogen dengan *Clostridium* sp. adalah 6,0, sedangkan *Enterobacter* sp. menunjukkan produksi terbaik pada pH 6,5. Kondisi pH yang terlalu asam atau basa mengurangi aktivitas enzimatik dan produksi hidrogen. Produksi hidrogen tertinggi dicapai pada suhu 37°C untuk *Clostridium* sp. dan 30°C untuk *Enterobacter* sp. Suhu yang lebih tinggi atau lebih rendah dari kisaran ini menyebabkan penurunan produksi hidrogen karena denaturasi enzim dan penurunan aktivitas mikroorganisme. Substrat berupa glukosa menghasilkan produksi hidrogen tertinggi dibandingkan dengan limbah makanan dan air limbah. Namun, penggunaan limbah makanan dan air limbah sebagai substrat menawarkan keuntungan ekonomi dan lingkungan, meskipun

efisiensinya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan glukosa murni. Desain bioreaktor tipe CSTR menunjukkan efisiensi produksi hidrogen yang lebih tinggi dibandingkan dengan UASB. Hal ini dikarenakan CSTR memberikan kondisi pencampuran yang lebih baik dan homogenitas yang lebih tinggi, sehingga mikroorganisme dapat bekerja lebih efisien (Heidrich, E. S., Dolfig, J., Scott, K., Edwards, S. R., Jones, C., & Curtis, 2013).

Optimasi bioreaktor dan kondisi operasi memainkan peran penting dalam produksi biohidrogen. Faktor-faktor seperti pH, suhu, jenis substrat, dan desain bioreaktor harus dipertimbangkan untuk mencapai produksi hidrogen yang maksimal. Penelitian ini menyarankan pH 6,0-6,5 dan suhu 30-37°C sebagai kondisi optimal untuk produksi hidrogen menggunakan *Clostridium* sp. dan *Enterobacter* sp. Selain itu, penggunaan substrat limbah dan desain bioreaktor tipe CSTR dapat meningkatkan efisiensi produksi hidrogen.

Biorefinery yang mengintegrasikan produksi biohidrogen dengan pemulihan produk bernilai tambah lainnya menawarkan peluang untuk meningkatkan kelayakan ekonomi. Misalnya, integrasi produksi biohidrogen dengan produksi bioplastik atau bahan kimia platform dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan biomassa (Cherubini, 2010).

Pengembangan teknik pengolahan biohidrogen telah menunjukkan kemajuan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Meski demikian, masih terdapat berbagai tantangan yang perlu diatasi untuk mencapai produksi skala komersial. Upaya penelitian lanjutan diperlukan terutama dalam aspek peningkatan yield, efisiensi energi, dan penurunan biaya produksi. Dengan terus berkembangnya teknologi dan pemahaman ilmiah, biohidrogen diharapkan dapat menjadi sumber energi alternatif yang penting di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Argun, H., & Kargi, F. (2011). Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7443-7459.
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy conversion and management*, 51(7), 1412-1421.
- Eroglu, E., & Melis, A. (2016). Photobiological hydrogen production: Recent advances and state of the art. *Bioresource Technology*, 231, 276-285
- Logan, B. E., et al. (2008). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. *Environmental science & technology*, 42(23), 8630-8640.
- Ghirardi, M. L., Dubini, A., Yu, J., & Maness, P. C. (2009). Photobiological hydrogen-producing systems. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 52-61.
- Hallenbeck, P. C., & Ghosh, D. (2009). Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward?. *Trends in biotechnology*, 27(5), 287-297.
- Heidrich, E. S., Dolfing, J., Scott, K., Edwards, S. R., Jones, C., & Curtis, T. P. (2013). Production of hydrogen from domestic wastewater in a pilot-scale microbial electrolysis cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(15), 6979-6989.
- Kapdan, I. K., & Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38(5), 569-582.
- Lee, H. S., & Rittmann, B. E. (2009). Evaluation of metabolism using stoichiometry in fermentative biohydrogen. *Biotechnology and Bioengineering*, 102(3), 749-758
- Show, K. Y., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Bioreactor and process design for biohydrogen production. *Bioresource technology*, 102(18), 8524-8533.
- Zhang, T., Zhang, Y., & Liu, H. (2016). Biohydrogen production from sewage sludge in microbial electrolysis cells: Energy balance and microbial community analysis. *Water Research*, 99, 82-88.

BAB 7

PRETREATMEN DAN HIDROLISIS

Oleh Wenny Surya Murtius

7.1 Pendahuluan

Pretreatmen yang diterapkan pada suatu bahan umumnya bertujuan untuk memperlancar laju hidrolisis dengan mengurangi atau menghilangkan berbagai bahan/senyawa. Sehingga meningkatkan produksi produk yang ditargetkan, seperti bioetanol dari gula sederhana yang berasal dari selulosa dan hemiselulosa. Sehingga pemilihan metode pretreatmen yang tepat sangat penting dilakukan karena berkaitan dengan metode hidrolisis yang akan digunakan selanjutnya. Dapat dikatakan bahwa pemilihan metode pretreatmen ini sangat mempengaruhi keseluruhan biaya operasional dalam suatu proses. Karena penggunaan metode pretreatmen yang tidak optimal hanya akan menyebabkan degradasi terjadi secara parsial (misalnya terhadap hemiselulosa dan lignin pada biomasa lignoselulosa) serta menghasilkan senyawa beracun yang dapat menghambat proses hidrolisis.

Pemilihan teknologi pretreatmen pada biomasa lignoselulosa juga tergantung pada bahan baku yang digunakan. Karena tiap bahan baku memiliki komposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berbeda. Metode pretreatmen pada biomasa dilakukan untuk mempersiapkan bahan baku lignoselulosa sebelum dikonversi menjadi produk bioenergy atau biochemical. Tujuan utama dari pretreatmen pada biomasa lignoselulosa adalah untuk membuka struktur selulosa dan lignin yang padat dan sulit dipecahkan. Sehingga mempermudah proses hidrolisis pada tahap selanjutnya. Tahap pretreatmen yang diterapkan pada biomasa lignoselulosa akan menyebabkan terjadinya perubahan pada material seperti, perubahan komposisi kimia, grup asetil, kristalinitas, derajat polimerisasi, hingga aksesibilitas. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pretreatmen pada biomasa lignoselulosa dapat mempercepat disosiasi serat, meningkatkan konversi biomassa, dan menghidrolisis polisakarida

menjadi monosakarida. Pretreatmen juga menurunkan kandungan lignin, kristalinitas selulosa dan konsumsi energi.

Metode pretreatmen biomasa yang telah dikembangkan meliputi metode fisik, kimia, biologi, dan kombinasi antaranya. Namun hal penting yang harus diperhatikan dalam pemilihan metode pretreatmen diantaranya: kandungan dan komposisi kimia dari biomassa yang digunakan, metode dan proses produksi yang akan diterapkan untuk mendapatkan produk target yang sesuai, baik dari segi kualitas, nilai, serta dampak bagi lingkungan. Karena dipengaruhi secara signifikan oleh hal di atas. Sebagai contoh ada metode pretreatment yang diterapkan pada biomas memudahkan tahapan hidrolisis secara enzimatik pada komponen selulosa, tetapi kelemahannya terbentuknya senyawa penghambat yang dapat menghambat proses lebih lanjut. Contoh lainnya metode yang diketahui efektif memproduksi selulosa namun penyerapan enzim tidak berjalan efektif pada saat hidrolisis karena lignin yang masih tinggi. Metode lain berkaitan dengan biaya produksi yang tinggi sehingga tidak efisien proses yang diterapkan. Oleh karena itu, pemilihan metode pretreatmen harus dengan pertimbangan yang matang mencakup seluruh aspek selama proses produksi.

Metode hidrolisis biomasa juga terdapat beberapa metode yang dapat diterapkan setelah pretreatmen, seperti hidrolisis asam, hidrolisis enzimatik, dan hidrolisis alkali. Hidrolisis asam melibatkan penggunaan asam kuat untuk memecah ikatan glikosidik dalam selulosa dan hemiselulosa, sementara hidrolisis enzimatik melibatkan penggunaan enzim hidrolitik untuk memecah ikatan glikosidik dalam selulosa dan hemiselulosa. Hidrolisis alkali menggunakan larutan alkali untuk memecah ikatan ester dan ikatan eter dalam lignin dan selulosa, sehingga meningkatkan aksesibilitas enzim ke substrat. Setiap metode memiliki keuntungan dan kelemahan tertentu, dan pilihan metode tergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan kondisi operasional yang diinginkan. Beberapa studi menunjukkan bahwa kombinasi dua atau lebih metode hidrolisis dapat meningkatkan efisiensi hidrolisis dan produksi bioenergi.

Meskipun telah dilakukan banyak penelitian tentang metode pretreatmen dan hidrolisis biomasa, akan tetapi masih ada banyak tantangan yang harus diatasi. Hal tersebut tidak lepas dari upaya

mengoptimalkan efisiensi dan penggunaan biomasa tersebut sekaligus untuk mendapatkan proses yang ekonomis. Karena metode pretreatmen memiliki perbedaan dari segi efektivitas dan efisiensi. Bab ini akan mengulas tentang metode-metode pretreatmen dan hidrolisis yang banyak digunakan oleh para peneliti pada biomasa untuk menghasilkan produk bioenergy dan biochemical.

7.2 Pretreatmen

7.2.1 Pretreatmen Metode Fisik

Keuntungan dari metode fisik ini adalah tidak memerlukan bahan kimia yang mahal dan berbahaya, serta dapat diaplikasikan pada berbagai jenis biomassa. Namun, kelemahan utama dari metode ini adalah biaya investasi awal yang tinggi dan sulitnya penggunaan dalam skala industri. Pretreatmen secara mekanik/fisika pada umumnya dilakukan dengan mengurangi ukuran partikel bahan baku. Beberapa peneliti menilai bahwa pretreatmen fisika paling efektif diterapkan pada bahan lignoselulosa jika akan menggunakan hidrolisis secara enzimatis, yaitu dengan meningkatkan aksesibilitas enzim. Keunggulan lainnya adalah merupakan metode yang ramah lingkungan, dibandingkan metode kimia (berkaitan dengan penggunaan bahan kimia dan residu yang dihasilkan). Namun kelemahannya, memerlukan banyak energi selama pengoperasian dan dinilai tidak ekonomis. Termasuk pemecahan lignin dan xilan yang kurang optimal juga menjadi masalah yang ditimbulkan dari metode fisika ini.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan efektivitas metode fisik ini dengan metode pretreatmen lainnya. Salah satu studi menunjukkan bahwa ultrasonic dan mikrofluidik dapat menghasilkan rendemen gula yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode listrik dan hidrolisis asam. Namun, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas dan efisiensi dari metode fisik ini dalam skala industri.

1. Microwave

Pretreatmen fisik menggunakan microwave adalah salah satu metode pretreatmen yang memanfaatkan radiasi gelombang mikro. Gelombang dengan frekuensi antara 300-300.000 MHz ini

merupakan gelombang tak terionkan. Gelombang ini bisa menembus bahan dan mengeksitasi molekul-molekul bahan secara merata.

Pretreatment menggunakan microwave pada biomassa lignoselulosa dapat meningkatkan efisiensi degradasi selulosa dan hemiselulosa pada biomassa menjadi gula-gula sederhana seperti glukosa dan xilosa. Metode ini juga dapat menurunkan kristalinitas selulosa pada biomassa, sehingga meningkatkan ketersediaannya untuk proses fermentasi selanjutnya.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan efektivitas pretreatment fisik menggunakan microwave dengan metode pretreatment lainnya pada biomassa lignoselulosa. Sebagai contoh, hasil penelitian terkait degradasi lignoselulosa pada tongkol jagung menunjukkan bahwa pretreatment menggunakan microwave efisien digunakan. Sementara itu, penelitian lainnya menunjukkan bahwa metode kombinasi pretreatment microwave dan perlakuan fungi juga dapat meningkatkan efisiensi produksi gula dari biomassa tandan kosong kelapa sawit.

Meskipun pretreatment fisik menggunakan microwave memiliki beberapa keuntungan, seperti waktu reaksi yang singkat dan efisiensi yang tinggi, metode ini juga memiliki kekurangan, seperti biaya yang tinggi dan risiko terjadinya perubahan struktur atau degradasi komponen selulosa dan lignin pada biomassa lignoselulosa.

2. Ultrasonic

Ultrasonic adalah metode pretreatment yang menggunakan gelombang suara dengan frekuensi tinggi untuk menghasilkan efek kavitasi, yaitu pembentukan gelembung udara mikroskopis dalam cairan yang meledak dan memecahkan ikatan struktur lignoselulosa. Metode ini dapat meningkatkan ketersediaan substrat untuk enzim, mengurangi waktu pretreatment, dan menghasilkan rendemen gula yang lebih tinggi.

3. Mikrofluidik

Mikrofluidik adalah metode pretreatment biomassa yang menggunakan aliran cairan dalam saluran mikro untuk menghasilkan efek shearing pada substrat. Metode ini dapat

meningkatkan aksesibilitas enzim ke substrat, mengurangi waktu pretreatmen, dan menghasilkan rendemen gula yang lebih tinggi.

4. **Ball Milling**

Ball milling adalah metode pretreatmen biomassa yang menggunakan bola logam yang digerakkan dalam tabung untuk menghasilkan efek shearing dan tumbukan pada substrat. Metode ini dapat meningkatkan ketersediaan substrat untuk enzim, mengurangi waktu pretreatmen, dan menghasilkan rendemen gula yang lebih tinggi.

5. ***Pulsed Electric Field* (PEF)**

Penerapan teknologi *Pulsed Electric Field* (PEF) merupakan salah satu metode pretreatmen *non-thermal* menggunakan medan listrik. Dua elektroda dialiri listrik dengan tegangan tinggi, sampel ditempatkan diantaranya untuk waktu yang singkat, biasanya dalam

hitungan detik. Kekuatan medan listrik rendah antara 5-20 kV/cm dengan waktu yang singkat dapat merusak struktur lignoselulosa. Keuntungan menggunakan PEF adalah proses yang sangat singkat, kebutuhan daya rendah dan desain instrumen sederhana.

Penggunaan PEF sebagai metode pretreatmen dalam pengolahan suatu biomassa, berkaitan dengan elektroporasi membran sel biologis suatu bahan (seperti limbah pertanian) yang diinduksi medan listrik berdenyut. Secara khusus, penggunaan PEF pada pemanfaatan limbah pertanian dapat diterapkan pada: (1) pengembangan bahan baku biorefineries melalui gen elektroporasi, (2) pengeringan biomassa, (3) ekstraksi produk bernilai tambah tinggi dari limbah, lignoselulosa biomassa, dan mikroalga, (4) ekstraksi molekul dari bakteri dan ragi, dan (5) produksi biogas.

7.2.2 Pretreatmen Kimia

Telah banyak penelitian yang dilakukan terkait penggunaan berbagai senyawa kimia. Hasilnya menunjukkan bahwa pretreatmen tersebut memberikan efek terhadap perombakan struktur lignoselulosa, proses berlangsung cepat, selanjutnya reaksi dilakukan pada tekanan dan suhu ruangan. Seperti penggunaan asam sulfat

pekat pada suhu 70°C. Selanjutnya penggunaan asam organik encer yang diujikan terhadap bambu memiliki efektivitas hidrolisis lebih tinggi dibanding asam non organik encer. Seperti halnya metode pretreatmen fisik dan biologi, metode yang digunakan dalam pretreatmen sangat berpengaruh dalam konversi biomassa agar mendapat hasil yang diinginkan.

Pretreatmen kimia juga diketahui mudah digunakan, lebih efektif, dan penggunaan energi yang cukup rendah. Pretreatmen metode kimia yang banyak digunakan adalah yaitu pretreatment asam dan pretreatmen basa atau penggunaan reagen asam dan reagen basa. Kedua pretreatmen kimia ini dikenal memiliki keunggulan lebih banyak dibandingkan metode pretreatmen kimia lainnya. Pada biomasa lignoselulosa metode ini juga bertujuan untuk memodifikasi atau menghilangkan lignin dan hemiselulosa, serta mengurangi kristalinitas selulosa.

1. Pretreatmen Asam

Metode pretreatmen dengan reagen asam dapat dilakukan dengan merendam biomasa dalam asam kuat seperti asam sulfat, asam hidroklorida, asam perklorat, atau campuran asam organik seperti asam format dan asam asetat. Pretreatmen asam bertujuan untuk mengurangi ukuran kandungan selulosa dan hemiselulosa pada biomassa. Pretreatmen asam juga dapat meningkatkan ketersediaan gula untuk proses fermentasi selanjutnya.

Penggunaan reagen asam diketahui efektif dalam produksi selulosa, karena sangat efektif dalam menurunkan/menghilangkan komponen hemiselulosa dan lignin. Struktur kaku lignoselulosa dapat dipecah dengan reagen asam ini sehingga enzim selulose dapat dengan mudah menjangkau struktur selulosa. Reagen yang dapat digunakan pada pretreatmen asam termasuk asam pekat atau asam encer. Asam sulfat (H_2SO_4) dan asam klorida (HCl), merupakan jenis yang paling sering digunakan. Termasuk juga asam organik seperti asam nitrat (HNO_3), asam fosfat (H_3PO_4), asam asetat, dan asam maleat. Asam organik juga diungkap lebih efektif dalam aksesibilitas pada luas permukaan substrat, solubilisasi

hemiselulosa dan lignin, serta mengalterasi struktur lignin anorganik.

Disisi lain penerapan pretreatmen asam menggunakan reagen asam encer lebih digemari untuk pretreatmen lignoselulosa. Hal ini berkaitan dengan nilai ekonomi yang dimilikinya karena dapat di produksi skala besar. Selain itu juga efektif diterapkan dalam hal efisiensi waktu karena prosesnya dapat menggunakan suhu tinggi. Prinsip dari pretreatmen ini adalah mengkonversi hemiselulosa yang larut menjadi gula. Asam encer juga efektif dalam meningkatkan kandungan selulosa, tetapi kurang efektif dalam menghilangkan lignin dibandingkan metode basa.

Namun terdapat beberapa kelemahan penggunaan pretreatmen dengan reagen asam, karena meninggalkan residu selama proses. Penggunaan asam pekat pada pretreatmen lignoselulosa juga dapat meningkatkan senyawa inhibisi dalam produski bioetanol. Selain munculnya reaksi samping yaitu terbentuknya furfural dan menimbulkan korosi pada peralatan yang digunakan, serta sulit dilakukannya *recovery* asam. Pretreatmen asam juga dinilai mahal secara tidak menguntungkan secara ekonomi.

2. Pretreatmen Basa

Seperti halnya pretreatmen asam, pada pretreatmen basa biomassa direndam dalam larutan basa seperti natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), atau amonium hidroksida (NH₄OH). Pretreatmen basa bertujuan untuk mengubah struktur kimia dan fisik dari lignoselulosa. Pretreatmen basa dapat meningkatkan ketersediaan gula untuk proses fermentasi selanjutnya.

Pretreatmen basa atau menggunakan reagen basa terhadap biomasa lignoselulosa diketahui berhubungan dengan kemampuannya dalam mendekristalisasi selulosa secara parsial. Hal tersebut terjadi karena perubahan struktur lignin akibat degradasi yang terjadi pada ester dan glikosidik. Banyaknya hemiselulosa dan lignin yang larut akibat pretreatmen basa karena kemampuannya mempengaruhi kerja dinding sel

lignoselulosa. Dekristalisasi selulosa yang menyebabkan putusny ikatan α -eter antara lignin dan hemiselulosa juga efektif pada penggunaan pretreatmen basa. Natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), kalsium hidroksida (Ca (OH)₂), atau amonium hidroksida (NH₄OH), merupakan larutan yang sering digunakan pada metode ini.

Berdasarkan cara kerja pretreatmen basa di atas aplikasi pretreatmen basa pada biomasa lignoselulosa lebih efisien dalam mengurangi/menghilangkan kadar hemiselulosa dan lignin. Mekanismenya dengan memisahkan antara ikatan α -aril eter dan β -aril eter pada lignin dan glikosida dalam hemiselulosa. Pretreatmen basa dengan menggunakan berbagai konsentrasi NaOH juga terbukti meningkatkan kemampuan delignifikasi ekstrak batang bambu seiring meningkatnya konsentrasi yang digunakan.

3. Pretreatmen Oksidatif

Penerapan metode ini dengan merendam biomassa dalam larutan oksidan seperti peroksida hidrogen atau asam nitrat. Pretreatmen oksidatif bertujuan untuk memecah ikatan lignin dan selulosa pada biomassa. Pretreatmen oksidatif juga dapat meningkatkan ketersediaan gula untuk proses fermentasi selanjutnya. Seperti kelemahan utama dari metode pretreatmen secara kimia, pretreatmen oksidatif juga memiliki kekurangan terkait penggunaan biaya yang tinggi dan pembentukan produk samping yang berbahaya bagi lingkungan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan efektivitas dari metode pretreatment kimia yang berbeda pada biomassa lignoselulosa. Misalnya, penelitian menunjukkan bahwa pretreatment asam dan pretreatment basa adalah metode yang paling efektif untuk meningkatkan ketersediaan gula pada biomassa lignoselulosa. Sementara itu, penelitian lain mengungkapkan bahwa pretreatment oksidatif juga dapat meningkatkan efisiensi degradasi lignoselulosa menjadi produk bioenergi.

7.23 Pretreatmen Biologi

Karena pengaruh besar pretreatmen pada teknologi hilir, dari perspektif ekonomi secara keseluruhan, karakteristik ramah lingkungan membuat pretreatmen biologis menonjol. Istilah 'pretreatmen atau pretreatment' mengacu pada proses penghilangan lignin dari bahan lignoselulosa untuk aksesibilitas ke komponen polisakarida dan tidak boleh disamakan dengan sakarifikasi enzim yang mengacu pada penggunaan enzim selulolitik dan/atau hemiselulolitik untuk menghasilkan gula sederhana dari selulosa dan hemiselulosa. Pretreatmen biologis dilakukan oleh organisme pengurai lignin, termasuk *Basidiomycota*, melalui enzim ligninolitik (LE). Enzim pengoksidasi ini memutus ikatan heteropolimer lignin, sehingga menciptakan pori atau retakan, di mana enzim hidrolitik (selulolitik dan hemiselulolitik) dapat mengakses lapisan polisakarida lignoselulosa.

Pretreatmen biologis memecah lignin oleh mikroba dengan energi rendah dan tanpa bahan kimia; namun pretreatment ini lambat, dan sulit untuk mengontrol kondisi mikroba selama proses. Sejumlah besar mikroorganisme di alam dapat diterapkan menggunakan pretreatment secara biologis. Kemampuan degradasi mikroorganisme terutama berasal dari sistem enzimatisnya yang unik. Selama degradasi, struktur limbah pertama-tama didekomposisi menjadi monomer sederhana sebagai persiapan untuk mengubahnya menjadi konfigurasi yang berbeda. Pretreatment biologis adalah penerapan bakteri aerobik, enzim, atau jamur untuk degradasi lignin sehingga proses konversi bahan lignoselulosa dengan mudah menjadi produk yang dapat digunakan. Metode pretreatment ini ramah lingkungan, tidak membuang zat beracun ke lingkungan, mengkonsumsi sedikit energi, dan menghasilkan sedikit atau tidak ada inhibitor.

1. Pretreatment dengan Fungi

Pretreatment dengan fungi adalah salah satu bentuk metode pretreatment biologis seperti jamur pelapuk putih, jamur pelapuk coklat, jamur pelapuk lunak, dan jamur lainnya digunakan untuk mendegradasi lignin. Dalam banyak kasus, jamur pelapuk putih yang termasuk dalam kelas *Basidiomycetes*, *Phanerochaete chrysosporium* digunakan untuk biodegradasi lignin.

Memanfaatkan jamur pelapuk putih *Peniophora incarnata* untuk pretreatmen limbah kayu menghasilkan penurunan komposisi hemiselulosa dan lignin masing-masing sebesar 48% dan 70%. Berbeda dengan metode pretreatmen fisik dan kimia, pretreatmen jamur tidak memerlukan penggunaan mesin atau bahan kimia apapun. Efisiensi pretreatmen jamur ditentukan oleh kadar air dan ukuran partikel bahan baku, suhu reaksi, dan waktu tinggal. Jamur pelapuk putih yang mendegradasi lignin, dari *Basidiomycota*, memiliki enzim kuat yang dirancang untuk menghilangkan lignin. Dikenal sebagai enzim ligninolitik dan merupakan lignin peroksidase, peroksidase mangan, peroksidase serbaguna dan lakase. Enzim ini bersifat oksidatif. Banyak enzim aksesori seperti aril alkohol oksidase, gliksal oksidase, dll., bekerja sama dengan enzim ligninolitik untuk meningkatkan delignifikasi. Jamur pelapuk putih melakukan solubilisasi lignin, melibatkan pembentukan fragmen yang larut dalam air dan mineralisasi dengan pelepasan CO₂.

Adapun ragi, strain dari *Pichia* dan *Candida* dikenal sebagai fermentasi pentosa. Sebagian besar ragi yang menggunakan xylosa asli, termasuk ragi yang mewakili *Scheffersomyces stipis*, *Candida shehatae*, dan *Spathaspora passalidarum*, mengubah xylosa menjadi xilulosa melalui jalur oksidoreduktase yang terdiri dari xylosa reduktase dan xylosa dehidrogenase. Ragi, jamur bersel tunggal yang bereproduksi dengan tunas, menunjukkan kekokohan dan ketahanan terhadap pH rendah, tekanan osmotik tinggi, dan infeksi fag yang merupakan faktor umum dalam pengaturan fermentasi industri.

2. Pretreatmen dengan Bakteri

Pretreatmen yang melibatkan penggunaan bakteri, yaitunya pemanfaatan bakteri penghasil enzim. Beberapa penelitian terkait hal tersebut, diantaranya pemanfaatan bakteri selulolitik *Acetobacter orientalis* untuk mencapai efisiensi degradasi selulosa pada limbah pisang, yaitu sekitar 76,24%. Batang jagung yang diberi perlakuan dengan *Bacillus subtilis* untuk memastikan dekomposisi lignin dan menurunkan kristalinitas enzim selulosa. Enzim seperti selulase dan

hemiselulosa mampu mengolah limbah pertanian dan biomassa lignoselulosa lainnya. Penelitian lain yang memanfaatkan limbah pertanian seperti ampas singkong, ampas tebu, brangkasan jagung, rumput gajah, jerami padi dan sebagainya telah diberi pretreatmen menggunakan bakteri untuk meningkatkan efisiensi konversinya dalam produksi biobutanol.

Dalam beberapa tahun terakhir, *Pseudomonas putida* telah muncul sebagai organisme inang yang menjanjikan untuk valorisasi biomassa tanaman karena toleransinya yang luar biasa terhadap xenobiotic dan industri pelarut ketahanan stres oksidatif dan kemampuan untuk memanfaatkan aromatik turunan lignin dengan cepat. *Pseudomonas putida* adalah bakteri gram-negatif, berbentuk batang, serta banyak ditemui di lingkungan.

7.3 Hidrolisis

Setelah proses pretreatmen pada biomassa lignoselulosa, tahapan selanjutnya adalah hidrolisis. Hidrolisis adalah proses penguraian senyawa kompleks seperti selulosa dan hemiselulosa menjadi gula-gula sederhana seperti glukosa dan xilosa. Hidrolisis pada biomassa lignoselulosa dapat dilakukan dengan menggunakan enzim atau asam. Pada hidrolisis enzimatik, enzim yang digunakan adalah enzim selulase atau enzim hemiselulase. Sedangkan pada hidrolisis asam, asam yang digunakan adalah asam sulfat atau asam klorida.

Hidrolisis enzimatik memiliki beberapa keuntungan seperti selektivitas yang tinggi, produk samping yang sedikit, dan ramah lingkungan. Namun, hidrolisis enzimatik juga memiliki beberapa kekurangan seperti biaya yang tinggi dan waktu reaksi yang lama. Sementara itu, hidrolisis asam memiliki keuntungan seperti waktu reaksi yang singkat dan efisiensi hidrolisis yang tinggi. Namun, hidrolisis asam juga memiliki kekurangan seperti produk samping yang berbahaya bagi lingkungan dan kerusakan pada gula hasil hidrolisis.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan efektivitas dari metode hidrolisis yang berbeda pada biomassa lignoselulosa. Misalnya, penelitian yang menunjukkan bahwa hidrolisis enzimatik dan asam sulfat adalah metode yang paling efektif untuk meningkatkan ketersediaan gula pada biomassa lignoselulosa.

Sementara itu, penelitian lain mengungkapkan bahwa hidrolisis enzimatik juga dapat meningkatkan efisiensi produksi gula dari biomassa lignoselulosa.

1. Hidrolisis asam

Hidrolisis asam menggunakan asam kuat seperti asam sulfat, asam hidroklorida, atau asam trifluoroasetat untuk menguraikan selulosa dan hemiselulosa pada biomassa menjadi gula-gula sederhana seperti glukosa dan xilosa. Hidrolisis asam memiliki keuntungan waktu reaksi yang singkat dan efisiensi hidrolisis yang tinggi. Namun, hidrolisis asam juga memiliki kekurangan seperti pembentukan produk samping yang berbahaya bagi lingkungan dan kerusakan pada gula hasil hidrolisis.

2. Hidrolisis enzimatik

Hidrolisis enzimatik menggunakan enzim selulase atau hemiselulase untuk menguraikan selulosa dan hemiselulosa pada biomassa menjadi gula-gula sederhana seperti glukosa dan xilosa. Hidrolisis enzimatik memiliki keuntungan selektivitas yang tinggi, produk samping yang sedikit, dan ramah lingkungan. Namun, hidrolisis enzimatik juga memiliki kekurangan seperti biaya yang tinggi dan waktu reaksi yang lama.

3. Hidrolisis asam enzimatik

Hidrolisis asam enzimatik menggunakan kombinasi asam dan enzim untuk menguraikan selulosa dan hemiselulosa pada biomassa menjadi gula-gula sederhana seperti glukosa dan xilosa. Hidrolisis asam enzimatik memiliki keuntungan efisiensi hidrolisis yang tinggi dan waktu reaksi yang singkat. Namun, hidrolisis asam enzimatik juga memiliki kekurangan seperti biaya yang tinggi dan pembentukan produk samping yang berbahaya bagi lingkungan.

Meskipun terdapat berbagai metode hidrolisis yang dapat digunakan pada biomassa lignoselulosa, pilihan metode yang tepat tergantung pada kondisi dan sifat biomassa, serta tujuan dari proses hidrolisis tersebut. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan efektivitas dari metode hidrolisis yang berbeda pada biomassa lignoselulosa.

DAFTAR PUSTAKA

- Abolore, R.S., Jaiswal, S., Jaiswal, A.K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Journal of Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, (7). <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>.
- Awogbemi, O., & Kallon, D. V. Von. (2022a). Pretreatment techniques for agricultural waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229>.
- Awogbemi, O., & Kallon, D. V. Von. (2022b). Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. *Heliyon*, 8(10), e11117. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>.
- Beluhan, B., S., Mihajlovski, K., Šantek, B., Šantek, M.I. (2023). The production of bioethanol from lignocellulosic biomass: pretreatment methods, fermentation, and downstream processing. *Journal of Energies*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/en16197003>.
- Bhushan, S., Jayakrishnan, U., Shree, B., Bhatt, P., Eshkabilov, S., Simsek, H. 2023. Biological pretreatment for algal biomass feedstock for biofuel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109870>.
- de Souza, L., Manasa, Y., & Shivakumar, S. (2020). Bioconversion of lignocellulosic substrates for the production of polyhydroxyalkanoates. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101754>.
- Dharmaraja, J., Shobana, S., Arvindnarayan, S., Francis, R.R., Jeyakumar, R.B., Saratale, R.G., Ashokkumar, V., Bhatia, S.K., Kumar, V., Kumar, G. (2023). Lignocellulosic biomass conversion *via* greener pretreatment methods towards biorefinery applications. *Journal of Bioresource and Technology*, (369). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128328>.
- Elmore, J. R., Dexter, G. N., Salvachúa, D., O'Brien, M., Klingeman, D. M., Gorday, K., Michener, J. K., Peterson, D. J., Beckham, G. T., &

- Guss, A. M. (2020). Engineered *Pseudomonas putida* simultaneously catabolizes five major components of corn stover lignocellulose: Glucose, xylose, arabinose, p-coumaric acid, and acetic acid. *Metabolic Engineering*, 62, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2020.08.001>.
- Estrada-Ávila, A. K., González-Hernández, J. C., Calahorra, M., Sánchez, N. S., & Peña, A. (2022). Xylose and yeasts: A story beyond xylitol production. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1866(8). <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2022.130154>.
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquett, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., & Frey, W. (2016). Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/S13068-016-0508-Z/FULLTEXT.HTML>
- Juliastuti, S.R., Hendrianie, N., Sabar, K.R., Anggita, S. (2022). Glucose production from oil palm empty fruit bunch (OPEFB) using microwave and fungal treatment method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (963), International Bioprocessing Association Subject Conference (IBASC 2021) 4th–5th, Yogyakarta, Indonesia.
- Jose, D., Kitiborwornkul, N., Sriariyanun, M., Keerthi, K. (2022). A Review on Chemical Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass: Recent Advances and Progress. *Journal of Applied Science and Engineering Progress*, 15 (4). <https://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/ijst/article/view/6210>.
- Kaur, P., Bohidar, H.B., Pfeffer, F.M., Williams, R., Agrawal, R. (2023). A comparative assessment of biomass pretreatment methods for the sustainable industrial upscaling of rice straw into cellulose. *Journal of modern aspects of electrochemistry*, 30. Pages 4247–4261. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-023-05161-4>.
- Keshav, P. K., Banoth, C., Kethavath, S. N., & Bhukya, B. (2021). Lignocellulosic ethanol production from cotton stalk: an overview on pretreatment, saccharification and fermentation methods for improved bioconversion process. *Biomass*

- Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01468-Z/FULLTEXT.HTML>
- Kim, T. H., & Kim, T. H. (2014). Overview of technical barriers and implementation of cellulosic ethanol in the U.S. *Energy*, *66*, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.008>.
- Kubde, N.A., Gulhane, N.P., Taler, J., Taler, D. (2023). A comparative study between the conventional and advanced biomass pretreatment methods applied on the *Napier Grass* used as a biomass. *Journal of Cleaner Engineering and Technology*, (17). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100694>.
- Kwak, S., Jo, J. H., Yun, E. J., Jin, Y. S., & Seo, J. H. (2019). Production of biofuels and chemicals from xylose using native and engineered yeast strains. In *Biotechnology Advances* (Vol. 37, Issue 2, pp. 271–283). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.12.003>.
- Li, H., Wang, X., Liu, C., Ren, J., Zhao, X., & Sun, R. (2016). An efficient pretreatment for the selectively hydrothermal conversion of corncob into furfural: The combined mixed ball milling and ultrasonic pretreatments. *Industrial Crops and Product*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669016306513>.
- Li, J., Liu, B., Liu, L., Luo, Y., Zeng, F., Qin, C., Liang, C., Huang, C., Yao, S. 2023. Pretreatment of poplar with eco-friendly levulinic acid to achieve efficient utilization of biomass. *Journal of Bioresource Technology*, 376. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085242300281X?via%3Dihub>.
- Li, R., Zheng, Y., Zhao, X., Yong, Q., Meng, X., Ragauskas, A and Huang, C. 2023. Recent Advances in Biomass Pretreatment using Biphasic Solvent Systems. *Journal Green Chemistry*.
- Li, X., Jia, P., & Wang, T. (2016). Furfural: A Promising Platform Compound for Sustainable Production of C4 and C5 Chemicals. *ACS Catalysis*. <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b01838>.
- Liu, X., Gao, F., Wang, Y., Zhang, J., Bai, Y., Zhang, W., Luo, H., Yao, B., Wang, Y., Tu, T. (2024). Characterization of a novel thermostable α -L-arabinofuranosidase for improved synergistic effect with xylanase on lignocellulosic biomass

- hydrolysis without prior pretreatment. *Journal of Bioresource Technology*, (394). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130177>.
- Maftucha, N, Amelia, R, Syafriana. 2022. Efisiensi *Pretreatment* dalam Pengolahan Bambu Menjadi Bioetanol. Kumpulan Karya Tulis Ilmiah Tingkat Nasional. Institut Teknologi Telkom Surabaya.
- Manmai, N, Unpaprom, Y., & Ramaraj, R. (2021). Bioethanol production from sunflower stalk: application of chemical and biological pretreatments by response surface methodology (RSM). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), 1759–1773. <https://doi.org/10.1007/S13399-020-00602-7/FULLTEXT.HTML>
- Mikulski, D & Klosowski, G. (2023). High-pressure microwave-assisted pretreatment of softwood, hardwood and non-wood biomass using different solvents in the production of cellulosic ethanol. *Journal of Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16. <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-023-02272-9>.
- Modenbach, A. A. (2012). The use of high-solids loadings in biomass pretreatment—a review. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(6), 1430–1442. <https://doi.org/10.1002/bit.24464>.
- Mohammed, A, Mojovic, L, Mladenovic, D. (2023). Effect of microwave pretreatment on lignocellulosic degradation of corn cob. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(03), 468–483. Science and Technology. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.3.1757>.
- Nwaezeapu, A.O., & Agbozu, I.E. (2023). Proximate and compositional assessment of pretreatment methods on selected lignocellulose biomass for biogas production. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17(5). <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/258085>.
- Pawłowska, M, Zdeb, M, Nieścioruk, M. (2023). Efficiency of Chemical Pretreatment of Sugar Beet Pulp Biomass Intended to Energy Production via Biological Processes. *Journal of Energies*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/en16020574>.
- Peter, S, Oberhettinger, P., Schuele, L, Dinkelacker, A, Vogel, W, Dörfel, D, Bezdan, D, Ossowski, S, Marschal, M, Liese, J., & Willmann, M. (2017). Genomic characterization of clinical and environmental *Pseudomonas putida* group strains and

- determination of their role in the transfer of antimicrobial resistance genes to *Pseudomonas aeruginosa*. BMC Genomics, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-017-4216-2>.
- Phuttaro, C. (2019). Anaerobic digestion of hydrothermally-pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield. *Bioresource Technology*, 284, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.114>.
- Putranto, A. W., Abida, S. H., & Adrebi, K. (2021). Lignocellulosic analysis of corncob biomass by using non-thermal pulsed electric field-NaOH pretreatment. Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019). <https://doi.org/10.2991/aer.k.210603.049>.
- Rahmani, A.M., Gahlot, P., Moustakas, K., Kazmi, A.A., Ojha, C.S.P., Tyagi, V.K. (2022). Pretreatment methods to enhance solubilization and anaerobic biodegradability of lignocellulosic biomass (wheat straw): Progress and challenges. *Journal of Fuel*, (319). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123726>.
- Santucci, B. S., Maziero, P., Rabelo, S. C., Curvelo, A., & Pimenta, M. T. (2015). Autohydrolysis of Hemicelluloses from Sugarcane Bagasse During Hydrothermal Pretreatment: A Kinetic Assessment. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9632-z>.
- Sharma, A., Sharma, T., Sharma, T., Sharma, S. (2019). Role of microbial hydrolases in bioremediation. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9117-0_7.
- Shi, Z., Yang, Q., Kuga, S., & Matsumoto, Y. (2015). Dissolution of wood pulp in aqueous NaOH/urea solution via dilute acid pretreatment. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01714>.
- Sinitsyn, A. P., & Sinitsyna, O. A. (2021). Bioconversion of renewable plant biomass. second-generation biofuels: Raw materials, biomass pretreatment, enzymes, processes, and cost analysis. *Biochemistry (Moscow)*, 86, S166–S195. <https://doi.org/10.1134/S0006297921140121/FULLTEXT.HTML>.
- Sukardi, S., Pranowo, D., & Safitri, P. (2022). Modelling of pulsed electric field (pef) pretreatment on fresh moringa oleifera leaves extraction using response surface methodology (RSM).

- Industria: Jurnal Teknologi Dan Manajemen Agroindustri, *11*(2), 101–106. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2022.011.02.2>.
- Wang, G., Jia, W., Chen, N., Zhang, K., Wang, L., Lv, P., He, R., Wang, M., & Zhang, D. (2018). A GFP-fusion coupling FACS platform for advancing the metabolic engineering of filamentous fungi. *Biotechnology for Biofuels*, *11*(1). <https://doi.org/10.1186/S13068-018-1223-8>.
- Wu, S., Tian, J., Xie, N., Adnan, M., Wang, J., & Liu, G. (2022). A sensitive, accurate, and high-throughput gluco-oligosaccharide oxidase-based HRP colorimetric method for assaying lytic polysaccharide monooxygenase activity. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *15*(1). <https://doi.org/10.1186/S13068-022-02112-2>.
- Xu, Y., Sun, S-C., Zhang, C., Ma, C-Y., Wen, J., Yuan, T. (2022). Complete valorization of bamboo biomass into multifunctional nanomaterials by reactive deep eutectic solvent pretreatment: Towards a waste-free biorefinery. *Journal of SSRN*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4310478.

BAB 8

FERMENTASI DAN PEMURNIAN

Oleh Kavadya Syska

8.1 Pendahuluan

Fermentasi adalah proses biokimia yang melibatkan konversi substrat organik menjadi produk tertentu oleh mikroorganisme, seperti ragi, bakteri, atau jamur. Dalam bidang teknologi bioenergi, fermentasi memiliki beberapa tujuan utama, yang berkaitan dengan efisiensi produksi bahan bakar hayati, pemanfaatan biomassa, dan keberlanjutan energi.



Gambar 8.1. Produk dalam proses fermentasi

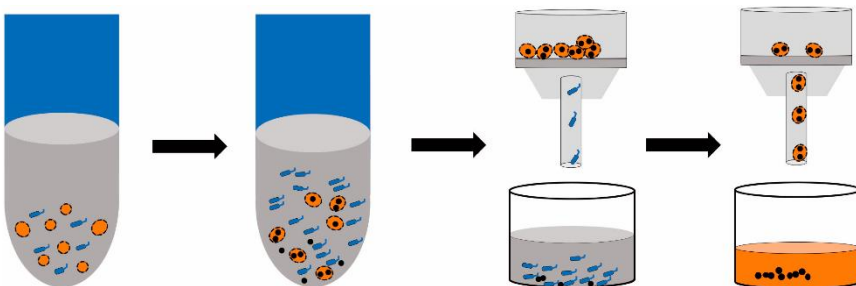
Tujuan utama dari fermentasi dalam rekayasa bioenergi adalah menghasilkan bahan bakar hayati seperti bioetanol, biobutanol, dan biogas. Proses ini mengubah biomassa, termasuk gula sederhana, pati, atau selulosa, menjadi senyawa yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif. Berikut penjelasan lebih detail tentang beberapa produk bahan bakar hayati:

1. Bioetanol: Dihasilkan dari fermentasi gula oleh ragi (*Saccharomyces cerevisiae*), bioetanol digunakan sebagai bahan bakar cair yang dapat dicampur dengan bensin untuk

menghasilkan campuran bahan bakar yang lebih ramah lingkungan. Bioetanol berasal dari sumber terbarukan seperti tebu, jagung, atau sereal, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

2. Biobutanol: Fermentasi oleh spesies bakteri seperti *Clostridium acetobutylicum* menghasilkan biobutanol, yang memiliki keunggulan lebih dibandingkan bioetanol karena memiliki kandungan energi yang lebih tinggi dan dapat dicampur dalam proporsi lebih besar dengan bensin tanpa modifikasi mesin yang signifikan.
3. Biogas: Dihasilkan melalui fermentasi anaerob oleh mikroorganisme metanogenik yang memecah bahan organik (limbah pertanian, kotoran ternak, atau sisa makanan) menjadi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Biogas dapat digunakan sebagai energi untuk listrik, pemanas, atau sebagai bahan bakar kendaraan setelah dimurnikan.

Pemurnian merupakan langkah kritis dalam proses produksi bioenergi setelah fermentasi, di mana produk utama, seperti bioetanol, biobutanol, atau biogas, dipisahkan dari campuran hasil fermentasi yang mungkin mengandung air, produk sampingan, dan senyawa pengotor lainnya. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kemurnian produk akhir sehingga memenuhi standar kualitas yang diinginkan untuk aplikasi komersial, seperti bahan bakar atau energi terbarukan. Pemurnian juga penting untuk mengoptimalkan efisiensi konversi energi, meningkatkan stabilitas penyimpanan, dan memperbaiki performa penggunaan energi.



Gambar 8.2. Proses pemurnian

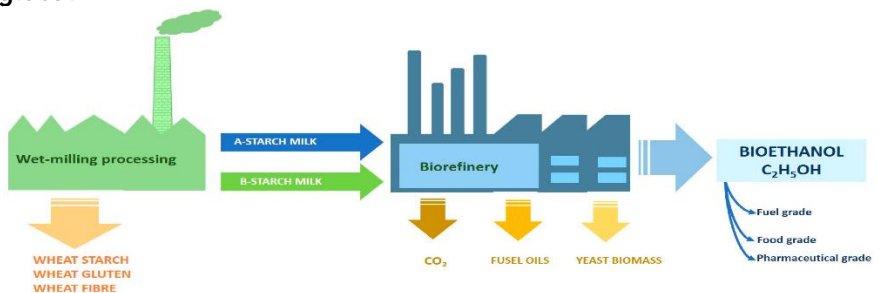
Pemurnian bertujuan memisahkan produk utama dari produk sampingan dan senyawa pengotor lainnya, memastikan bioenergi yang dihasilkan memenuhi standar kualitas yang diinginkan. Dalam bab ini, kita akan membahas secara rinci tentang prinsip, tahapan, dan teknologi yang digunakan dalam proses fermentasi dan pemurnian untuk bioenergi.

8.2 Prinsip Dasar Fermentasi

Fermentasi merupakan proses metabolik di mana organisme mengonversi karbohidrat, seperti glukosa, menjadi energi tanpa memerlukan oksigen (proses anaerob). Beberapa tipe fermentasi yang relevan dalam produksi bioenergi meliputi fermentasi alkohol, fermentasi butanol, dan fermentasi metana. Setiap jenis fermentasi memiliki mikroorganisme spesifik dan kondisi lingkungan berbeda.

8.2.1 Fermentasi Alkohol (Bioetanol)

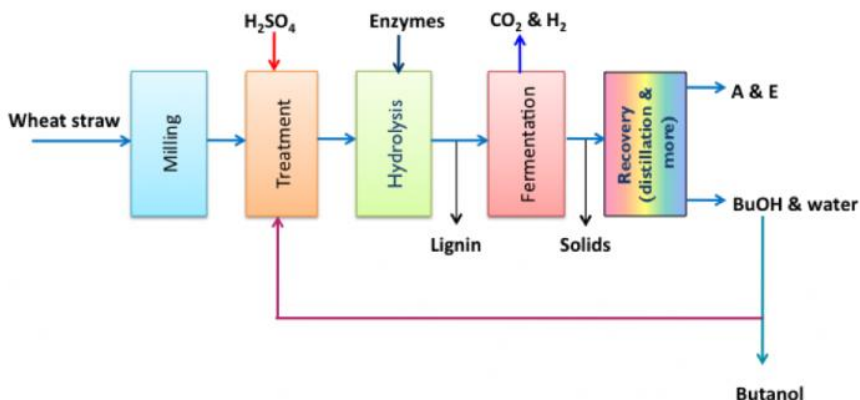
Fermentasi alkohol atau fermentasi bioetanol merupakan proses biokimia yang menggunakan mikroorganisme seperti ragi (misalnya *Saccharomyces cerevisiae*) untuk mengubah gula sederhana, terutama glukosa, menjadi etanol dan karbon dioksida dalam kondisi anaerob. Bioetanol yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar terbarukan yang ramah lingkungan, terutama sebagai pengganti atau campuran untuk bahan bakar fosil seperti bensin. Proses ini sangat penting dalam industri bioenergi karena bioetanol merupakan energi hayati paling umum digunakan secara global.



Gambar 8.3. Proses fermentasi alkohol (bioetanol)

8.2.2 Fermentasi Butanol (Biobutanol)

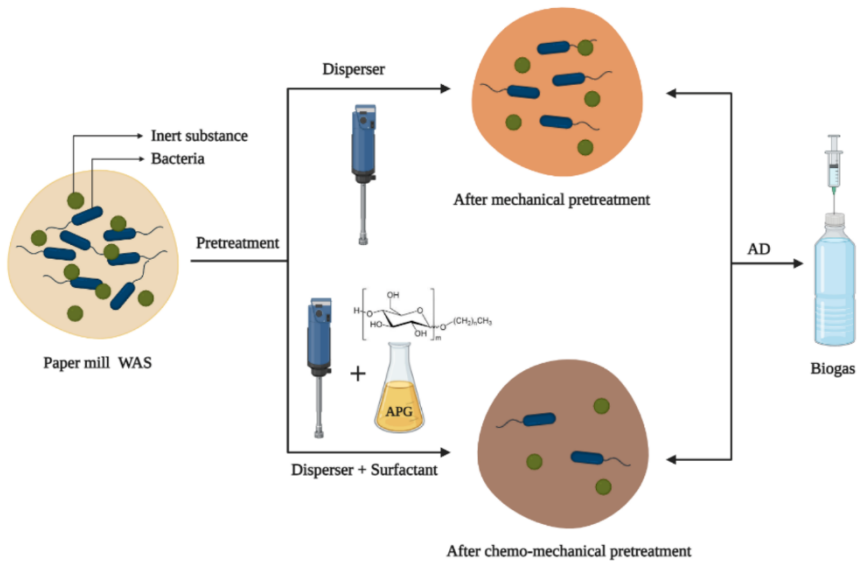
Fermentasi butanol atau yang juga dikenal dengan fermentasi ABE (*Aceton-Butanol-Ethanol*), adalah proses biokimia di mana mikroorganisme, terutama *Clostridium acetobutylicum*, mengubah karbohidrat (glukosa) menjadi produk utama berupa butanol, dengan hasil sampingan berupa aseton dan etanol. Proses fermentasi ini semakin menarik perhatian karena butanol memiliki potensi yang lebih baik sebagai bahan bakar dibandingkan dengan bioetanol. Butanol memiliki densitas energi yang lebih tinggi, volatilitas yang rendah, dan kemampuan untuk bercampur dengan bahan bakar fosil tanpa modifikasi signifikan pada mesin kendaraan.



Gambar 8.4. Proses fermentasi butanol (biobutanol)

8.2.3 Fermentasi Metana (Biogas)

Fermentasi metana atau lebih dikenal dengan proses digesti anaerob, merupakan salah satu metode biologis penting untuk memproduksi biogas, campuran yang kaya akan metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂). Proses ini melibatkan dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme anaerob (tanpa oksigen) yang menghasilkan biogas sebagai produk utama, bersama dengan limbah organik yang dapat digunakan sebagai pupuk. Fermentasi metana banyak digunakan dalam skala industri maupun rumah tangga sebagai sumber energi terbarukan dari limbah organik.



Gambar 8.5. Proses fermentasi metana (biogas)

8.3 Tahapan dalam Proses Fermentasi

Fermentasi terdiri dari beberapa tahapan penting, yang masing-masing harus dikendalikan untuk memastikan hasil yang optimum:

1. **Persiapan Substrat:** Bahan baku (biomassa) harus diperlakukan terlebih dahulu agar mikroorganisme dapat mengakses substrat yang diinginkan. Contohnya, untuk lignoselulosa, diperlukan proses pretreatment seperti hidrolisis enzimatis.
2. **Inokulasi Mikroorganisme:** Mikroorganisme yang telah dipilih dimasukkan ke dalam media fermentasi, di mana substrat organik akan diubah menjadi bioenergi.
3. **Fermentasi:** Proses fermentasi berlangsung dalam bioreaktor dengan kontrol ketat terhadap suhu, pH, oksigen (untuk proses aerob), dan waktu fermentasi.
4. **Pengendalian dan Optimasi:** Monitoring kondisi lingkungan selama fermentasi diperlukan untuk memastikan mikroorganisme bekerja secara optimum dan menghindari terjadinya inhibisi.

8.3.1 Persiapan Substrat

Persiapan substrat adalah tahap awal yang sangat penting dalam proses fermentasi, terutama dalam teknologi bioenergi. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa bahan baku, atau biomassa, siap digunakan oleh mikroorganisme yang akan menjalankan proses fermentasi. Agar mikroorganisme dapat mengakses substrat dengan efisien, biomassa harus diproses sedemikian rupa sehingga komponen-komponen yang diinginkan, seperti gula sederhana, tersedia untuk dicerna oleh mikroorganisme.

8.3.2 Persiapan Substrat

Inokulasi mikroorganisme adalah tahap kedua dalam proses fermentasi, yang berfungsi untuk memperkenalkan mikroorganisme yang tepat ke dalam media fermentasi. Mikroorganisme ini bertugas untuk memecah substrat organik (seperti glukosa, pati, atau lignoselulosa) dan mengubahnya menjadi produk yang diinginkan, seperti bioenergi, alkohol, atau gas. Tahap inokulasi ini sangat penting karena mikroorganisme yang digunakan akan menentukan efektivitas fermentasi dan kualitas hasil akhir.

8.3.3 Persiapan Substrat

Fermentasi adalah tahap inti dalam proses fermentasi, di mana mikroorganisme mengonversi substrat organik menjadi produk yang diinginkan, seperti bioenergi (etanol, butanol, atau biogas) melalui reaksi metabolik. Proses ini berlangsung dalam bioreaktor, di mana berbagai kondisi lingkungan harus dikendalikan untuk memastikan hasil fermentasi yang optimum.

8.3.4 Pengendalian dan Optimasi

Pengendalian dan optimasi adalah langkah penting dalam proses fermentasi yang bertujuan untuk memastikan bahwa mikroorganisme dapat bekerja pada kondisi yang paling mendukung. Langkah ini melibatkan monitoring, analisis, dan penyesuaian parameter fermentasi untuk mencapai hasil yang optimum, baik dalam hal kuantitas maupun kualitas produk.

8.4 Pemurnian Produk Fermentasi

Setelah fermentasi selesai, produk yang dihasilkan harus dipisahkan dari campuran fermentasi. Pemurnian penting untuk menghasilkan bioenergi sesuai standar kualitas. Proses ini bisa mencakup metode pemisahan, seperti distilasi, membran, atau adsorpsi.

8.4.1 Distilasi

Distilasi adalah proses pemisahan komponen dari campuran cair berdasarkan perbedaan titik didih. Proses ini sangat umum digunakan dalam industri kimia, termasuk dalam pemurnian bioetanol dari campuran fermentasi. Dalam teknologi bioenergi, distilasi digunakan untuk memisahkan etanol dari air dan senyawa-senyawa lain yang dihasilkan selama fermentasi.

Distilasi merupakan metode utama dalam pemurnian bioetanol, etanol dan air dipisahkan berdasarkan perbedaan titik didih. Pada proses ini, etanol dipisahkan dari air dan komponen lainnya.

Proses Distilasi

1. Pemanasan: Campuran fermentasi (yang biasanya terdiri dari etanol, air, dan produk sampingan lainnya) dipanaskan dalam alat distilasi. Suhu harus dikontrol dengan hati-hati agar etanol dapat menguap tanpa merusak komponen lain.
2. Penguapan: Ketika campuran mencapai suhu titik didih etanol (sekitar 78 °C), etanol mulai menguap. Uap yang terbentuk mengandung etanol dengan konsentrasi lebih tinggi dibandingkan cairan yang tersisa.
3. Kondensasi: Uap yang terbentuk kemudian diarahkan ke kondensor, di mana ia didinginkan dengan menggunakan air atau media pendingin lainnya. Proses ini menyebabkan uap berubah kembali menjadi cairan.
4. Pengumpulan: Cairan yang terkondensasi (produk distilat) dikumpulkan. Produk ini mengandung etanol yang lebih murni dan dapat dipisahkan dari komponen yang tidak diinginkan.
5. Pengulangan: Jika diperlukan, proses distilasi dapat diulang untuk mencapai tingkat kemurnian yang lebih tinggi.

8.4.2 Pemurnian Butanol

Pemurnian butanol dari campuran fermentasi merupakan langkah krusial dalam proses produksi biobutanol. Butanol dihasilkan melalui fermentasi dengan menggunakan mikroorganisme seperti *Clostridium acetobutylicum*. Proses pemurnian butanol lebih kompleks dibandingkan dengan pemurnian etanol karena sifat fisik dan kimia yang berbeda, seperti titik didih dan perilaku azeotropik. Berikut adalah penjelasan mendetail mengenai pemurnian butanol.

Butanol dipisahkan menggunakan proses distilasi azeotropik atau ekstraksi cair-cair. Proses ini lebih kompleks dibandingkan etanol karena butanol memiliki sifat fisik yang berbeda.

Metode Pemurnian Butanol

1. Distilasi Azeotropik
 - a. Prinsip Dasar: Distilasi azeotropik adalah metode yang digunakan untuk memisahkan butanol dari air dan komponen lain dalam campuran fermentasi. Azeotrop adalah campuran dua atau lebih zat yang memiliki titik didih konstan yang tidak dapat dipisahkan oleh distilasi sederhana.
 - b. Proses: Proses distilasi azeotropik melibatkan penambahan agen pengering (seperti benzena atau cyclohexane) untuk membentuk azeotrop baru dengan butanol. Ketika campuran ini dipanaskan, azeotrop akan menguap, memungkinkan pemisahan butanol dari air dan produk sampingan lainnya.
 - c. Kondensasi: Uap yang terbentuk kemudian dikondensasikan untuk menghasilkan fraksi butanol yang lebih murni. Proses ini dapat diulang untuk meningkatkan kemurnian produk.
2. Ekstraksi Cair-Cair
 - a. Prinsip Dasar: Metode ekstraksi cair-cair melibatkan penggunaan pelarut organik yang tidak bercampur dengan air untuk mengekstraksi butanol dari campuran fermentasi.
 - b. Proses: Campuran fermentasi dicampurkan dengan pelarut organik, seperti etil asetat atau heksana. Butanol akan larut dalam pelarut organik, sementara air dan komponen lain tetap dalam fase cairan. Setelah pencampuran, fase pelarut organik dipisahkan dari fase air. Pelarut yang mengandung butanol kemudian akan mengalami proses pemisahan lebih lanjut, seperti distilasi, untuk mengekstraksi butanol dari pelarut.

- c. Keunggulan: Metode ini dapat lebih efektif dalam mendapatkan butanol murni dengan mempertimbangkan sifat pelarut yang digunakan dan kondisi operasional.
3. Pengendalian Proses
- a. Parameter yang Diperhatikan: Pengendalian suhu, tekanan, dan rasio pelarut sangat penting untuk memastikan efisiensi pemisahan. Pemantauan kondisi ini membantu menghindari terjadinya reaksi sampingan dan inhibisi dalam proses.
 - b. Monitoring Kualitas: Proses pemurnian harus diatur sedemikian rupa untuk menghasilkan butanol dengan kualitas tinggi yang sesuai untuk aplikasi sebagai bahan bakar. Uji kualitas seperti analisis gas kromatografi dapat digunakan untuk mengevaluasi kemurnian butanol yang dihasilkan.

8.4.3 Pemurnian Biogas

Pemurnian biogas merupakan proses penting yang dilakukan setelah fermentasi anaerob, di mana biogas mentah yang dihasilkan mengandung campuran gas, terutama metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), serta sejumlah kecil gas jejak seperti hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), dan uap air. Pemurnian bertujuan untuk meningkatkan kandungan metana dalam biogas, sehingga dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Biogas mentah yang dihasilkan dari fermentasi anaerob terdiri dari metana, CO_2 , dan beberapa gas jejak seperti H_2S . Pemurnian dilakukan dengan menghilangkan CO_2 dan H_2S menggunakan teknik seperti adsorpsi tekanan ayun (PSA) atau pencucian air.

Metode Pemurnian Biogas

Pemurnian biogas dapat dilakukan dengan berbagai metode, diantaranya:

1. Adsorpsi Tekanan Ayun (PSA)
 - a. Prinsip Dasar: Metode PSA menggunakan bahan adsorben yang dapat menyerap CO_2 dan H_2S pada tekanan tinggi. Saat tekanan dikurangi, gas-gas tersebut dilepaskan, memungkinkan regenerasi adsorben.
 - b. Proses: Tahap Adsorpsi: Biogas mentah dialirkan melalui kolom adsorpsi yang berisi adsorben seperti zeolit atau karbon

aktif. Di sini, CO_2 dan H_2S akan terperangkap, sementara metana akan melewati kolom. Tahap Regenerasi: Setelah saturasi adsorben, tekanan dikurangi untuk melepaskan gas-gas yang terperangkap, sehingga adsorben dapat digunakan kembali.

- c. Keunggulan: PSA memiliki keunggulan dalam efisiensi energi dan dapat menghasilkan metana dengan kemurnian tinggi.

2. Pencucian Air (*Water Scrubbing*)

- a. Prinsip Dasar: Metode ini melibatkan penggunaan air untuk melarutkan CO_2 dan H_2S dari biogas mentah. Karena CO_2 dan H_2S lebih larut dalam air dibandingkan metana, gas-gas tersebut dapat dipisahkan.
- b. Proses: Biogas mentah dialirkan melalui kolom pencuci yang berisi air. Selama proses ini, CO_2 dan H_2S akan larut dalam air, sementara metana tetap berada di fase gas. Air yang terkontaminasi dengan gas-gas terlarut kemudian dipisahkan, dan metana yang tersisa dapat diolah lebih lanjut.
- c. Keunggulan: Metode ini sederhana dan relatif murah, serta tidak memerlukan bahan kimia berbahaya.

2. Membran

- a. Prinsip Dasar: Teknologi membran menggunakan membran selektif untuk memisahkan gas-gas berdasarkan ukuran dan sifat permeabilitas. Membran dapat dirancang untuk memungkinkan metana melewati sementara menahan CO_2 dan gas lainnya.
- b. Proses: Biogas mentah dialirkan melalui membran yang dirancang khusus. Metana dapat melewati membran dengan cepat, sementara CO_2 dan H_2S terperangkap di sisi lain.
- c. Keunggulan: Proses ini dapat dilakukan pada kondisi suhu dan tekanan yang lebih rendah, serta memiliki footprint yang lebih kecil dibandingkan metode lainnya.

8.5 Teknologi Modern dalam Fermentasi dan Pemurnian

Kemajuan teknologi telah memungkinkan peningkatan efisiensi baik dalam proses fermentasi maupun pemurnian. Beberapa inovasi terbaru di bidang ini antara lain:

1. Fermentasi Berkelanjutan (Continuous Fermentation): Teknologi bioreaktor berkelanjutan memungkinkan fermentasi berjalan secara terus-menerus tanpa perlu menghentikan proses untuk pembuangan produk.
2. Teknologi Membran: Membran selektif digunakan dalam pemurnian bioetanol atau biobutanol, yang memisahkan komponen berdasarkan ukuran molekul atau sifat kimianya.
3. Penggunaan Enzim Rekayasa Genetik: Penggunaan mikroorganisme atau enzim yang direkayasa genetik telah membuka peluang untuk fermentasi lebih efisien dan penggunaan substrat yang lebih luas, seperti biomassa lignoselulosa yang sulit diolah.
4. Fermentasi Simultan: Teknologi ini memungkinkan produk fermentasi dihasilkan dalam satu proses, seperti etanol dan butanol, mengurangi biaya produksi dan pemurnian.

8.5.1 Fermentasi Berkelanjutan (*Continuous Fermentation*)

Fermentasi berkelanjutan merupakan inovasi penting dalam teknologi fermentasi yang memungkinkan proses berlangsung tanpa henti. Dalam sistem ini, bahan baku dimasukkan secara terus-menerus ke dalam bioreaktor, sementara produk yang dihasilkan dikeluarkan secara simultan. Metode ini memberikan keuntungan signifikan dibandingkan dengan fermentasi batch konvensional.

Aplikasi Fermentasi Berkelanjutan

Fermentasi berkelanjutan dapat diterapkan dalam berbagai industri, antara lain:

1. Produksi Bioetanol: Digunakan dalam industri biofuel untuk menghasilkan bioetanol dari bahan baku biomassa.
2. Produksi Biobutanol: Menerapkan teknologi ini untuk menghasilkan butanol sebagai bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan.
3. Produksi Biogas: Dapat digunakan dalam proses pembuatan biogas dari limbah organik, dengan memperbaiki efisiensi produksi gas.

8.5.2 Teknologi Membran

Teknologi membran merupakan salah satu inovasi terkini dalam proses pemurnian produk fermentasi, seperti bioetanol dan biobutanol. Proses ini melibatkan penggunaan membran selektif yang berfungsi sebagai pemisah antara berbagai komponen dalam campuran berdasarkan ukuran molekul, sifat kimia, atau interaksi fisik lainnya. Teknologi ini memiliki sejumlah keuntungan dan aplikasi yang luas dalam industri fermentasi.

Aplikasi Teknologi Membran

1. Pemurnian Bioetanol: Teknologi membran dapat digunakan untuk memisahkan etanol dari campuran fermentasi, meningkatkan kemurnian produk akhir. Selain itu, mengurangi kebutuhan untuk distilasi yang intensif energi.
2. Pemurnian Biobutanol: Memisahkan butanol dari larutan fermentasi dengan efisiensi tinggi. Selain itu, mengurangi biaya operasional dan meningkatkan hasil produk.
3. Pemisahan Limbah: Dapat diterapkan dalam pemisahan dan pemulihan komponen berharga dari limbah industri, termasuk produk sampingan dari fermentasi.
4. Desalinasi dan Pengolahan Air: Teknologi membran juga digunakan dalam desalinasi dan pengolahan air untuk menghasilkan air bersih dari sumber yang terkontaminasi.

8.5.3 Penggunaan Enzim Rekayasa Genetik

Penggunaan enzim hasil rekayasa genetik dalam proses fermentasi merupakan salah satu inovasi terkini yang berpotensi meningkatkan efisiensi produksi bioenergi. Teknologi ini tidak hanya memungkinkan konversi substrat yang lebih kompleks, seperti biomassa lignoselulosa, tetapi juga meningkatkan kecepatan dan hasil fermentasi. Berikut adalah penjelasan detail mengenai penerapan enzim rekayasa genetik dalam proses fermentasi.

Aplikasi Enzim Rekayasa Genetik dalam Fermentasi

1. Fermentasi Lignoselulosa: Enzim rekayasa yang dapat memecah lignin, selulosa, dan hemiselulosa memungkinkan pemanfaatan biomassa lignoselulosa secara efektif, yang sebelumnya merupakan tantangan dalam fermentasi. Contoh: Penggunaan

selulase dan hemiselulase yang dimodifikasi secara genetik untuk meningkatkan efisiensi hidrolisis.

2. **Produksi Bioetanol:** Enzim yang direkayasa untuk memecah pentosa dan heksosa secara bersamaan dalam proses fermentasi dapat meningkatkan produksi bioetanol dari biomassa campuran. Contoh: Mikroskopis yang telah dimodifikasi untuk mengkonversi glukosa dan xilosa menjadi etanol secara efisien.
3. **Fermentasi Butanol:** Penggunaan enzim yang dioptimumkan untuk produksi butanol dari sumber biomassa kompleks, seperti sisa pertanian. Contoh: Modifikasi genetik mikroorganisme penghasil butanol untuk meningkatkan daya saingnya dalam mengolah substrat yang kaya lignoselulosa.

8.5.4 Fermentasi Simultan

Fermentasi simultan adalah teknologi yang memungkinkan beberapa produk fermentasi dihasilkan dalam satu proses fermentasi tanpa perlu menghentikan atau memisahkan langkah-langkahnya. Teknologi ini berfokus pada konversi substrat menjadi berbagai produk secara bersamaan, yang dapat meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya operasional. Berikut adalah penjelasan mendetail mengenai fermentasi simultan.

Aplikasi Fermentasi Simultan

1. **Produksi Bioenergi:** Fermentasi simultan dapat digunakan untuk memproduksi campuran biofuel, seperti etanol dan butanol, dari substrat seperti limbah pertanian atau biomassa lignoselulosa. Contoh: Menggunakan strain *Clostridium acetobutylicum* untuk menghasilkan butanol dan etanol secara bersamaan dari glukosa atau bahan baku lainnya.
2. **Produksi Asam Organik:** Beberapa mikroorganisme dapat digunakan untuk menghasilkan asam organik, seperti asam asetat dan asam laktat, dalam satu proses fermentasi dari substrat yang sama. Contoh: Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* yang dimodifikasi untuk menghasilkan asam laktat dan etanol secara bersamaan.
3. **Fermentasi Campuran:** Teknologi ini juga dapat diterapkan dalam fermentasi yang lebih kompleks, di mana berbagai mikroorganisme

dapat diinkubasi bersamaan untuk menghasilkan produk yang berbeda, meningkatkan keragaman produk dan nilai tambah.

DAFTAR PUSTAKA

- Berenjian, A. ed., 2019. Essentials in fermentation technology. Basel: Springer.
- Berenjian, A. ed., 2019. Essentials in fermentation technology. Basel: Springer.
- Fernandes, N.D.A.T., Simões, L.A. and Dias, D.R., 2023. Biosurfactants produced by yeasts: fermentation, screening, recovery, purification, characterization, and applications. *Fermentation*, 9(3), p.207.
- Gurunathan, B. and Sahadevan, R. eds., 2022. Biofuels and Bioenergy: A Techno-Economic Approach. Elsevier.
- Hoppenreijts, L.J.G., Annibal, A., Vreeke, G.J.C., Boom, R.M. and Keppler, J.K., 2024. Food proteins from yeast-based precision fermentation: Simple purification of recombinant β -lactoglobulin using polyphosphate. *Food Research International*, 176, p.113801.
- Janah, S.N., Syska, K., Ropiudin, R. and Siswanto, S., 2024. Pendugaan Umur Simpan Teh Daun Beluntas (*Pluchea indica* L.) dan Rosella (*Hibiscus Sabdariffa*) dengan Metode ASLT (Accelerated Shelf Life Test) Model Arrhenius. *Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(8), pp.468–479.
- Kuila, A. and Sharma, V. eds., 2018. Principles and applications of fermentation technology. John Wiley & Sons.
- Li, Y. and Zhou, Y., 2022. Advances in bioenergy. Academic Press.
- Maddela, N.R., Aransiola, S.A., Ezugwu, C.I., Eller, L.K.W., Scalvenzi, L. and Meng, F. eds., 2024. Microbial Biotechnology for Bioenergy. Elsevier.
- Musa, S.I., Shehu, M.S., Ogala, H., Onukwu, I.S., Ebrahimbabaie, P., Okoji, C., Chidozie, E., Moses, N. and Ezinne, O.M., 2024. Global advances in bioenergy production technologies. In *Microbial Biotechnology for Bioenergy* (pp. 23–43). Elsevier.
- Nanda, S. and Dalai, A.K. eds., 2023. Biomass to Bioenergy: Modern Technological Strategies for Biorefineries. Elsevier.
- Oraby, A., Briem, A.K., Bippus, L., Rupp, S. and Zibek, S., 2024. Life cycle assessment as a driver for process optimisation of cellobiose

- lipids fermentation and purification. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp.1–20.
- Pandey, A, Negi, S. and Soccol, C.R. eds., 2016. *Current developments in biotechnology and bioengineering: production, isolation and purification of industrial products*. Elsevier.
- Patel, A.K, Dong, C.D., Chen, C.W., Pandey, A. and Singhanian, R.R., 2023. *Production, purification, and application of microbial enzymes*. In *Biotechnology of microbial enzymes* (pp. 25–57). Academic Press.
- Pessoa Jr, A., Kilikian, B.V. and Long, P. eds., 2024. *Purification of Biotechnological Products: A Focus on Industrial Applications*. CRC Press.
- Ramanujam, P.K, Parameswaran, B., Bharathiraja, B. and Magesh, A. eds., 2023. *Bioenergy: Impacts on Environment and Economy*. Springer Nature.
- Ramaswamy, S., Huang, H.J. and Ramarao, B.V. eds., 2013. *Separation and purification technologies in biorefineries*. John Wiley & Sons.
- Ramaswamy, S., Huang, H.J. and Ramarao, B.V. eds., 2013. *Separation and purification technologies in biorefineries*. John Wiley & Sons.
- Ropiudin, Rusman, Rachmanita, R.E., Budaraga, I.K., Rahmanto, D.E., Aprianto, M.C., Pramudibyo, S., & Prihandono, D.E. 2024. *Teknologi Energi Terbarukan*. CV Hei Publishing Indonesia.
- Shadangi, K.P., Sarangi, P.K., Mohanty, K., Deniz, I. and Gollakota, A.R.K. eds., 2023. *Bioenergy Engineering: Fundamentals, Methods, Modelling, and Applications*. Elsevier.
- Stanbury, P.F., Whitaker, A. and Hall, S.J., 2013. *Principles of fermentation technology*. Elsevier.
- Syska, K. and Ropiudin, R., 2020. Analisis Mutu Keripik Tempe Berdasarkan Cara Perekatan dan Ketebalan Pengemas Selama Penyimpanan. *Chemical Engineering Research Articles*, 3(1), pp.42–54.
- Syska, K. and Ropiudin, R., 2022. Development of Specialty Robusta Coffee with *Saccharomyces Cerevisiae* Fermentation to Improve Coffee Quality. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research*, 3(2), pp.77–91.

- Syska, K, Istiqomah, K and Ropiudin, R., 2023. Formulasi dan Karakterisasi Kopi Robusta Specialty dan Gula Kelapa Kristal untuk Meningkatkan Mutu Kopi Robusta Lokal. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, 2(1), pp.158-167.
- Todaro, C.M. and Vogel, H.C. eds., 2014. *Fermentation and biochemical engineering handbook*. William Andrew.
- Vogel, H.C. and Todaro, C.M., 1996. *Fermentation and biochemical engineering handbook: principles, process design and equipment*. William Andrew.

BAB 9

PENGOLAHAN BIOGAS

Oleh I Ketut Budaraga

9.1 Pendahuluan

Pertumbuhan penduduk yang sangat cepat, dengan ekspansi bidang industri menyebabkan peningkatan permintaan energi dan penurunan kualitas lingkungan. Meskipun Indonesia adalah salah satu Negara penghasil minyak dan gas, namun berkurangnya cadangan minyak, pencabutan subsidi menyebabkan harga minyak naik dan turunnya kualitas lingkungan akibat penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan. Oleh karena itu, pemanfaatan sumber-sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan menjadi pilihan. Salah satu dari energi terbarukan adalah biogas, biogas memiliki peluang yang besar dalam pengembangannya. Energi biogas dapat diperoleh dari air buangan rumah tangga; kotoran cair dari peternakan ayam, sapi, babi; sampah organik dari pasar; industri makanan dan sebagainya (Singgih B *et al.*, 2018)

Biogas adalah gas mudah terbakar (flammable) yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri bakteri anaerob (bakteri yang hidup dalam kondisi kedap udara). Pada dasarnya semua jenis bahan organik bisa di proses untuk menghasilkan biogas, namun demikian hanya bahan organik (padat, cair) homogen seperti kotoran dan urine (air kencing) hewan ternak yang cocok untuk sistem biogas sederhana. Jenis bahan organik yang diproses sangat mempengaruhi produktifitas sistem biogas di samping parameter-parameter lain seperti temperatur digester, pH, tekanan dan kelembaban udara. Bahan organik dimasukkan ke dalam digester (ruangan tertutup kedap udara) sehingga bakteri anaerob akan membusukkan bahan organik tersebut yang kemudian menghasilkan gas (disebut biogas). Energi biogas punya kelebihan-kelebihan dibanding energi nuklir atau batubara, yakni tak berisiko tinggi bagi lingkungan. Selain itu, biogas tak memiliki polusi yang

tinggi. Alhasil, sanitasi lingkungan pun makin terjaga (Pujiati *et.al.*, 2020)

Biogas adalah gas yang dihasilkan dari proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob (tanpa oksigen). Bahan organik yang umum digunakan dalam pembuatan biogas antara lain adalah sampah organik, limbah pertanian, dan limbah peternakan.

Pada umumnya, biogas terdiri dari campuran gas metana (CH_4) sekitar 60–70%, gas karbon dioksida (CO_2) sekitar 30–40%, serta sedikit kandungan gas lainnya seperti hidrogen sulfida (H_2S). Biogas memiliki nilai energi yang tinggi dan dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif dan ramah lingkungan.

Pengolahan biogas adalah proses yang diperlukan untuk meningkatkan kualitas biogas sebelum digunakan. Tahapan pengolahan biogas meliputi pengumpulan bahan baku organik, penguraian bahan organik menjadi biogas, pemisahan gas CO_2 dari biogas, serta pemurnian biogas agar bebas dari zat-zat yang dapat merusak peralatan dan mesin.

Dalam pengolahan biogas, terdapat beberapa komponen penting yang diperlukan, seperti reaktor anaerobik untuk penguraian bahan organik menjadi biogas, sistem pemisahan gas CO_2 , dan sistem pemurnian biogas. Selain itu, juga diperlukan peralatan pendukung seperti pipa-pipa, katup, kompresor, dan lain sebagainya.

Pengolahan biogas memiliki beberapa manfaat, antara lain sebagai sumber energi alternatif yang dapat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca, serta mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi yang terbatas. Selain itu, pengolahan biogas juga dapat membantu mengatasi masalah limbah organik, seperti sampah rumah tangga dan limbah pertanian.

Pengolahan biogas melibatkan serangkaian langkah untuk membersihkan dan meningkatkan kualitas biogas yang dihasilkan dari proses anaerobik, di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi gas metana dan karbon dioksida.

Pengolahan biogas adalah proses untuk mengolah biogas yang dihasilkan dari limbah organik menjadi energi yang dapat digunakan. Dalam pengolahan biogas, beberapa tahapan umum dilakukan, yaitu:

1. Pengumpulan limbah organik: Limbah organik seperti kotoran ternak, limbah pertanian, limbah makanan, dan limbah taman dikumpulkan untuk dijadikan bahan baku biogas.
2. Fermentasi: Limbah organik yang dikumpulkan dimasukkan ke dalam digester, suatu tempat yang dirancang khusus untuk melakukan fermentasi. Di dalam digester, mikroorganisme akan memecah bahan organik menjadi gas metana (biogas) dan limbah padat yang disebut pakan sisa (digestate).
3. Pemisahan: Setelah proses fermentasi selesai, biogas yang dihasilkan akan dipisahkan dari pakan sisa menggunakan teknologi pemisahan. Teknologi yang umum digunakan adalah sistem penampungan gas dan sistem filtrasi.
4. Penyimpanan: Biogas yang telah dipisahkan kemudian disimpan dalam tangki penyimpanan yang dirancang khusus agar gas tetap utuh dan tidak bocor.
5. Pemanfaatan: Biogas yang disimpan dapat digunakan sebagai sumber energi untuk berbagai keperluan, seperti sebagai bahan bakar untuk mesin pembangkit listrik, pemanas ruangan, dan kompor gas. Biogas juga dapat diubah menjadi biometana yang lebih murni dan dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil.
6. Pengolahan limbah padat: Sisa pakan dari proses fermentasi, yaitu digestate, juga dapat diolah lebih lanjut untuk menghasilkan pupuk organik yang kaya akan nutrisi dan dapat digunakan untuk pertanian.

Pengolahan biogas merupakan alternatif yang ramah lingkungan dan berpotensi besar untuk mengurangi emisi gas rumah kaca serta menghasilkan energi terbarukan. Selain itu, pengolahan biogas juga membantu dalam pengelolaan limbah organik yang dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Pengolahan biogas memiliki beberapa pentingnya, antara lain:

1. Sumber energi yang ramah lingkungan: Biogas adalah sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Penggunaan biogas mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan gas alam yang terbatas dan berdampak buruk pada lingkungan.

2. Mengurangi limbah organik: Proses pengolahan biogas melibatkan penguraian limbah organik seperti kotoran hewan, sisa makanan, dan limbah pertanian. Dengan mengolah limbah organik menjadi biogas, limbah-limbah tersebut dapat dimanfaatkan secara produktif daripada hanya dibuang menjadi sampah.
3. Mendukung pertanian berkelanjutan: Biogas dapat dihasilkan dari limbah pertanian seperti sisa tanaman dan kotoran hewan. Dengan memanfaatkan biogas, petani dapat mengurangi biaya energi mereka dan menghasilkan energi untuk keperluan pertanian mereka sendiri, seperti penerangan dan penggunaan mesin pertanian.
4. Mengurangi emisi gas rumah kaca: Biogas adalah bahan bakar yang bersih dan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Penggunaan biogas dapat membantu mengurangi dampak negatif terhadap perubahan iklim dan pemanasan global.
5. Menghasilkan pupuk organik: Proses pengolahan biogas menghasilkan limbah padat yang kaya akan nutrisi. Limbah padat ini dapat digunakan sebagai pupuk organik yang baik untuk tanaman. Dengan demikian, pengolahan biogas dapat memberikan manfaat ganda dalam mengurangi limbah dan meningkatkan produktivitas pertanian.

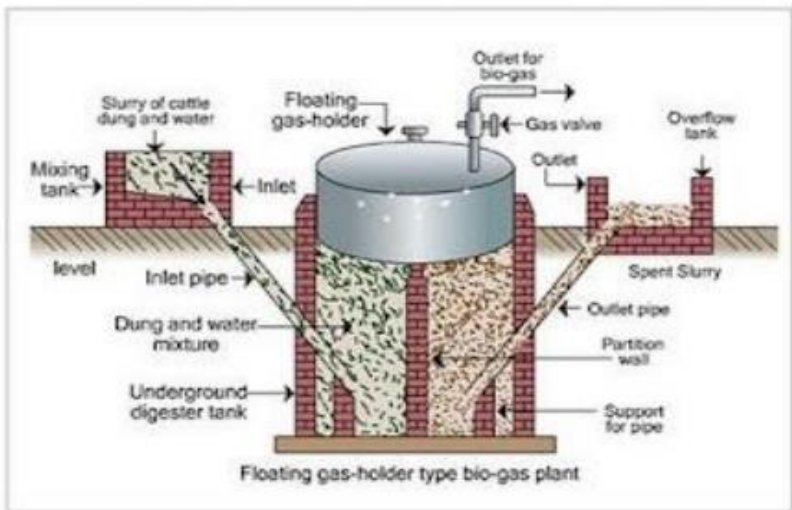
Oleh karena itu, pengolahan biogas memiliki pentingnya dalam menyediakan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, mengurangi limbah organik, mendukung pertanian berkelanjutan, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan menghasilkan pupuk organik.

9.2 Reaktor Biogas

Reaktor biogas adalah serangkaian alat yang berfungsi mengubah kotoran binatang, kotoran manusia dan materi organik lainnya, menjadi biogas. Konsumsi biogas untuk skala rumah tangga antara lain digunakan sebagai bahan bakar memasak dan lampu untuk penerangan. Pada umumnya, secara konstruksi reaktor biogas dapat digolongkan kedalam tiga jenis, yaitu (Nijaguna, 2002) :

1. Tipe Terapung (*Floating Type*)

Tipe ini terdiri atas sumur pencerna, kemudian di bagian atas terdapat drum terapung (bergerak naik turun) yang berfungsi untuk menampung gas hasil fermentasi. Bahan konstruksi sumur pencerna menggunakan bahan-bahan, seperti pasir, batu bata, dan semen. Kelebihan reaktor ini adalah dapat melihat secara langsung volume gas yang tersimpan dalam drum. Sedangkan kekurangannya adalah biaya material konstruksi drum relatif tinggi dan tingkat korosifitas drum relatif besar, sehingga dapat mempengaruhi umur reaktor. Reaktor tipe terapung berkembang di Negara India (sekitar tahun 1937) sehingga digester ini disebut juga dengan tipe India. diperlihatkan pada Gambar 9.1.



Gambar 9.1. Reaktor biogas tipe floating dru

2. Tipe Kubah Tetap (*Fixed Dome Type*)

Tipe ini merupakan tipe yang paling banyak diterapkan di Indonesia. Bahan konstruksi reaktor ini menggunakan bata, pasir, dan semen yang disusun berbentuk rongga kedap udara (mirip kubah). Reaktor fixed dome memiliki dua bagian yaitu digester sebagai tempat pencernaan material biogas dan sekaligus sebagai rumah bagi bakteri baik bakteri pembentuk asam maupun bakteri

pembentuk gas metan. Bagian ini dapat dibangun dengan kedalaman tertentu menggunakan batu, batu bata atau beton. Bagian kedua adalah kubah tetap (*fixed dome*). Bagian ini menyerupai kubah dan merupakan tempat pengumpul gas. Hasil produksi (gas) akan mengalir dan disimpan dalam kubah. Keunggulan reaktor ini adalah biaya konstruksi lebih murah daripada reaktor terapung, serta perawatannya lebih mudah. Kelemahan reaktor tipe kubah adalah rentan terhadap kebocoran gas terutama pada bagian kubah. Reaktor *fixed dome* berkembang di Negara Cina (sekitar tahun 1930) sehingga disebut juga tipe kubah atau tipe Cina. Reaktor biogas tipe kubah tetap (*fixed-dome type*) diperlihatkan pada Gambar 9.2.

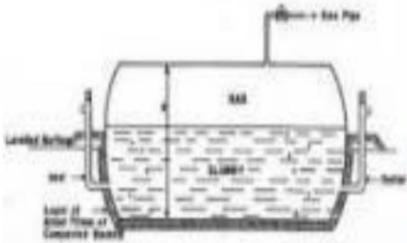


Gambar 9.2. Reaktor biogas tipe kubah tetap (*fixed dome type*)

3. Reaktor Balon

Reaktor balon merupakan jenis reaktor yang banyak digunakan pada skala rumah tangga. Reaktor ini menggunakan bahan plastik sehingga lebih efisien dalam penanganan (bila ada perubahan tempat lokasi reaktor). Reaktor balon terdiri dari satu bagian yang berfungsi sebagai digester dan memiliki tempat penyimpanan gas (tanpa sekat). Konstruksi reaktor balon lebih sederhana dimana pada ujung-ujungnya terpasang pipa masuk sebagai bahan input (kotoran ternak) dan pipa keluar sebagai output slurry, sedangkan pada bagian atas sebagai pipa output gas. Kelebihan reaktor tipe balon adalah biaya lebih murah (dipada tipe terapung dan kubah tetap), fleksibel (mudah diangkut), konstruksi sederhana, lebih mudah dalam pemeliharaan dan pengoperasian. Kekurangan reaktor tipe balon

adalah mudah rusak, perlu ketelitian dan kecermatan tinggi dalam proses pembuatan (karena bahan baku mudah rusak), bahan yang memadai sulit diperoleh. Reaktor tipe balon diperlihatkan pada Gambar 9.3.



Gambar 9.3. Reaktor tipe balon

Selain itu apabila dilihat dari aliran bahan baku (limbah), reaktor biogas juga dapat digolongkan kedalam dua jenis, yaitu reaktor tipe *batch* (bak), reaktor tipe *continuous* (mengalir). Secara prinsip perbedaan antara reaktor biogas tipe *batch* (bak) dan *continuous* (mengalir), yaitu reaktor tipe *batch* (bak) bahan baku reaktor tersimpan dalam wadah (ruang tertentu) dari proses awal hingga proses akhir digestion/pencernaan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui potensi gas dari suatu jenis limbah organik. Sedangkan reaktor tipe *continuous* (mengalir) memiliki aliran bahan baku input dan residu output pada selang waktu tertentu. Selain ketiga jenis reaktor biogas diatas, ada satu jenis reaktor lagi yang juga banyak digunakan yaitu Reaktor Biogas tipe Fiber Glass. Reaktor tipe ini sama dengan tipe kubah tetap (*fixed dome*) hanya bahannya terbuat dari fiber glass (serat kaca). Inlet dan outlet reaktor terbuat dari susunan batu bata dan semen. Reaktor tipe ini merupakan produk pabrik dengan sistem knock down sangat kedap udara dan waktu pemasangan yang relatif singkat. Kelebihan dari reaktor tipe ini adalah dapat dipindahkan, mudah untuk di renovasi, jika ada kebocoran mudah dideteksi dan diperbaiki, operasional mudah, daya tahan antara 10 – 15 tahun. Kekurangannya adalah biaya konstruksi yang relatif mahal dibandingkan dengan reaktor tipe balon. Reaktor tipe fiber glass dapat dilihat pada Gambar 9.4.



Gambar 9.4. Reaktor tipe fiber glass

9.3 Proses Pengolahan Biogas

Bahan baku untuk biogas biasanya berasal dari limbah organik seperti sampah dapur, limbah pertanian, atau limbah ternak. Pengumpulan bahan baku dalam pengolahan biogas merupakan langkah kritis dalam proses produksi biogas. Bahan baku utama yang digunakan biasanya berasal dari limbah organik, seperti kotoran hewan, limbah pertanian, limbah makanan, dan sebagainya. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam pengumpulan bahan baku untuk pengolahan biogas:

1. **Identifikasi Sumber Bahan Baku:**

Tentukan sumber-sumber bahan baku yang akan digunakan untuk pembuatan biogas. Sumber ini bisa berasal dari peternakan, industri makanan, rumah tangga, atau sektor pertanian.

2. **Pemisahan Bahan Organik:**

Pisahkan bahan organik dari limbah lainnya. Misalnya, pisahkan kotoran hewan dari limbah non-organik untuk memastikan bahwa bahan baku yang masuk ke digester biogas adalah bahan organik.

3. **Transportasi dan Penyimpanan:**

Angkut bahan baku ke lokasi pengolahan biogas dengan aman dan efisien.

Pastikan bahan baku disimpan dalam kondisi yang sesuai untuk mencegah kontaminasi dan kerusakan.

4. Persiapan Bahan Baku:

Beberapa bahan baku mungkin perlu dipersiapkan sebelum dimasukkan ke dalam digester biogas. Misalnya, kotoran hewan dapat dicampur dengan air untuk membentuk slurry yang lebih mudah dicerna oleh mikroorganisme dalam proses fermentasi.

5. Monitoring Kualitas Bahan Baku:

Periksa kualitas bahan baku secara berkala untuk memastikan bahwa komposisinya sesuai dengan kebutuhan digester biogas. Hal ini dapat melibatkan pengukuran tingkat keasaman (pH), kandungan nutrisi, dan parameter lainnya.

6. Pengaturan Ketersediaan Bahan Baku:

Pastikan ada pasokan yang cukup dan konsisten dari bahan baku untuk menjaga kelangsungan proses fermentasi dalam digester biogas.

7. Kebersihan dan Keamanan:

Pastikan kebersihan dan keamanan dalam penanganan bahan baku, terutama jika bahan baku tersebut berasal dari limbah organik manusia atau limbah makanan.

8. Pengelolaan Sisa Bahan Baku:

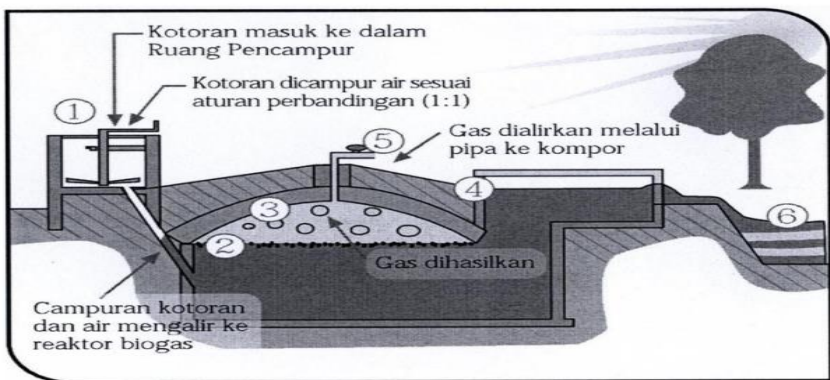
Kelola sisa bahan baku atau produk sampingan dengan bijak. Beberapa limbah hasil dari proses biogas dapat digunakan sebagai pupuk organik atau untuk keperluan lain.

9. Pengelolaan Logistik:

Atur logistik pengumpulan bahan baku dengan efisien untuk mengoptimalkan proses dan mengurangi biaya transportasi.

Dengan memperhatikan langkah-langkah ini, pengumpulan bahan baku dapat dilakukan secara efektif dan efisien dalam pengolahan biogas. Campuran kotoran ternak dan air menggunakan perbandingan 1 : 1 (dalam inlet atau tangki pencampur), hal ini bertujuan agar campuran memiliki jumlah kepadatan (total solid) sebesar 6 – 10% (*slurry* sudah mengalami percampuran sempurna dengan air). Campuran tersebut dialirkan melalui saluran pipa menuju kubah (reaktor tipe *fixed dome*). Kemudian di dalam digester, bakteri-bakteri metan akan melakukan proses dekomposisi anaerobik

terhadap material-material organik (campuran kotoran ternak dan air) sehingga menghasilkan biogas metan. Selanjutnya gas tersebut akan ditampung di dalam ruang penampung gas (bagian atas kubah), lalu gas dialirkan melalui saluran pipa menuju kompor. Kotoran yang telah mengalami proses fermentasi (dalam digester) dialirkan menuju outlet (lubang keluar). Produk samping (ampas) yang keluar dari outlet dikenal dengan bioslurry. Ampas tersebut akan mengalir ke lubang penampung slurry melalui overflow menuju outlet (Singgih B *et al.,* 2018). Mekanisme kerja reaktor biogas diperlihatkan pada Gambar 9.5.



Gambar 9.5. Mekanisme kerja reaktor biogas (*tipe fixed dome*).

Bahan baku ditempatkan dalam reaktor anaerobik di mana bakteri anaerobik menguraikan materi organik menjadi biogas, terutama metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2).

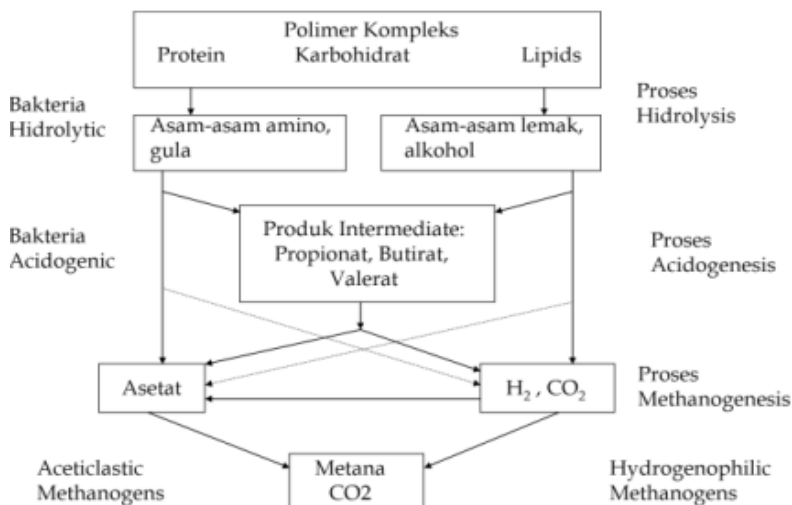
9.4 Proses Anaerobik

Proses anaerobik adalah proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme tanpa adanya oksigen. Dalam konteks pengolahan biogas, proses anaerobik merupakan tahap utama dalam produksi biogas dari bahan organik, seperti limbah pertanian, limbah makanan, atau limbah organik lainnya. Proses ini dikenal sebagai digesti anaerobik atau fermentasi anaerobik. Berikut adalah tahapan umum dalam proses anaerobik pada pengolahan biogas:

1. Persiapan Bahan Baku:
 - a. Bahan baku yang dapat digunakan meliputi limbah pertanian, limbah makanan, limbah ternak, dan limbah organik lainnya.
 - b. Bahan baku tersebut dihancurkan atau digiling untuk meningkatkan luas permukaan dan mempermudah aksi mikroorganisme.
2. Reaktor Anaerobik:
 - a. Bahan baku dimasukkan ke dalam reaktor anaerobik. Reaktor ini dapat berupa biodigester atau digester anaerobik lainnya.
 - b. Reaktor dilengkapi dengan kondisi tanpa oksigen agar mikroorganisme yang berperan dalam proses anaerobik dapat berkerja secara optimal.
3. Fermentasi:
 - a. Mikroorganisme anaerobik, seperti bakteri metanogen, mulai menguraikan bahan organik menjadi gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2).
 - b. Proses ini terjadi melalui serangkaian reaksi fermentasi yang melibatkan berbagai jenis bakteri dan arkea.
4. Pemisahan Gas:
 - a. Gas metana yang dihasilkan selama proses fermentasi diambil dan dipisahkan dari komponen lainnya.
 - b. Proses pemisahan ini dapat melibatkan pemisahan fisik atau menggunakan teknologi pemisahan khusus.
5. Pemanfaatan Biogas:
 - a. Biogas yang dihasilkan dapat digunakan sebagai sumber energi untuk memasak, pemanas, atau pembangkit listrik.
 - b. Sisa hasil proses, yang disebut digestate, dapat digunakan sebagai pupuk organik untuk meningkatkan kesuburan tanah.

Keuntungan dari proses anaerobik pada pengolahan biogas meliputi pengurangan limbah organik, produksi energi terbarukan, dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Namun, penting untuk memantau dan mengontrol kondisi dalam reaktor anaerobik agar proses berjalan efisien dan optimal.

Proses pengolahan limbah organik secara anaerobik merupakan metode yang efektif dan murah. Melalui pengolahan ini dengan memanfaatkan bakteri anaerobik dan fakultatif dalam kondisi tanpa oksigen untuk menguraikan bahan organik menjadi produk yang stabil dan produk yang berupa gas seperti metana (50 – 70%) dan karbon dioksida (25 – 45 %). Keuntungan dari penggunaan jenis pengolahan ini adalah produksi biomass sedikit sekali sehingga kebutuhan tambahan unsur N dan P tidak banyak diperlukan; gas metan yang dihasilkan mempunyai nilai ekonomis; beban organik cukup tinggi karena tidak adanya ketergantungan terhadap kapasitas transfer oksigen. Proses anaerobik dapat dipakai untuk mengolah limbah cair dari beberapa industri, seperti pengalengan makanan, minuman, alkohol, dan lain-lain. Reaksi yang terjadi pada pembentukan biogas dalam suatu biodigester secara umum dapat digambarkan berikut ini: Bahan organik mikroorganisme $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S}$ (Soeprijanto et al.,2020). Pada umumnya penguraian bahan organik menjadi biogas dibagi menjadi tiga tahap, yaitu: (1) Tahap hidrolisa;(2) Tahap pembentukan asam (acidogenesis); dan (3) Tahap pembentukan metana (metanogenesis) yang dapat ditunjukkan dalam Gambar 9.6.



Gambar 9.6. Langkah-langkah produksi metan untuk limbah organik

1. Proses Hidrolisis

Mikroorganisme hidrolitik menguraikan senyawa organik kompleks menjadi molekul-molekul sederhana menggunakan air untuk memisahkan ikatan kimia di antara bahan-bahan. Agar dapat mudah diuraikan maka senyawa organik kompleks bila dalam bentuk padat harus dipotong-potong terlebih dahulu untuk memudahkan transport melintasi membran sel bakteri. Hasil dari reaksi hidrolitik adalah molekul-molekul sederhana dengan rantai pendek termasuk glukosa, asam amino, asam lemak, etanol, karbon dioksida dan energi bagi bakteri yang melakukan fermentasi. Pada tahap ini pH optimal adalah 6 – 7.

2. Proses Asidogenesis

Proses dekomposisi bahan kimia seperti karbohidrat oleh enzim, bakteri, yeast, atau mold dalam kondisi tidak ada oksigen. Hasil yang diperoleh dari proses hidrolisis yang mudah larut ini kemudian dimetabolisme oleh aktivitas bakteri hidrolitik dan non hidrolitik. Hasil utama yang diperoleh dari proses asidogenesis dalam kultur campuran adalah asetat, propionate, butirat, hydrogen (H_2) dan CO_2 . Selanjutnya produk samping berupa formiat, laktat, valerat, metanol, etanol, butandiol atau aseton dihasilkan oleh bakteri fermentasi. Karena asam lemak mudah menguap (VFA) ini adalah produk utama yang dihasilkan oleh bakteri fermentatif, mereka umumnya ditandai sebagai bakteri asidifikasi atau asidogenik.

3. Proses Asetogenesis (Pembentukan Asam)

Pada tahap ini, produk-produk fermentasi diubah menjadi senyawa asetat, asam-asam lemak, CO_2 dan hydrogen dari molekul-molekul sederhana yang tersedia oleh bakteri asetonik atau bakteri asetonogen penghasil hydrogen. Tetapi pertumbuhan jenis mikroorganisme ini justru akan terhambat jika terjadi akumulasi hydrogen. Terbentuknya asam organik menyebabkan pH terus menurun, namun dalam waktu yang bersamaan terbentuk buffer alkali yang dapat menetralkan pH. Untuk mencegah penurunan pH secara drastis ditambahkan larutan alkali sebagai buffer sebelum tahap pertama

berlangsung. Asidifikasi tergantung pada komposisi air limbah, 10 sampai 16 % COD didasarkan pada asam-asam organik (hampir merupakan asam asetat) terdandung dalam buah-buahan dan dengan demikian air limbah ini dengan mudah dapat didegradasi. Pada influent tanki asidifikasi, konsentrasi asam asetat sekitar 200 mg/l, dengan sedikit kenaikan dalam tingkat asidifikasi. Dalam tanki asidifikasi, hampir asam prominent yang dihasilkan adalah asam propionat; dalam jumlah sampai dengan 254 mg/l. Proses asidifikasi juga sangat dipengaruhi oleh hydraulic retention time (HRT), dengan diturunkan nilai HRT sampai 10, 8 atau 6 jam juga akan menurunkan derajat asidifikasi; HRT dapat digunakan antara 12 dan 29 jam. Pada HRT sekitar 13 jam, 20 sampai 27% COD dapat didegradasi.

4. Proses Metanogenesis (Pembentukan Metan)

Pada tahap ini pembentukan gas metana (CH_4) dari senyawa asetat, atau dari gas hidrogen dan CO_2 oleh bakteri methanogenic (metanogen). Bakteri metanogen adalah bakteri obligate anaerob yang pertumbuhannya lebih lambat dari pada bakteri yang ada pada tahap satu dan dua. Bakteri ini sangat tergantung pada tahap satu dan dua untuk menghasilkan nutrisi dalam bentuk yang sesuai. Salah satu fungsi bakteri metanogen adalah mengurangi hidrogen seminimal mungkin di dalam medium dengan jalan menggunakan hidrogen untuk mereduksi CO_2 menjadi produk akhir yang inert (gas yang tidak dapat bereaksi secara kimia dengan zat lain) yaitu CH_4 . Proses metanogenesis terjadi pada pH optimum mendekati netral (6,8 – 7,4) dan apabila pH optimum turun menjadi 6,4 atau lebih rendah, maka pembentukan gas metana dari hidrogen dan CO_2 akan terhambat. Bakteri pembentuk asam berperan dalam proses hidrolisa dan perombakan senyawa organik kompleks menjadi produk sederhana seperti CO_2 dan H_2 serta asam lemak melalui dua jalur utama berikut ini: Substrat $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{asetat}$
 Substrat $\rightarrow \text{propionat} + \text{butirat} + \text{etanol}$
 Kemudian asam propionat dan asam butirat diubah oleh bakteri aseto-genik ke bentuk asetat dengan jalan : $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$
 (asam propionat) (asam asetat) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow$

$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$ (asam butirat) (asam asetat) Substrat yang diubah menjadi CO_2 , H_2 dan asetat secara langsung digunakan oleh bakteri acetoclastic untuk membentuk metan dengan persamaan : $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{energi}$ Dengan "Hydrogen-utilizing methane bacteria" menggunakan persamaan: $4 \text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{energi}$ Hydrogen-utilizing methane bacteria merupakan bakteri obligate yang memperoleh energi dari oksidasi hidrogen dan sumber karbon berasal dari karbondioksida. Bakteri metanogenesis (acetoclastic bacteria dan Hydrogen-utilizing methane bacteria) dapat terganggu oleh adanya akumulasi hidrogen. Hidrogen merupakan hasil yang terbentuk oleh bakteri pembentuk hidrogen pada tahap sebelumnya. Untuk mencegahnya bakteri metanogen menggunakan hidrogen untuk proses konversi asam asetat ke bentuk metan, reaksi yang terjadi : $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CH}_4$ Proses anaerobik hanya terjadi dibawah kondisi anaerobik yang strict (yaitu tidak ada oksigen dan redox potential sangat rendah). Proses memerlukan adaptasi biosolid yang spesifik dan terutama kondisi kondisi proses, yang berbeda besar dengan proses yang dibutuhkan untuk pengolahan aerobik.

9.5 Pemisahan Padat Dan Cair

Setelah proses anaerobik, biasanya terdapat sisa padatan dalam bentuk lumpur atau ampas. Proses pemisahan padat dan cair dilakukan untuk menghasilkan biogas yang lebih bersih. Proses pemisahan padat dan cair pada pengolahan biogas umumnya dilakukan untuk memisahkan komponen-komponen yang terdapat dalam campuran biogas, seperti gas metana, air, dan residu padat. Berikut adalah beberapa metode umum yang digunakan untuk pemisahan tersebut:

1. Saringan atau Filter Mekanis:

Pada tahap awal, sistem dapat menggunakan saringan atau filter mekanis untuk memisahkan partikel-padat kasar dari campuran biogas. Ini dapat membantu mencegah kerusakan pada peralatan lebih lanjut.

2. Desulfurisasi:

Jika biogas mengandung kandungan sulfur yang tinggi, maka tahap desulfurisasi dapat diterapkan untuk menghilangkan senyawa sulfur, yang dapat merusak peralatan dan mengurangi efisiensi proses.

3. Pendinginan dan Kondensasi:

Pada suhu tertentu, biogas dapat dikondensasikan sehingga gas-gas yang mudah menguap dapat dipisahkan dari gas-gas yang lebih padat. Ini dapat membantu dalam pemisahan gas-gas yang memiliki titik didih berbeda.

4. Pemisahan Fase Cair-Padat:

Proses pemisahan ini dapat mencakup penggunaan sentrifugasi atau sedimentasi untuk memisahkan fase cair (air) dari fase padat (residu). Sentrifugasi memanfaatkan gaya sentrifugal untuk memisahkan berbagai fraksi berdasarkan berat jenisnya.

5. Adsorpsi:

Adsorpsi adalah proses di mana zat-zat tertentu dapat melekat pada permukaan material tertentu. Ini dapat digunakan untuk menghilangkan senyawa-senyawa tertentu dari biogas.

6. Membran Separasi:

Metode ini melibatkan penggunaan membran untuk memisahkan berbagai komponen dalam biogas berdasarkan ukuran atau sifat molekul. Ini dapat membantu dalam pemisahan gas-gas yang berbeda.

7. Distilasi:

Proses distilasi dapat digunakan untuk memisahkan komponen-komponen gas berdasarkan titik didihnya. Namun, ini mungkin tidak efisien untuk biogas yang umumnya terdiri dari campuran gas dengan titik didih yang tidak jauh berbeda.

Metode pemisahan yang dipilih akan bergantung pada komposisi biogas, tujuan pengolahan, dan skala instalasi. Pemisahan padat dan cair pada pengolahan biogas biasanya merupakan bagian dari rangkaian proses yang lebih kompleks untuk memproduksi biogas yang lebih bersih dan efisien.

9.6 Pembersihan Biogas

Biogas yang dihasilkan dapat mengandung impuritas seperti belerang hidrogen (H_2S), air (H_2O), dan partikel-partikel lain. Pembersihan biogas dilakukan untuk menghilangkan impuritas ini. Salah satu metode umum adalah scrubbing dengan menggunakan larutan basa untuk menghilangkan belerang hidrogen. Pembersihan biogas merupakan tahap penting dalam pengolahan biogas untuk menghasilkan gas metana yang bersih dan dapat digunakan sebagai sumber energi. Proses pembersihan biogas melibatkan penghilangan komponen-komponen yang tidak diinginkan, seperti air, senyawa sulfur, partikel-partikel padat, dan gas-gas lain yang dapat mengganggu kinerja sistem atau merusak peralatan.

Berikut adalah beberapa metode umum yang digunakan untuk membersihkan biogas:

1. **Pemisahan Partikel Padat:**
Partikel padat seperti debu, lumpur, dan material organik yang tersuspensi dapat dipisahkan dari biogas menggunakan separator partikel atau filter. Ini membantu mencegah penyumbatan dan kerusakan pada peralatan downstream.
2. **Pemisahan Air:**
Air merupakan komponen yang harus dihilangkan dari biogas karena dapat menyebabkan korosi dan mengurangi nilai kalor biogas. Pada umumnya, air dapat dipisahkan dengan menggunakan separator air atau drying bed.
3. **Penyaringan H_2S (Hidrogen Sulfida):**
 H_2S adalah gas yang dapat merusak peralatan dan menghasilkan bau yang tidak sedap. Metode umum untuk menghilangkan H_2S termasuk penggunaan scrubber atau adsorben seperti zeolit atau karbon aktif.
4. **Penyaringan CO_2 (Karbon Dioksida):**
 CO_2 dapat mengurangi nilai kalor biogas. Metode untuk menghilangkan CO_2 melibatkan penggunaan scrubber atau proses adsorpsi.

5. Desulfurisasi Biogas:
6. Jika kandungan sulfur dalam biogas tinggi, mungkin diperlukan proses desulfurisasi yang lebih intensif, seperti penggunaan scrubber kimiawi atau metode biologis.
7. Penghilangan Kontaminan Lain:
Selain H_2S dan CO_2 , biogas juga dapat mengandung kontaminan lain seperti ammonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), dan siloxanes. Metode tertentu seperti absorpsi atau proses kimiawi dapat digunakan untuk mengatasi kontaminan-kontaminan ini.
8. Penyaringan Partikel Halus:
Partikel-partikel halus dapat menyebabkan masalah operasional pada peralatan seperti mesin pembangkit listrik. Oleh karena itu, pemisahan partikel halus juga dapat menjadi bagian dari proses pembersihan.

Metode pembersihan biogas yang dipilih dapat bervariasi tergantung pada spesifikasinya, jenis limbah yang diolah, dan tujuan penggunaan biogas tersebut. Pemilihan teknologi pembersihan yang tepat sangat penting untuk memastikan kualitas biogas yang dihasilkan sesuai dengan standar dan dapat digunakan secara efisien.

9.7 Penyimpanan Dan Distribusi

Setelah dibersihkan, biogas dapat disimpan dalam tangki penyimpanan sebelum digunakan atau didistribusikan. Penyimpanan dapat dilakukan dalam bentuk gas atau dapat dikonversi menjadi bentuk cair (LNG - *Liquid Natural Gas*). Penyimpanan dan distribusi pada olahan biogas melibatkan beberapa tahap penting untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi penggunaan energi ini. Biogas adalah gas yang dihasilkan dari proses anaerobik bakteri pada bahan organik, seperti limbah pertanian, limbah rumah tangga, atau limbah industri. Berikut adalah beberapa aspek utama terkait penyimpanan dan distribusi biogas:

1. Penyimpanan Biogas:
 - a. Tangki Penyimpanan: Biogas biasanya disimpan dalam tangki penyimpanan untuk mengatasi fluktuasi produksi dan

- permintaan. Tangki ini bisa berbentuk silinder atau tangki berbentuk balon (gasometer).
- b. Kompresi: Biogas dapat dikompres untuk meningkatkan densitasnya dan memudahkan penyimpanan dan transportasi. Proses ini menghasilkan gas yang dikenal sebagai bio-CNG (*Compressed Natural Gas*).
2. Pembersihan dan Pemurnian:
- a. H₂S Removal: Biogas seringkali mengandung hidrogen sulfida (H₂S) yang dapat merusak peralatan dan memiliki efek negatif pada kesehatan manusia. Oleh karena itu, biogas harus dibersihkan dari H₂S melalui proses desulfurisasi.
 - b. Pemurnian: Untuk beberapa aplikasi, seperti penggunaan biogas sebagai bahan bakar kendaraan atau dalam pembangkit listrik, biogas harus dipurnakan untuk menghilangkan komponen-komponen seperti air dan CO₂.
3. Distribusi Biogas:
- a. Pipelines: Biogas yang telah dibersihkan dan diolah dapat didistribusikan melalui jaringan pipa yang mirip dengan distribusi gas alam.
 - b. Pengiriman dengan Kendaraan:
Bio-CNG: Biogas yang telah dikompres menjadi bio-CNG dapat diangkut menggunakan kendaraan khusus dan didistribusikan ke lokasi penggunaan.
Tabung Gas: Biogas yang telah dikompres juga dapat disimpan dalam tabung gas dan diangkut menggunakan kendaraan.
4. Pemantauan dan Manajemen:
- Sistem Pemantauan: Penting untuk memiliki sistem pemantauan yang baik untuk mengukur produksi, kualitas, dan konsumsi biogas. Ini membantu dalam manajemen yang efisien dan pengambilan keputusan yang tepat.
5. Penggunaan Akhir:
- a. Kendaraan dan Pembangkit Listrik: Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk kendaraan atau digunakan dalam pembangkit listrik untuk menghasilkan energi listrik.

- b. Pemanas dan Aplikasi Industri: Biogas juga dapat digunakan sebagai sumber energi untuk pemanas atau dalam berbagai aplikasi industri.
6. Penting untuk mencatat bahwa setiap proyek biogas dapat memiliki kebutuhan khusus tergantung pada sumber bahan baku dan tujuan penggunaan akhirnya. Faktor-faktor seperti skala proyek, lokasi geografis, dan peraturan setempat juga memainkan peran penting dalam perencanaan sistem penyimpanan dan distribusi biogas.

9.8 Penggunaan Biogas

Pemanfaatan biogas telah menjadi solusi yang terus berkembang dalam memenuhi kebutuhan energi dan mengatasi masalah limbah organik. Biogas dibuat melalui proses fermentasi anaerobik dari bahan-bahan organik seperti limbah pertanian, limbah makanan, dan limbah kotoran hewan.

Biogas memiliki banyak keunggulan sebagai sumber energi. Pertama, biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti minyak bumi dalam memasak dan memanaskan air. Penggunaan biogas dalam rumah tangga dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Selain itu, biogas bisa digunakan dalam pembangkit listrik. Dengan menggunakan mesin pembangkit listrik berbahan bakar biogas, limbah organik dapat dikonversi menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik utama. Penggunaan biogas sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik juga dapat mengurangi polusi udara yang dihasilkan oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Selain manfaat energi, pemanfaatan biogas juga berkontribusi terhadap pengelolaan limbah. Dengan mengolah limbah organik menjadi biogas, limbah tersebut dapat diolah secara efisien dan mengurangi dampak negatif lingkungan seperti pencemaran tanah dan air.

Penggunaan biogas tidak hanya bermanfaat bagi individu atau rumah tangga, tetapi juga untuk sektor pertanian dan industri. Di sektor pertanian, biogas dapat digunakan untuk menyediakan

kebutuhan energi dalam pengolahan limbah pertanian dan mengurangi penggunaan pupuk kimia dengan menggunakan pupuk organik yang dihasilkan dari proses produksi biogas. Di sektor industri, biogas dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produksi bahan kimia seperti metanol dan amonia.

Dalam kesimpulannya, pemanfaatan biogas adalah solusi yang berkelanjutan dalam hal energi dan pengelolaan limbah. Keunggulannya sebagai sumber energi yang ramah lingkungan dan berbagai manfaatnya dalam berbagai sektor membuat biogas menjadi opsi yang menarik untuk menjawab tantangan energi dan lingkungan yang dihadapi saat ini. Biogas yang sudah bersih dapat digunakan untuk berbagai keperluan, termasuk pembangkit listrik, pemanas ruangan, atau sebagai bahan bakar untuk kendaraan.

Biogas adalah gas yang dihasilkan dari proses anaerobik (tanpa udara) penguraian bahan organik oleh bakteri. Penggunaan biogas telah berkembang pesat karena memiliki beberapa keuntungan, terutama dalam hal energi terbarukan dan pengelolaan limbah. Berikut adalah beberapa penggunaan utama biogas:

1. **Energi Listrik:** Biogas dapat digunakan untuk menghasilkan listrik melalui generator atau turbin gas. Proses ini melibatkan pembakaran biogas, yang menghasilkan energi panas yang kemudian diubah menjadi energi listrik.
2. **Pemanas Rumah dan Industri:** Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk sistem pemanas dalam rumah tangga atau industri. Penggunaan biogas sebagai bahan bakar pemanas membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.
3. **Memasak:** Di daerah yang tidak memiliki akses mudah ke sumber energi lain, biogas bisa digunakan sebagai bahan bakar untuk kompor memasak. Hal ini tidak hanya meminimalkan penggunaan kayu bakar dan kerosin, tetapi juga membantu mengurangi dampak deforestasi.
4. **Penerangan:** Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk lampu penerangan, terutama di daerah pedesaan yang tidak memiliki akses listrik. Ini dapat meningkatkan akses masyarakat terhadap penerangan yang lebih aman dan ramah lingkungan.

5. Kendaraan: Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk kendaraan, terutama dalam bentuk bio-CNG (*Compressed Natural Gas*). Kendaraan yang menggunakan biogas sebagai bahan bakar memiliki emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan kendaraan yang menggunakan bahan bakar fosil.
6. Pupuk: Sisa padat atau limbah hasil dari proses produksi biogas dapat digunakan sebagai pupuk organik yang kaya nutrisi untuk tanaman. Ini membantu dalam mengembalikan nutrisi ke tanah dan meningkatkan kesuburan tanah.
7. Pengelolaan Limbah: Biogas dapat digunakan sebagai cara efektif untuk mengelola limbah organik, seperti limbah pertanian, limbah makanan, dan limbah manusia. Proses penguraian anaerobik membantu mengurangi volume limbah organik dan menghasilkan biogas sebagai produk sampingan yang berguna.

Penggunaan biogas memiliki potensi besar untuk menyediakan energi terbarukan, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan meningkatkan pengelolaan limbah organik. Namun, untuk mengoptimalkan manfaatnya, diperlukan investasi dalam infrastruktur dan pendekatan berkelanjutan dalam pengelolaan sumber daya.

9.9 Pemantauan Dan Pemeliharaan

Proses pengolahan biogas memerlukan pemantauan dan pemeliharaan secara teratur untuk memastikan kinerja optimal dan mencegah masalah seperti penurunan produksi biogas atau kontaminasi. Pemantauan dan pemeliharaan biogas sangat penting untuk memastikan kinerja optimal sistem serta menjaga kelangsungan operasionalnya. Berikut adalah beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam pemantauan dan pemeliharaan biogas:

1. Pemantauan Suhu:

Pastikan suhu dalam reaktor biogas tetap berada dalam kisaran optimal untuk aktivitas mikroba anaerobik. Suhu optimal biasanya berkisar antara 35°C hingga 55°C, tergantung pada jenis mikroorganisme yang digunakan.

2. **Pemantauan pH:**
Kontrol pH dalam sistem biogas sangat penting untuk menjaga kondisi lingkungan yang sesuai untuk bakteri penghasil biogas. Kisaran pH yang umumnya diinginkan berkisar antara 6,5 hingga 7,5.
3. **Pemantauan Level Air:**
Perhatikan level air dalam reaktor biogas untuk memastikan kondisi anaerobik tetap terjaga. Kehadiran terlalu banyak atau terlalu sedikit air dapat mempengaruhi kinerja sistem.
4. **Pemantauan Gas:**
Amati produksi gas secara teratur untuk memastikan bahwa biogas yang dihasilkan sesuai dengan perkiraan. Pengukuran volume dan komposisi gas (biasanya metana) dapat memberikan gambaran tentang kinerja reaktor.
5. **Pembersihan dan Pemeliharaan Pipa:**
Periksa dan bersihkan sistem perpipaan secara berkala untuk memastikan tidak ada sumbatan atau kerusakan yang dapat menghambat aliran gas.
6. **Pemeliharaan Komponen Mekanis:**
Periksa dan servis komponen mekanis seperti pompa, agitator, dan sistem pengaduk untuk memastikan berfungsi dengan baik. Perbaiki atau ganti bagian yang rusak.
7. **Pengelolaan Input Bahan Baku:**
Pastikan bahan baku yang dimasukkan ke dalam reaktor sesuai dengan komposisi yang diinginkan. Kontrol suhu dan waktu retensi untuk memaksimalkan produksi biogas.
8. **Pemantauan Keberlanjutan Lingkungan:**
Tinjau dampak lingkungan dari sistem biogas dan pastikan keberlanjutan dalam jangka panjang. Pemantauan kualitas air dan keberlanjutan tanah adalah bagian penting dari pemeliharaan ini.
9. **Pemeliharaan Keamanan:**
Lakukan inspeksi keamanan secara teratur untuk mengidentifikasi potensi bahaya atau kebocoran gas. Pastikan sistem dilengkapi dengan perangkat keamanan yang sesuai.

10. Pelatihan dan Pemantauan Personel:

Pastikan personel yang terlibat dalam operasi sistem biogas terlatih dengan baik. Lakukan pemantauan kinerja dan berikan pelatihan tambahan jika diperlukan.

Dengan melakukan pemantauan dan pemeliharaan rutin, Anda dapat memastikan efisiensi operasional sistem biogas serta meminimalkan risiko gangguan atau kerusakan.

9.10 Pemanfaatan Limbah Cair

Jika ada limbah cair yang dihasilkan selama proses, limbah ini dapat diolah lebih lanjut atau digunakan kembali untuk keperluan pertanian sebagai pupuk.

Limbah cair biogas merujuk pada residu cair yang dihasilkan selama proses produksi biogas. Biogas sendiri dihasilkan melalui proses anaerobik, di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik dalam lingkungan tanpa oksigen, menghasilkan gas metana sebagai produk utama. Limbah cair biogas seringkali mengandung nutrisi dan zat organik yang dapat dimanfaatkan atau diolah lebih lanjut. Berikut beberapa pemanfaatan limbah cair biogas:

1. **Pemupukan Tanaman:** Limbah cair biogas kaya akan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Hal ini membuatnya dapat digunakan sebagai pupuk organik untuk meningkatkan kesuburan tanah. Pemupukan menggunakan limbah cair biogas dapat membantu mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan meningkatkan kualitas tanah.
2. **Pembersihan dan Irigasi:** Limbah cair biogas yang telah diolah dapat digunakan untuk pembersihan dan irigasi tanaman. Proses ini membantu mengurangi limbah dan memberikan tambahan air yang diperlukan untuk tanaman.
3. **Proses Pemurnian dan Pengolahan Tambahan:** Limbah cair biogas dapat mengandung senyawa-senyawa yang perlu dihilangkan sebelum digunakan atau dibuang. Oleh karena itu, diperlukan proses pemurnian dan pengolahan tambahan, seperti penyaringan atau proses kimia, untuk memastikan bahwa limbah tersebut aman dan dapat dimanfaatkan dengan efektif.

4. **Pembuatan Energi:** Limbah cair biogas dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi, baik dalam bentuk biogas tambahan atau listrik. Proses ini melibatkan pengumpulan gas metana yang dihasilkan selama proses pembusukan bahan organik dan penggunaannya sebagai sumber energi.
5. **Pengolahan Air Limbah:** Limbah cair biogas dapat digunakan sebagai bagian dari sistem pengolahan air limbah. Proses ini membantu mengurangi dampak negatif limbah terhadap lingkungan dan dapat meningkatkan kualitas air yang dibuang.
6. **Produksi Produk Kimia:** Beberapa senyawa kimia yang terkandung dalam limbah cair biogas dapat diolah menjadi produk kimia yang bernilai tambah, seperti asam organik atau senyawa lain yang dapat digunakan dalam industri.

Pemanfaatan limbah cair biogas dapat membantu menciptakan pendekatan berkelanjutan terhadap pengelolaan limbah dan sumber daya alam. Namun, penting untuk memastikan bahwa pengolahan limbah dilakukan dengan benar agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Penting untuk memperhatikan bahwa pengolahan biogas dapat bervariasi tergantung pada jenis bahan baku yang digunakan dan skala sistem biogas yang diterapkan. Proses ini dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan dan kondisi spesifik pada lokasi tertentu.

Pengolahan biogas adalah teknologi yang sangat penting dan menjanjikan dalam pengelolaan limbah organik dan pemenuhan kebutuhan energi. Dengan menggunakan biogas, limbah organik dapat diolah secara efisien dan menghasilkan energi yang dapat digunakan dalam berbagai sektor seperti rumah tangga, pertanian, dan industri.

Penggunaan biogas sebagai sumber energi memiliki manfaat yang signifikan, antara lain mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mengurangi polusi udara. Selain itu, pengolahan biogas juga membantu mengatasi masalah pengelolaan limbah dengan mengubah limbah organik menjadi sumber daya yang bernilai.

Dalam jangka panjang, penggunaan biogas diharapkan dapat membantu mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dan mengurangi dampak negatif lingkungan. Namun, untuk menerapkan

teknologi pengolahan biogas secara luas, perlu dukungan dan kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat untuk memperbaiki infrastruktur dan memperluas akses ke teknologi tersebut.

Secara keseluruhan, pengolahan biogas adalah konsep yang menjanjikan dalam mengelola limbah organik dan memenuhi kebutuhan energi yang berkelanjutan. Dengan terus mengembangkan dan menerapkan teknologi ini, kita dapat bergerak menuju masa depan yang lebih hijau dan lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109(1-3), 95-105.
- Bajpai, P. (Ed.). (2018). *Biomethane production: From anaerobic digestion*. Elsevier.
- Bernard, C. W., and D. O. Hill. 1983. Energy from renewable resources. In : H. J. Rehm and G. Reed (Eds.). *Biotechnology*, vol. 3. Verlag Chemie, Weinheim Deerfield, Florida. Basel.
- Chandra, R., Takeuchi, H., and Hasegawa, T. (2012). Methane Production from Lignocellulosic Agricultural Crop Wastes: A Review in Context to Second Generation of Biofuel Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1462-1476.
- Demirel, B., and Scherer, P. (2008). The Roles of Acetotrophic and Hydrogenotrophic Methanogens during Anaerobic Conversion of Biomass to Methane: A Review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 173-190.
- Fountoulakis, M. S., & Petousi, I. (2019). The importance of bioenergy in greenhouse gas reduction strategies: A comparative study of biogas and natural gas utilisation. *Energy*, 184, 1085-1100.
- Grady Jr. C.P.L., and H. C. Lim. 1980. *Biological Wastewater Treatment, Theory and Applications*. Marcel Dekker Inc. New York.
- Liu, J., Liu, L., Sun, X., and Zhang, Y. (2016). Anaerobic Digestion for Biogas Production: Global Status, Environmental Impacts, and Future Challenges. *Bioresource Technology*, 248(Part B), 99-108.
- Mahapatsiri, C., & Reungsang, A. (2018, October). Co-digestion of livestock manure with fruit and vegetable wastes for biomethane production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 191, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.
- Marchaim, U. 1992. *Biogas Processes for Sustainable Development Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy.

- Mata-Alvarez, J., Mace, S., and Llabres, P. (2000). Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., and Llabrés, P. (2014). Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. In: *Waste Management Series*, Vol. 8. London: IWA Publishing.
- Mc. Carty, P. L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals III. *J. Publ. Wks.* 95: 91 – 94.
- Nijaguna, B.T. 2002. *Biogas Technology*. New Age International (P) Ltd. New Delhi.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524.
- Pujiati, Nurul K.D., Dimas S,m 2020. *Biogas Berbasis Biomassa*. UNIPMA Press
- Rajendran, K, Aslanzadeh, S., and Taherzadeh, M.J. (2012). Household Biogas Digesters – A Review. *Energies*, 5(8), 2911-2942.
- Scherer, P., and Neumann, L (2016). Biogas from Lignocellulosic Biomass: Technology, Challenges, and Prospects. In: *Handbook of Biofuels Production* (2nd ed.), Chapter 12. London: Woodhead Publishing.
- Singgih B, Yusmiati, 2018. Teknologi Produksi Biogas dari Limbah Ternak untuk memenuhi kebutuhan energi rumah tangga. *Jurnal Kelitbangan* Vol. 06 Nomor 01.
- Soeprijanto, Soprpto, Danawati, . Niniek Fajar Puspita, Lily Pudjiastuti,, Budi Setiawan., Warlinda Eka T, Achmad Ferdiansyah, Nurlaili H, Arino Anzip, 2020. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat – LPPM ITS*.
- Syamsuddin, T.R. dan Iskandar, H.H. 2005. Bahan Bakar Alternatif Asal Ternak. *Sinar Tani*, Edisi 21-27 Desember 2005. No.3129 Tahun XXXVI.
- Tcacenco, O., González-García, S., & Moreira, M. T. (2016). Life cycle assessment of biogas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 23-37.
- Tim BIRU. 2010. Model Instalasi Biogas Indonesia. <http://www.biru.or.id/index.php/download/7/model-instalasi->

- biogasindonesia-panduan-konstruksibiru.html. Widodo, T.W. dan Nurhasanah, A. 2004. Kajian Teknis Teknologi Biogas dan Potensi Pengembangannya di Indonesia. Prosiding Seminar Nasional Mekanisasi Pertanian. Bogor, 5 Agustus 2004.
- Wellinger, A, Murphy, J., & Baxter, D. (2013). Biogas handbook. Leipzig: Fachverband Biogas e.V.
- Widodo, T.W., Asari, A., Nurhasanah, A. and Rahmarestia, E. 2006. Biogas Technology Development for Small Scale Cattle Farm Level in Indonesia. International Seminar on Development in Biofuel Production and Biomass Technology. Jakarta, February 21- 22, 2006 (Non-Presentation Paper)
- Zhang, Y., and Banks, C.J. (2008). Evaluation of Available Biogas Production Models for the Prediction of Methane Generation in Anaerobic Digestion. Bioresource Technology, 99(17), 6761-6778.
- Zimmerman, A.R., and Speece, R.E. (1985). Depth to Methanogenesis in Granular Sludge from UASB Reactors. Biotechnology and Bioengineering, 27(1), 119-131.

BAB 10

GASIFIKASI

Oleh Ketut Gede Dharma Putra

10.1 Pendahuluan

Pada masa awal peradaban manusia, kebutuhan untuk penghangat ruangan, penerangan maupun memasak dipenuhi dengan menggunakan bahan kayu yang didapatkan dari lingkungan. Kayu tersebut dibakar menggunakan api yang dibuat dengan metode sederhana dan menghasilkan nyala api dan panas. Bersamaan dengan terbakarnya kayu tersebut didapatkan juga gas-gas yang keluar dari proses pembakaran tersebut. Pada waktu berikutnya, dengan semakin bertambahnya pengetahuan manusia, pembakaran benda padat menghasilkan energi dan gas mulai lebih banyak diteliti. Sampai akhirnya pembuatan gas dari pembakaran benda padat yang dikenal dengan istilah gasifikasi makin banyak dilakukan untuk berbagai kepentingan manusia.

Gasifikasi adalah suatu proses pembakaran benda padat berupa hidro karbon secara termokimia yang menghasilkan gas yang biasanya disebut *syngas*. Proses gasifikasi memerlukan panas dari luar (endotermis) dengan media yang biasa digunakan adalah udara dan uap. Penguraian bahan padat seperti biomassa menjadi syngas dilakukan dalam *reactor gasifier* dalam suhu pemanasan sekitar 900 °C s.d. 1200 °C. Pada proses gasifikasi, akan dihasilkan tiga bagian utama yakni padatan, cairan dan gas.

Awalnya benda padat yang dibakar dalam proses gasifikasi seperti kayu atau dedaunan kering, selanjutnya ditemukannya batu bara dan bahan lainnya yang lebih efektif. Berbagai teknologi pembakaran dan pengembangan peralatan dilakukan untuk memanfaatkan batu bara agar mendapatkan energi yang lebih efisien. Namun sebagai akibat ditemukannya sumber energi lain seperti minyak bumi dan gas alam, maka kebutuhan masyarakat terhadap energi dengan menggunakan kayu dan batu bara semakin menurun. Selain karena ditemukannya sumber energi yang lebih

praktis, keberadaan hutan sebagai sumber kayu serta proses penambangan batu bara yang memerlukan pembukaan lahan yang luas serta emisi berbahaya yang dihasilkan semakin banyak menjadi isu strategis dan sensitive di bidang lingkungan. Sehingga proses gasifikasi mulai dimanfaatkan untuk menjawab tantangan umat manusia di bidang lainnya seperti solusi permasalahan lingkungan. Sehingga pada tahap berikutnya berbagai benda padat yang dimanfaatkan dalam proses gasifikasi adalah limbah padat seperti sampah domestik, limbah pertanian/perkebunan, limbah medis, limbah B₃ dan lainnya.

Saat ini proses gasifikasi banyak digunakan untuk mengatasi permasalahan lingkungan, khususnya memanfaatkan limbah berupa benda padat seperti sampah dan limbah pertanian/perkebunan dengan sekaligus menghasilkan sumber energi gas sangat potensial dikembangkan. Dengan semakin pesatnya peningkatan jumlah penduduk dunia yang diikuti dengan peningkatan konsumsi berbagai kebutuhannya berdampak pada peningkatan produksi polutan ke lingkungan. Salah satu permasalahan yang penting untuk dikelola adalah peningkatan pencemaran udara yang berasal dari pengelolaan limbah padat (sampah) maupun pembakaran limbah pertanian/perkebunan. Untuk itu, pengembangan teknik pengelolaan sampah residu dengan proses thermal (pembakaran) yang melibatkan proses gasifikasi semakin mendapatkan perhatian agar selain berperan dalam pengelolaan sampah maupun limbah pertanian/perkebunan sekaligus juga menghasilkan sumber energi gas yang bernilai ekonomis.

10.2 Tahap Proses Gasifikasi

Pada umumnya, proses gasifikasi akan berlangsung dalam beberapa tahapan, yakni proses pengeringan, pirolisis/devolatilisasi, reduksi dan oksidasi. Persamaan reaksi yang terjadi akan melibatkan karbon, karbon monoksida, karbon dioksida, hydrogen, uap air dan metana. Rangkaian tahap-tahap tersebut yakni:

1. Tahap Pemanasan Awal : pada tahap ini akan terjadi peningkatan temperature sampai terjadi proses pengurangan

- kadar air. Proses penguapan bisa juga dilakukan dengan menggunakan sinar matahari (kalau cuaca memungkinkan).
2. Tahap Pengeringan : pada tahap ini akan mulai terjadi pelepasan gas dalam bentuk uap air dari bahan padat yang dikeringkan. Pada proses pengeringan yang berlangsung pada bagian paling awal dari reactor gasifier menggunakan kondisi suhu yang paling rendah yakni suhu $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proses ini sangat penting dilakukan agar proses pengapian pada burner dapat lebih cepat dan lebih stabil karena akan menghilangkan kandungan air dalam bahan bakar dengan cara penguapan yang membutuhkan energi sekitar 2260 kJ.
 3. Tahap Pemanasan Lanjut: pada tahap ini terjadi peningkatan temperature padatan sampai sebelum terjadinya proses devolatilisasi. Pada reaksi pirolisis/devolatilisasi terjadi secara bertahap mulai dengan suhu $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada reaksi pirolisis penguapan pertama akan terjadi pada suhu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, kemudian terjadi proses dekomposisi kandungan hemiselulosa pada suhu 200 s.d. $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, kandungan selulosa pada suhu 240 s.d. $340\text{ }^{\circ}\text{C}$, kandungan lignin pada suhu 280 s.d. $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga pada suhu $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ proses reaksi pirolisis akan masuk pada tahap akhir.

Secara umum, dengan laju pemanasan $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{detik}$ maka proses reaksi pirolisis akan selesai pada waktu 1 menit atau dengan laju pemanasan $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{detik}$ maka reaksi pirolisis akan selesai pada waktu 5 detik. Semakin tinggi laju pemanasan akan mempercepat proses reaksi pirolisis yang menghasilkan produk cair yang mudah menguap (mengandung tar dan poliaromatik hidrokarbon/PAH) dan gas (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4) serta arang.

4).Tahap Devolatilisasi: pada tahap ini semua zat volatile seperti H_2O , H_2N_2 , O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 , C_6H_6 dan HC tidak jenuh dalam padatan berubah menjadi gas sampai tersisa bahan berupa arang.

Pada proses reaksi reduksi yang berlangsung pada suhu 500 s.d. $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ merupakan reaksi endotermik yang mendapatkan panas dari proses pembakaran. Pada proses ini dibagi dalam beberapa jenis reaksi yakni : (a) reaksi Boudouard yang merupakan reaksi antara

karbondioksida yang terdapat dalam gasifier dengan arang untuk menghasilkan karbonmonoksida; (b) *water gas reaction* yang merupakan reaksi oksidasi parsial karbon dari bahan bakar hasil pirolisis; (c) *shift reaction* yang merupakan reaksi reduksi karbonmonoksida untuk menghasilkan hydrogen; (d) *methanation* yaitu reaksi pembentukan gas metana.

Pada reaksi oksidasi atau pembakaran terjadi pada suhu 700 s.d. 1500 °C merupakan tahap yang terpenting dalam proses gasifikasi. Pasokan oksigen dari luar yang dimasukkan kedalam reactor akan berreaksi dengan substansi yang mudah terbakar. Hasil reaksi tersebut adalah CO_2 dan H_2O yang secara berurutan direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada reaksi pirolisis sebelumnya. Terdapat elemen penting dalam proses reaksi pembakaran ini yang meliputi panas (*heat*), bahan bakar (*fuel*) dan udara (*oxygen*). Karena di udara kandungan terbesar adalah nitrogen, maka akan terjadi kemungkinan intervensi dari nitrogen tersebut untuk membentuk polutan NO_2 yang mencemari udara. Selain itu, keberadaan nitrogen ini dapat menyerap panas pada proses pembakaran sehingga menurunkan efisiensi pembakaran.

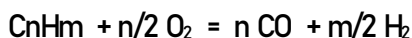
Aplikasi proses gasifikasi seperti yang diuraikan di atas dapat dilihat pada Tabel 10.1. Dalam table tersebut tipe reaksi yang diuraikan mencantumkan juga persamaan reaksi dan kalor yang diperlukan/dihasilkan. Kalor yang diperlukan lebih banyak dari pada kalor yang dihasilkan, sehingga proses gasifikasi pada dasarnya merupakan reaksi endoterm.

Tabel 10.1. Reaksi Gasifikasi pada Suhu 25°C

Reaction Type	Reaction
Carbon Reactions	
R1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}^1$
R2 (water-gas or steam)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}^2$
R3 (hydrogasification)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}^2$
R4	$C + 0.5 O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}^1$
Oxidation Reactions	
R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}^2$
R6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}^4$
R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}^3$
R8	$H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}^4$
Shift Reaction	
R9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}^4$
Methanation Reactions	
R10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}^4$
R11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}^4$
R14	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \text{ kJ/mol}^2$
Steam-Reforming Reactions	
R12	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ kJ/mol}^3$
R13	$CH_4 + 0.5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}^3$

Sumber: Basu (2010).

Apabila seluruh reaksi yang di atas sudah selesai maka akan tercapai keseimbangan komposisi antara bahan pereaksi dengan produk berupa gas. Hal yang juga perlu diperhatikan adalah konversi senyawa karbon yang harus terselesaikan. Reaksi-reaksi diatas memerankan bagian penting dalam memproduksi gas CO murni apabila terjadi proses gasifikasi karbon dengan gabungan oksigen dan karbondioksida. Untuk proses gasifikasi bahan bakar minyak terjadi reaksi keseluruhan sebagai berikut:



Apabila reaksi berupa metana maka nilai $m=4$ dan nilai $n=1$ sehingga $m/n = 4$, sedangkan untuk minyak nilai $m/n = 2$ dan untuk batu bara nilai $m/n = 1$.

10.3 Aplikasi Proses Gasifikasi

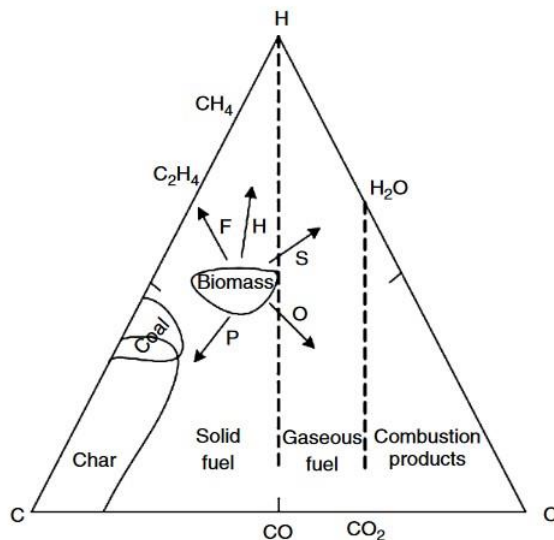
Proses gasifikasi yang menghasilkan gas pada awalnya diaplikasikan sebagai penerangan dan pemanasan. Pembakaran bahan padat yang awalnya berupa kayu pada awal munculnya peradaban umat manusia kemudian dengan seiring semakin berkembangnya peradaban manusia maka aplikasi proses gasifikasi berubah dengan memanfaatkan batu bara yang disediakan oleh alam di kawasan pertambangan. Pada awal tahun 1800-an sampai 1900-an negara-negara di benua Eropa yang memiliki musim dingin yang ekstrim memanfaatkan proses gasifikasi untuk kebutuhan penerangan dan energi. Setelah meningkatnya persaingan perdagangan dan industry, serta diikuti dengan perebutan kekuasaan dan pengaruh global, yang memicu timbulnya Perang Dunia I dan II, maka perkembangan gasifikasi semakin penting untuk mengimbangi berkurangnya pemakaian sumber energi minyak yang semakin mahal. Adanya embargo bahan bakar minyak pada tahun 1970-an oleh negara penghasil minyak juga memicu negara-negara besar di dunia termasuk Amerika Serikat untuk semakin mengembangkan teknologi gasifikasi skala industri.

Pemanfaatan gas untuk pemanasan ruangan banyak digunakan karena dirasakan lebih mudah dalam aplikasinya, khususnya di kawasan perkotaan yang memiliki infrastruktur yang memadai. Walaupun pada tahap berikutnya, pemanfaatan gas untuk pemanasan karena menghasilkan nilai kalor yang masih rendah mulai dikalahkan oleh penggunaan produk pemanas listrik, namun di kawasan yang sudah memiliki infrastruktur gas masih tetap menjadi pilihan yang lebih efisien karena masyarakat sudah terbiasa dalam penggunaannya dan bersamaan dimanfaatkan juga untuk aktivitas di dapur.

Perkembangan teknologi dibidang peralatan yang menggunakan gas seperti reactor gas yang portable dan simple

serta kemudahan dalam penyimpanan gas memicu semakin populernya pemanfaatan gas untuk berbagai kebutuhan manusia. Pemanfaatan batu bara sebagai pengganti arang menggunakan metode pirolisis yang menghasilkan nilai kalor yang relative tinggi (sekitar 20.000 s.d. 23.000 kJ/m³) dan proses gas-air yang menghasilkan nilai kalor sekitar 12.000 kJ/m³. Aplikasi proses gasifikasi berikutnya mulai mengarah kepada penggunaan industry hingga energi listrik.

Gas oksigen merupakan agen gasifikasi yang populer dan aplikasinya banyak digunakan. Prosesnya dapat disuplay melalui gasifier daam bentuk murni atau melalui udara. Nilai kalor dan komposisi gas yang dihasilkan dalam gasifier adalah fungsi yang kuat dari sifat dan jumlah zat gasifikasi yang digunakan.



Gambar 10.1. Diagram C-H-O dalam Proses Gasifikasi
Sumber: Basu (2010)

Aplikasinya dapat dilihat pada Diagram C-H-O pada proses gasifikasi pada Gambar 10.1. Berdasarkan diagram tersebut, dapat dilihat bahwa jika oksigen digunakan sebagai bahan gasifikasi maka jalur konversi bergerak ke arah sudut oksigen. Proses ini akan menghasilkan produk CO untuk oksigen rendah dan CO₂ untuk oksigen

tinggi. Ketika jumlah oksigen melebihi kadar tertentu, maka prosesnya akan berpindah dari gasifikasi menuju proses pembakaran yang menghasilkan gas buangan yang tidak memiliki kandungan kalor sisa saat didinginkan. Pergerakan menuju sudut oksigen menyebabkan penurunan kandungan hydrogen dan peningkatan gas CO dan CO₂. Sebaliknya jika yang digunakan uap sebagai bahan gasifikasi maka pergerakan akan mengarah ke sudut hydrogen yang menghasilkan semakin banyak produk hydrogen per unit karbon dan rasio H/C akan semakin tinggi. Gas CO dan H₂ sebagai perantara pada proses gasifikasi dapat membantu aplikasi karbon padat.

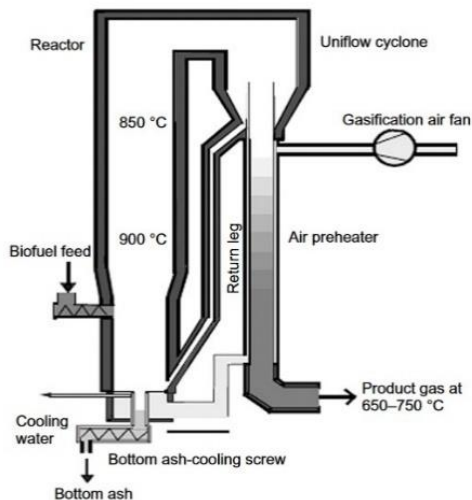
Pemilihan bahan gasifikasi sangat mempengaruhi nilai kalor dari gas produk, sehingga pemahaman terhadap karakteristik dan penyusun material gasifikasi sangat bermanfaat dalam efisiensi proses gasifikasi. Beberapa material batu bara memiliki karakter yang sangat baik sehingga gas yang dihasilkan memiliki nilai kalor yang tinggi. Jika udara digunakan sebagai pengganti oksigen maka nitrogen yang terkandung paling banyak dalam udara akan mengencerkan produk. Oleh karena itu, penggunaan oksigen adalah yang paling baik diikuti oleh uap dan udara.

Aplikasi proses gasifikasi dengan menggunakan biomassa sebagai material bahan padat yang terbentuk melalui interaksi antara materi yang terkandung dalam air, udara dan tanah dengan sinar matahari melalui proses fotosintesis merupakan yang paling umum. Biomassa yang mengandung unsur karbon, oksigen, hydrogen dan nitrogen yang terdapat pada bahan bakar kayu, limbah dan residu alcohol untuk menghasilkan energi yang termasuk energi terbarukan sehingga dikenal sebagai sumber energi yang berkelanjutan. Proses ini sangat berperan dalam Upaya penyelamatan lingkungan dengan mengurangi penggunaan bahan bakar minyak yang tidak termasuk energi terbarukan.

10.4 Jenis Gasifikasi

Proses pembentukan gas dari reaksi-reaksi yang melibatkan bahan padat dalam reactor gasifier dapat dibagi dalam beberapa jenis, diantaranya:

1. Apabila bahan bakar yang diumpankan melewati bagian atas dari reactor maka dikenal dengan jenis *moving bed*. Bahan bakar tersebut secara perlahan akan bergerak untuk mengalami reaksi dengan uap dan oksigen yang berembus dari arah yang berlawanan. Proses reaksi akan berlangsung hingga tuntas untuk menghasilkan syngas suhu rendah dengan abu cair.
2. Apabila bahan bakar yang digunakan berupa bahan kering atau basah yang bergerak ke dalam gasifier disebut jenis *entrained flow*. Reaktan berupa uap dan oksigen mengalir dari arah tinggi ke bawah gasifier untuk menghasilkan syngas yang keluar dari bagian atas reactor dan terak cair akan menetes di bagian bawah.
3. Apabila bahan bakar diinjeksikan kedalam reactor dan tetap tersuspensi dalam aliran uap dan oksigen disebut jenis *fluidized bed*. Dalam Gambar 10.3. Dapat dilihat sirkulasi gas yang terjadi dalam jenis ini. Jenis gasifikasi ini akan mengeluarkan abu yang meleleh dan syngas yang suhunya rendah. Model *fluidized bed* ini terbagi dalam tiga jenis berdasarkan mode fluidisasinya, yakni jenis fluidisasi tetap (*fixed bed gasification*), jenis terfluidisasi (*fluidized bed gasification*), dan jenis fluidisasi mengalir searah (*entrained fluidized gasification*).



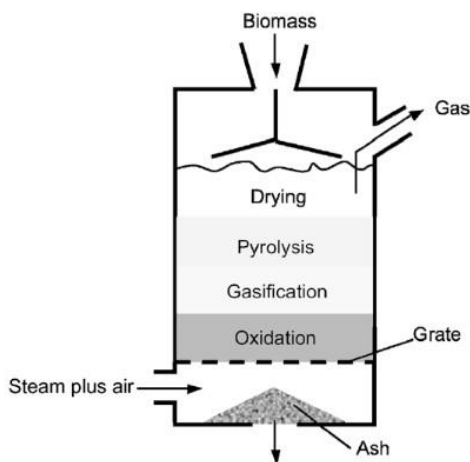
Gambar 10.2. Sirkulasi gas dalam jenis *fluidized bed gasifier*
 Sumber : Basu (2010).

Berdasarkan arah alirannya, *fluidized bed* terbagi atas reactor aliran berlawanan (*updraft gasifier*), reaktor aliran searah (*downdraft gasifier*), dan reactor aliran menyilang (*crossdraft gasifier*).

1. *Updraft gasifier*

Updraft gasifier adalah desain yang paling tua di dunia yang aliran media gasifikasinya (udara, oksigen atau uap) bergerak ke atas sementara lapisan bahan bakar bergerak ke bawah sehingga pergerakan antara gas dan padatan berada pada posisi berlawanan. Pada Gambar 10.3 dapat dilihat bahwa produk keluar dari atas.

Media gasifikasi memasuki jeruji distributor yang kemudian bertemu dengan lapisan abu yang panas. Abunya jatuh melalui jeruji, yang sering kali dibuat bergerak (berputar atau bolak-balik), terutama dalam satuan besar untuk memudahkan pembuangan abu. Gasifier updraft cocok untuk biomassa dengan kadar abu tinggi (hingga 25%), kelembaban tinggi (naik hingga 60%). Sistem ini cocok untuk bahan bakar yang mudah menguap seperti arang.



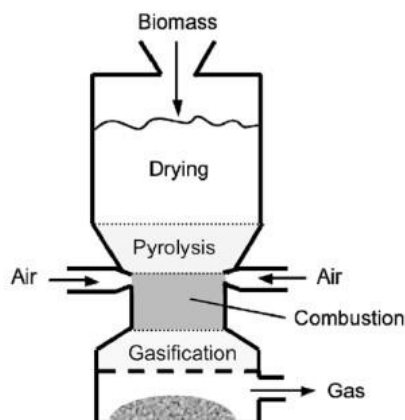
Gambar 10.3. *Updraft Gasifier*
Sumber: Basu, 2010

Pada system *updraft gasifier* produksi tar sangat tinggi ($30\text{--}150\text{ g/nm}^3$), sehingga tidak cocok untuk bahan bakar dengan volatilitas tinggi. Di sisi lain, sebagai unit arus balik, *gasifier*

updraft memanfaatkan panas pembakaran dengan sangat efektif dan mencapai efisiensi gas dingin yang tinggi. Oleh karena itu, lebih cocok untuk pembakaran langsung, dimana gas yang dihasilkan dibakar dalam tungku atau boiler tanpa diperlukan pembersihan atau pendinginan. Karena gas tidak dibakar di dalam mesin atau disimpan, tar yang dihasilkan tidak perlu dibersihkan. *Gasifier updraft* dapat digunakan secara komersial pada unit kecil seperti kompor memasak pedesaan dan dalam unit besar seperti minyak sintetis untuk pengurangan penggunaan bensin dari batu bara.

2. *Downdraft gasifier*

Downdraft gasifier adalah reaktor arus bersama dimana udara memasuki gasifier pada ketinggian tertentu di bawah puncak. Gas produk mengalir ke bawah yang aliran gas dan padatnya sama-sama ke arah bawah dan keluar melalui lapisan abu panas seperti pada Gambar 10.4. Setelah itu produk akan melalui zona suhu tinggi abu panas sehingga tar yang dihasilkan adalah yang terendah. Penggunaan reaktor ini sangat banyak karena menghasilkan kandungan tar yang rendah sekitar 0,015 s.d. 3 g/Nm³. Selain itu, reaktor ini juga memerlukan waktu yang singkat (20 s.d 30 menit) untuk menyalakannya sehingga lebih efisien.

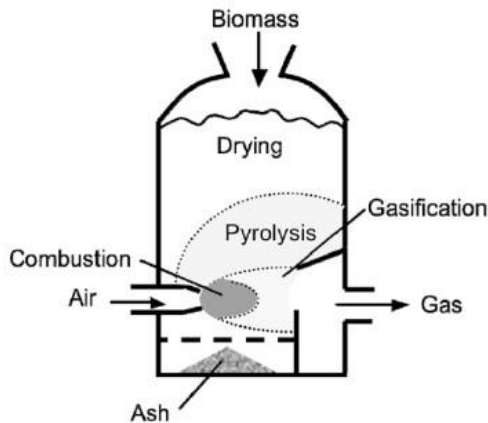


Gambar 10.4. *Downdraft gasifier*

Sumber: Basu,2010

3. *Crossdraft gasifier*

Crossdraft gasifier adalah reaktor yang aliran gasnya menyilang dan aliran padatnya ke atas dan ke bawah sesuai dengan posisinya. Pada Gambar 10.5, dapat dilihat bahwa bahan bakar diumpankan dari atas dan udara diinjeksikan dari nosel dari bagian samping. Reaktor jenis ini sangat cocok digunakan untuk unit biomassa skala kecil karena waktu untuk menyala relative cepat (5 s.d.10 menit) namun kapasitas thermalnya umumnya kecil.



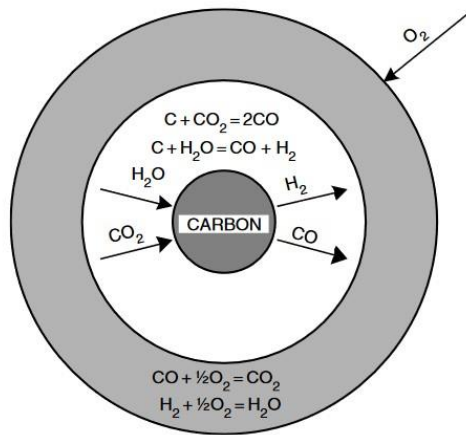
Gambar 10.5. *Crossdraft gasifier*
Sumber: Basu(2010)

Dalam proses gasifikasi digunakan berbagai *gasifying agent*. Gasifikasi yang menggunakan udara disebut dengan gasifikasi udara, sedangkan yang menggunakan uap disebut gasifikasi uap. Variasi dalam proses gasifikasi yang menggunakan udara dan uap memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Namun karena proses gasifikasi terus berkembang teknologinya maka aplikasinya lebih banyak melihat dari sisi efisiensi dan kenyamanan dalam penggunaannya gas yang dihasilkan.

Temperatur sangat penting dalam proses gasifikasi karena berpengaruh terhadap proses terbentuknya produk dan waktu

yang diperlukan dalam proses reaksi. Temperatur yang terlalu tinggi akan berpengaruh pada ketahanan reactor terutama pada membrane dan dindingnya. Sayangnya pengukuran suhu gasifier yang akurat sangatlah sulit. Hal ini dapat dipahami baik dari alasan teoritis maupun praktis.

Pada Gambar 10.6, dapat dilihat suatu model gasifikasi yang dibuat oleh Van Loon untuk menjelaskan fenomena ‘suhu bola basah kimia’. Dalam model ini, dijelaskan bahwa pada permukaan karbon padat terjadi reaksi endotermik yang menghasilkan CO_2 dan H_2O . Sedangkan pada bagian dalam reactor akan terjadi reaksi eksotermik yang menghasilkan CO dan H_2 . Mekanisme ini membentuk pirometer yang tidak banyak berguna untuk pengukuran yang tepat karena tidak dapat dipastikan apakah suhu yang diukur didominasi oleh suhu yang relative sejuk tetapi lebih kuat memancarkan partikel padat atau gas.



Gambar 10.6. Model Gasifikasi Van Loon's
Sumber : Higman (2003)

Pengukuran suhu masih menghadapi kendala praktis karena pada saat aliran gas yang menghantam pelindung keramik pada selubung dinding reactor pada termokopel akan menimbulkan kerusakan erosi kerak dari zat pengotor yang terkandung. Kondisi ini

dapat menghasilkan gas hydrogen yang mampu menembus logam termokopel yang dapat menyebabkan pembacaan yang salah. Dimana nitrogen atau gas pembersih lainnya digunakan untuk melindungi perakitan termokopel yang berdampak pada pendinginan local yang menyebabkan variasi pembacaan suhu. Sesuai model Van Loon, dapat dipahami posisi penempatan termokopel pada beberapa jenis reactor yang agak ke dalam dengan ujung rakitan agak masuk ke dalam dinding untuk menghindari dari kerak atau kerusakan erosi dapat berpengaruh pada keakuratan pengukuran. Suhu sebenarnya diukur lebih dekat dengan refraktori dibandingkan dengan inti reaktor dan sehingga sangat bergantung pada sejauh mana kedalaman penarikan dari ruang reaktor. Terlepas dari kekurangan ini, termokopel platina-rhodium masih menjadi yang terbanyak perangkat umum yang saat ini digunakan untuk pengukuran suhu gasifier Itu diterima bahwa keakuratan pengukuran suhu kurang penting dibandingkan konsistensi. Untuk operator gasifier yang telah mengatur input umpannya berdasarkan parameter lain, pembacaan suhu yang terus menerus dan stabil lebih penting daripada pembacaan suhu absolut nilai yang ditampilkan.

Proses gasifikasi yang mengalami pengembangan secara terus menerus masih memerlukan perhatian dalam mengelola produk ikutan yang tidak diperlukan. Beberapa pengotor tersebut perlu dibersihkan selain temperature yang masih tinggi perlu diturunkan untuk bisa digunakan secara efektif dan nyaman. Unsur yang tidak diperlukan tersebut seperti partikel padatan (PM), senyawa halide, alkali, belerang, dan nitrogen, serta senyawa organik seperti tar, aromatic dan karbondioksida. Metode penyaringan zat pengotor dalam proses gasifikasi dilakukan dengan dua metode umum yakni dengan metode filtrasi basah (*wet scrubber*) dan metode filtrasi kering (*dry scrubber*). Metode pembersihan yang ada memiliki Tingkat kecanggihan yang beragam yang berpengaruh pada aspek pembiayaan yang juga bervariasi. Yang penting dalam metode pembersihan ini adalah pemenuhan terhadap baku mutu lingkungan yang dipersyaratkan oleh kebijakan pemerintah.

10.5 Keunggulan Proses Gasifikasi

Beberapa keunggulan teknologi gasifikasi diantaranya:

1. Gas yang dihasilkan memiliki sifat yang konsisten sehingga banyak digunakan sebagai pembangkit Listrik
2. Bahan padat yang dapat dilakukan proses gasifikasi sangat beragam seperti sampah domestic, batu bara, minyak mentah berat, biomassa, dan lain lain.
3. Proses gasifikasi akan meningkatkan nilai sampah menjadi barang yang lebih bernilai
4. Proses gasifikasi sangat efektif memusnahkan sampah menjadi benda yang lebih bermanfaat
5. Proses gasifikasi tidak menghasilkan gas yang mengandung furan dan dioksin yang berbahaya.

Pada masa sekarang, peranan teknologi gasifikasi banyak dimanfaatkan dalam upaya mengelola limbah baik dari aktivitas pertanian/perkebunan maupun aktivitas domestic. Dalam aplikasinya terdapat beberapa factor yang mempengaruhi produksi gasnya seperti kandungan dan sifat bahan bakarnya. Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki bahan bakarnya maka akan dihasilkan produksi gas yang lebih baik. Kandungan air (*moisture*) dalam bahan bakar juga sangat berpengaruh terhadap hilangnya suhu yang terkandung dalam syngasnya. Idealnya kandungan *moisture* kurang dari 20% untuk mendapatkan produk yang baik. Kandungan abu yang dihasilkan dalam proses gasifikasi sebaiknya sekitar 2-6 g/m³. Kandungan tar dalam produk syngas sangat merugikan karena sifatnya yang korosif sehingga kandungan tar harus dihilangkan agar produk dapat dimanfaatkan dengan baik. Selain itu, kandungan abu dapat mengotori dan menyumbat reactor gasfier.

Perbandingan bahan bakar dan udara dalam proses gasifikasi mempengaruhi reaksi yang terjadi dan kandungan produksi gas yang dihasilkan. Kebutuhan udara dalam proses gasifikasi berada pada batas energi pirolisis dan pembakaran, karena diperlukan rasio yang tepat agar produknya baik. Gasifikasi pada bahan bakar biomassa yang baik nilai panas bersih (LHV), kandungan *moisture* dan kandungan abu seperti pada Tabel 10.2.

Tabel 10.2. Karakteristik tipikal umpan reactor untuk pembangkitan energi

Jenis	LHV (kJ/kg)	Kandungan moisture (%)	Kandungan abu (%)
Ampas tebu	7.700-8.000	40-60	1,7-3,8
Kulit ari coklat	13.000-16.000	7-9	7-14
Kulit kelapa	18.000	8	4
Kulit ari kopi	16.000	10	0,6
Residu kapas			
- Tangkai	16.000	10	0,1
- Sampah biji	14.000	9	12
Gambut	14.000	9	19
Sekam padi	12.000	10	4,4
Arang	25.000-32.000	1-10	0,5-6

Sumber : Budiarto,et al (2021).

Dalam proses gasifikasi biomassa perlu diperhatikan karakteristik fisik, kimia dan morfologi umpan bahan bakarnya. Pengolahan awal bahan baku juga dipengaruhi oleh karakteristik gasifier seperti kapasitas dan jenis reactor. Jenis reactor tipe *downdraft* lebih memerlukan homogenitas biomassa dibandingkan dengan tipe *updraft*.

Pemurnian producer gas diperlukan untuk mengkondisikan producer gas sebelum diumpankan ke dalam mesin pembakaran bagian dalam yang memerlukan pembersihan dari partikulat dan tar. Pada producer gas yang masih kotor terdapat kandungan tar di atas 50 s.d. 100 mg/Nm³. Adanya partikel padat berupa partikulat dapat merusak bagian mesin yang bergerak. Sistem perpipaan di dalam reactor dapat mengalami sumbatan akibat keberadaan tar yang mengalami kondensasi. Yang akan menimbulkan masalah apabila producer gas tersebut dialirkan ke bagian intake dari reactor. Parameter kualitas syngas yang dapat diaplikasikan pada mesin pembakaran internal disajikan pada Tabel 10.3.

Tabel 10.3. Parameter kualitas syngas untuk pembangkit daya

Komponen	Satuan	IC engine	Gas turbine	Methanol synthesis
Partikel	mg/Nm ³	< 50	< 30	<0,02
Ukuran partikel	µm	< 10	< 5	
Tar	mg/Nm ³	< 100		< 0,1
Alkali	mg/Nm ³		0,24	
NH ₃	mg/Nm ³			< 0,1
H ₂ S dan CO	mg/Nm ³			< 1
Cl	mg/Nm ³			< 0,1
LHV gas	kJ/Nm ³	>2.500		

Sumber : Budiarto (2021).

Desain dari gasifier sangat berpengaruh pada kualitas produk gas termasuk konsentrasi partikulat yang timbul. Jenis gasifier fixed bed akan menghasilkan konsentrasi partikulat yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis gasifier fluidised bed. Proses pembersihan partikulat tersebut dilakukan dengan menggunakan *dry gas collectors* seperti siklon separator, *barrier filter*, dan *electrostatic precipitator*. Siklon beroperasi pada suhu 100 s.d. 900 °C dan di desain untuk menangkap partikel padat dengan ukuran di atas 5 mm dengan kemampuan penyaringan hingga 90 %. Penggunaan siklon untuk membersihkan partikulat sangat efektif karena Sebagian besar (60 s.d. 65 %) producer gas memiliki ukuran di atas 60 mm.

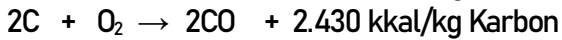
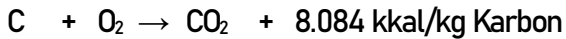
10.6 Proses gasifikasi dalam incinerator

Proses gasifikasi untuk kebutuhan pengelolaan lingkungan banyak dilakukan dengan bahan bakar limbah seperti limbah medis dan limbah B3. Proses pembakaran limbah dengan insinerator pada umumnya sebagai berikut.

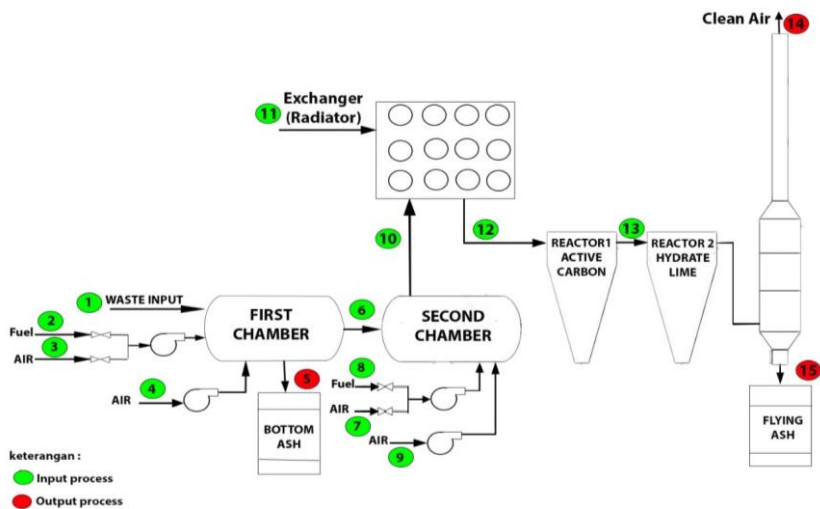
1. Proses Pengumpulan Limbah

Limbah yang datang dibawa oleh kendaraan pengangkut akan langsung dimasukan ke insinerator dengan menggunakan alat otomatis ke dalam *Chamber 1*. Disiapkan juga *cold storage* untuk cadangan apabila ada limbah yang tidak bisa langsung diolah. Peningkatan suhu ruang bakar dilakukan dengan pembakaran

sejumlah bahan bakar (gas alam) yang menghasilkan panas dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Pada Gambar 10.7 dapat dilihat proses pembakaran yang dilakukan yang memperlihatkan produk akhir dari keseluruhan proses adalah residu abu (ash residu). Dimulai dari dimasukkannya limbah kedalam chamber I dan II yang mengalami proses pembakaran dalam suhu tinggi hingga keluarnya emisi dan abu. Seluruh residu abu akan dikumpulkan untuk dikirim kepada perusahaan yang memiliki izin untuk pengolahannya.



Gambar 10.7. Proses Gasifikasi limbah dalam Incinerator
Sumber: Brunner(1993)

2. Proses Insinerasi di *Chamber I*

Pembakaran di *Chamber I* berlangsung pada kondisi 'starved air' (pembakaran limbah dengan suplai oksigen/udara yang terbatas). Pembakaran menggunakan burner yang akan

memanaskan dan membakar limbah. Kondisi *starved air* akan menghasilkan proses pirolisa (pembakaran parsial), dimana material organik dalam limbah akan terurai menjadi gas-gas yang mudah terbakar (*combustible gases*) seperti metana (CH_4), etana (C_2H_6) dan karbon monoksida (CO). Selama pembakaran temperatur di ruang bakar dijaga pada rentang min 850 - max 1100 °C. Udara untuk pembakaran disuplai ke ruang bakar melalui plenum dan lubang-lubang udara yang terpasang di dinding ruang bakar. Susunan lubang-lubang udara berfungsi untuk meratakan distribusi udara ke seluruh lapisan limbah dengan memaksimalkan turbulensi, sehingga diperoleh pembakaran yang sempurna. Suplai udara diatur dengan bukaan *dampers* otomatis untuk menghasilkan laju pirolisa yang optimum dan turbulensi yang minimal sehingga mencegah terbawanya partikel bersama gas.

Gas-gas yang terbentuk pada pembakaran di *Chamber I* ini selanjutnya mengalir ke *Chamber II*. Gas-gas hasil pembakaran tergantung pada komposisi limbah yang dibakar. Berdasarkan komposisi limbah medis yang dilayani maka kemungkinan gas-gas yang terbentuk adalah CH_4 , CO , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , SO_2 , dan abu (*bottom ash*). Abu sisa pembakaran selanjutnya dikeluarkan secara manual dari *Chamber I* pada saat suhu telah dingin.

3. Proses insinerasi di *Chamber II*

Proses pembakaran di *Chamber II* adalah membakar gas-gas yang dihasilkan pada pembakaran di *Chamber I*. Gas-gas yang dibakar pada *Chamber II* ini antara lain adalah CH_4 , CO , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , SO_2 , Sulfur. Pembakaran di *Chamber II* dilakukan secara sempurna dengan memberikan suplai oksigen yang berlebih. Pembakaran sempurna menghasilkan CO_2 dan H_2O . Pembakaran di *Chamber II* dilakukan dengan menggunakan *burner* berbahan natural gas. Suhu pembakaran dipertahankan pada 850 - 1100 °C. Lama pembakaran di ruang ini dirancang minimal 2,10 detik (standar minimal 2,00 detik). Dengan pembakaran sempurna (udara berlebih) dan suhu tinggi maka seluruh gas-gas beracun akan terurai menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana. Namun demikian pembakaran suhu tinggi berkemungkinan akan

menghasilkan senyawa berbahaya lain seperti NO_x yang berasal dari suplai udara.

4. Penanganan Gas Buang

Proses pembakaran akan menghasilkan gas buang yang mengandung uap air, nitrogen, karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NO_x), oksigen dan partikulat. Beberapa senyawa ini berbahaya untuk kesehatan oleh karena itu gas ini harus dibersihkan (*gas cleaning*) sebelum dibuang atau dilepas ke udara. Gas panas dan partikel yang masih tersisa akan masuk kedalam *Boiler Energy Recuperation* yang akan mengambil energy panas. *Partikel Volatile* akan diinjeksi oleh *Hydrated Lime Chorbacal* untuk masuk ke dalam Reactor yang akan menangkap logam-logam berat. Active Charcoal akan diinjeksikan melalui injektor untuk menangkap partikel mikro yang masih tersisa. Selanjutnya partikel mikro tersebut akan dimasukkan kedalam filter keramik. Apabila berdasarkan uji coba terdapat gas-gas asam (HCl , HF), maka ke dalam aliran gas buang diinjeksikan larutan kapur guna menaikkan pH mendekati pH normal. Dosis kapur ditentukan setelah ada hasil uji coba. Selain kapur juga diinjeksikan karbon aktif (*activated carbon*) untuk membuang senyawa-senyawa organik yang berbahaya seperti dioxins dan POHC (apabila dalam uji coba terdapat senyawa tersebut) dan logam-logam volatile lainnya seperti merkuri dan cadmium. Karbon aktif memiliki pori-pori yang halus dimana logam-logam akan menempel dan kemudian disaring. Gas yang sudah bersih kemudian dialirkan ke lingkungan melalui *chimney* (cerobong) yang akan dilakukan monitoring secara otomatis dan dikirimkan datanya ke sistem komputer yang ada di pusat pengendalian. Baku mutu emisi udara incinerator untuk emisi dioxin dan furan sebesar $0,1 \text{ ng TEQ/Nm}^3$.

5. Penanganan *Bottom Ash* (Residu Abu)

Pada akhir pembakaran limbah medis terdapat sisa-sisa material yang tidak dapat terbakar (residu). Residu yang tersisa disebut *bottom ash*, yang dikeluarkan di bagian bawah ruang pembakaran. *Bottom ash* sekitar 5 - 10% berat limbah yang

dibakar. *Bottom ash* yang tersisa secara teoritis sudah tidak berbahaya (namun dikategorikan limbah B3 kategori 1) dan dapat digunakan dalam aplikasi lain seperti agregat dalam beton atau untuk pembangunan jalan. Dengan demikian *bottom ash* (residu) yang dihasilkan akan di kirim ke pihak ketiga yang berizin untuk diolah lebih lanjut. Untuk menampung sementara abu sisa pembakaran disiapkan container.

6. Sistem Kontrol

Selama proses insinerasi, seluruh unit dan proses dikontrol melalui panel-panel control digital dan manual. Sistem control meliputi:

- a. Pengontrolan suhu menggunakan panel kontrol digital dalam operasionalnya untuk setting temperatur minimum dan maksimum didalam ruang pembakaran dan dapat dikontrol secara *automatic* dengan sistem *close loop*.
- b. Pengontrolan terhadap *burner* dan *blower* guna mengatur suplai udara dan bahan bakar.
- c. Pada panel digital dilengkapi dengan petunjuk temperatur, pengatur waktu (digunakan sesuai kebutuhan), dan dilengkapi dengan tombol pengendali *burner* dan *blower* dengan terdapatnya lampu isyarat yang memadai dan memudahkan operasi.
- d. Automatic shutdown pada masing-masing unit insinerasi apabila terjadi *trouble*. Pada saat terjadinya kondisi shutdown, panel monitor akan segera memberitahu jenis permasalahan yang terjadi dan mekanisme perbaikan yang harus dilakukan.
- e. Pada setiap blok/unit terpasang kamera untuk memonitor proses yang sedang berjalan.

7. Trial Burning Test

Trial burning test atau ujicoba pembakaran dilakukan untuk menguji performa pembakaran dari incinerator. Uji coba dilakukan pada semua peralatan utama dan penunjang termasuk alat pengendalian kualitas udara. Hasil pengujian kemudian di bandingkan dengan baku mutu. Apabila hasil pengujian belum

memenuhi baku mutu maka dilakukan perbaikan pada terhadap unit-unit incinerator yang bermasalah.

Tujuan utama dari kegiatan *trial burning test* adalah:

- a. Mendapatkan deskripsi kualitatif dan kuantitatif tentang limbah medis yang dibakar seperti POHCs, PCBs, PCFDs, PCDDs, halogen, total hidrokarbon (THC), sulfur dan timah hitam.
- b. Mendapatkan deskripsi kualitatif dan kuantitatif tentang emisi udara termasuk POHCs, produk pembakaran tidak sempurna, (PICs)
- c. Mendapatkan deskripsi kualitatif dan kuantitatif tentang limbah cair yang di keluarkan (*effluent*) dari pengoperasian incinerator dan peralatan pencegahan pencemaran udara, termasuk semua POHCs, PICs dan parameter lainnya.
- d. Menentukan kondisi operasi incinerator seperti suhu ruang bakar, retention time gas di ruang bakar (minium 2 detik), konsentrasi excess oksigen di exhaust pengeluaran.
- e. Menentukan kondisi meteorologi yang spesifik dan kondisi ambient dari POHCs dan PICs.
- f. Menentukan efisiensi penghancuran dan penghilangan sifat limbah medis (DRE).
- g. Menentukan efisiensi pembakaran.

10.7 Penutup

Aplikasi proses gasifikasi yang dikembangkan sejak lama ternyata masih bisa bermanfaat untuk menyelesaikan berbagai permasalahan manusia hingga sekarang. Situasi dunia yang dilanda krisis dibidang energi akibat terjadinya perang serta semakin terkurasnya sumber daya alam memicu upaya-upaya memanfaatkan bahan yang terbuang seperti limbah untuk sumber energi. Salah satu upaya yang sedang banyak dilakukan di Indonesia adalah menyiapkan briket dari bahan sampah dan limbah pertanian/perkebunan. Dengan mengadopsi keberadaan briket batu bara yang sudah ada sebelumnya, pengembangan briket berbahan dasar sampah sebagai bahan bakar alternatif selain bermanfaat untuk sumber energi, juga dapat menjadi solusi persampahan. Hanya kualitas briket ini harus

semakin ditingkatkan, seperti kadar karbon yang tinggi dan kadar air yang rendah.

Proses gasifikasi tidak banyak mengalami perubahan sejak mulai dikembangkan, namun perlu dilakukan inovasi dan kreatifitas dalam menciptakan reactor gasifier yang lebih efisien, efektif dan ramah lingkungan. Upaya kearah tersebut banyak dilakukan oleh lembaga yang menggeluti proses gasifikasi di berbagai negara di dunia. Sehingga akan semakin banyak tersedia reactor yang memiliki keunggulan dalam teknologinya, namun lebih efisien dalam pembiayaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Basu, P., 2010, Biomass Gasification and Pyrolysis, Elsevier Inc, Oxford UK
- Budiarto,H,Uman F.,Irawan I., 2021, Gasifikasi: Teori, Perancangan dan Penerapannya, Media Nusa Creative, Malang.
- Higman,C.,Burgt, M.,2003, Gasification, Elsevier Inc.,Amsterdam
- Brunner,C.R.,1993, Hazardous Waste Incineration, Second Edition, McGraw-Hill,Inc.,New York
- Hester,R.E, Harrison,R.M, Waste Incineration and the Environment, (1994), Royal Society of Chemistry, Cambridge

BIODATA PENULIS



Dr. Khairiah, S.Si., M.Si

Dosen Program Studi Pendidikan Fisika
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Muslim
Nusantara Al Washliyah, Medan Sumatera Utara

Penulis adalah anak pertama dari tiga bersaudara. Lulus dari SMA N 21 Medan Tahun 2007 dan melanjutkan ke jenjang S1 di Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Medan dengan beasiswa PPA setiap tahunnya dan lulus sebagai lulusan terbaik Tahun 2011, kemudian Tahun 2012 penulis mendapatkan kesempatan melanjutkan kembali pendidikan S2 di Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Bandung dengan beasiswa Voucher Institut Teknologi Bandung dan lulus dengan predikat *cumlaude*. Saat ini penulis berkarir sebagai Dosen dengan status PNS Dpk LLDIKTI Wilayah 1 di Universitas Muslim Nusantara Alwashliyah, Medan Sumatera Utara. Pada Tahun 2019 penulis mendapat kesempatan kembali untuk melanjutkan pendidikannya ke jenjang S3 di Universitas Sumatera Utara dengan beasiswa BPPDN Kemdikbud dan lulus 9 Agustus 2022 dengan predikat *cumlaude*. Penulis juga aktif melaksanakan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat di bidang Fisika Sains konsentrasi nanomaterial. Selain melakukan tridharma PT penulis juga menjabat sebagai Kepala Audit Mutu bersertifikat CIQA (*Certified International Of Internal Quality Audit*). Penulis dapat dihubungi melalui kontak e-mail: khairiah.umnaw@gmail.com, khairiahlubis@umnaw.ac.id

BIODATA PENULIS



Ropiudin, S.TP., M.Si.

Peneliti Senior Lab. Teknik Sistem Termal dan Energi Terbarukan
Dosen Program Studi Teknik Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Jenderal Soedirman

Penulis lahir di Cirebon tanggal 21 Juli 1977. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Pertanian Institut Pertanian Bogor dengan Peminatan Energi dan Elektrifikasi Pertanian dan melanjutkan S2 pada Program Studi Teknik Pertanian Institut Pertanian Bogor dengan Peminatan Teknik Energi Terbarukan. Saat ini penulis sedang menempuh jenjang doktoral pada Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian Institut Pertanian Bogor dengan kajian disertasi pada teknologi penyimpanan energi terbarukan. Matakuliah yang diampu yaitu energi terbarukan, teknologi bioenergi, audit energi, manajemen perencanaan energi terbarukan, energi dan elektrifikasi, pindah panas, dan termodinamika. Selain itu, penulis aktif di bidang penelitian dengan fokus penelitian pada teknik sistem termal dan energi terbarukan sebagai ketua tim peneliti dengan sumber biaya dari Rispro LPDP, Insinas, Hibah Pekerti, Hibah Bersaing, Inovasi Industri, Riset Terapan, sampai *Matching Fund*. Diseminasi teknologi ke masyarakat dilakukan bekerja sama dengan beberapa petani jagung, padi, gula kelapa, kopi, pala, cengkeh, serta pemerintah daerah dan desa guna memperkenalkan teknologi energi terbarukan

untuk diversifikasi energi dan efisiensi guna meningkatkan daya saing serta mendukung transisi energi bersih, *net zero emission*, *green economy*, dan pembangunan berkelanjutan.

Pengalaman dalam pengembangan institusi sebagai Ketua Program Studi Teknik Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Unsoed 2 Periode (2008-2012 dan 2012-2016), Sekretaris Pusat Penelitian Energi Baru dan Terbarukan LPPM Unsoed (2015-2019), serta kegiatan ad hoc lainnya di level fakultas, LPPM, LP3M, dan universitas, serta lembaga di luar kampus (PERTETA, METI, ADN, PII, dan WREN). Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: ropiudin@unsoed.ac.id

BIODATA PENULIS



Pande Putu Indira Prima Dewi, A.Md., S.Si.

Mahasiswa Magister Kimia

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana

Penulis lahir di Klungkung 13 Desember 1997 Penulis adalah mahasiswa magister pada Program Studi Pendidikan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia. Penulis menekuni bidang Menulis. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: indiraprimad13@gmail.com

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Dra. Ni Made Suaniti, M.Si

Dosen Program Studi Kimia

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana

Penulis lahir di Badung tanggal 17 September 1964. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran serta S3 di Biomedis dan Ilmu Kedokteran Dasar Fakultas Kedokteran Universitas Udayana. Penulis menekuni bidang Menulis melalui pendidikan atau pengajaran, penelitian hibah DIKTI dan perguruan tinggi serta pengabdian Udayana mengadi dan Hibah Bina desa Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: madesuaniti@unud.ac.id

BIODATA PENULIS



Andi Abdul Halik Lateko, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Pare-Pare tanggal 27 September 1974. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Indonesia, Serpong, dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Hasanuddin, Makassar. Penulis juga menyelesaikan pendidikan S3 pada Jurusan Teknik Elektro National Cheng Kung University, Taiwan. Penulis menekuni bidang Teknologi Renewable Energi. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: halik@unismuh.ac.id

BIODATA PENULIS



Prof.Dr.Wayan Budiarsa Suyasa

Penulis memiliki nama lengkap Prof.Dr.Wayan Budiarsa Suyasa, dilahirkan di Denpasar, Bali pada tanggal 03 Maret 1967. Riwayat pendidikan sarjana ditempuh selama 4 tahun di prodi Kimia Universitas Udayana, gelar Magister diraih tahun 1999 dan Doktor dibidang kimia lingkungan diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2002. Penulis memperoleh jabatan guru besar pada tahun 2010 dibidang kimia lingkungan di Universitas udayana yang menjadi tempatnya sebagai dosen. Berbagai mata kuliah dibidang kimia lingkungan diampu di prodi sarjana kimia, magister kimia, magister dan doktor ilmu lingkungan hingga sekarang . Penulis juga telah menulis beberapa buku dari hasil penelitian dan pengembangan pembelajaran. beberapa dengan topik terkait kimia lingkungan yaitu pengolahan air limbah, sampah, pengelolaan lingkungan, amdal baik secara mandiri maupun berkolaborasi.

BIODATA PENULIS



Wenny Surya Murtius

Dosen Departemen Teknologi Industri Pertanian
Fakultas Teknologi Pertanian
Universitas Andalas

Penulis lahir di Bukittinggi tahun 1984. Penulis adalah dosen tetap pada Departemen Teknologi Industri Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas. Pendidikan dimulai dari Taman Kanak Kanak hingga SMU di Kabupaten Lima Puluh Kota dan Kota Payakumbuh Sumatera Barat. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Nutrisi dan Makanan Ternak dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknologi Industri Pertanian di Universitas Andalas dari tahun 2002 sampai dengan 2008. Saat ini melanjutkan S3 pada Program Studi Teknologi Industri Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya tahun masuk 2022.

Karir penulis sebagai dosen dimulai tahun 2008, pada Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas. Tahun 2019 bergabung dengan Jurusan teknologi Industri Pertanian, yang saat ini menjadi Departemen Teknologi Industri Pertanian. Penulis juga pernah bergabung dengan *Science Technopark* Universitas Andalas dari tahun 2018 hingga 2022 dan menjabat sebagai Kepala Pusat Produksi dan Inovasi Hasil Riset dari tahun 2020 hingga 2022. Penulis tertarik pada bidang Teknologi Industri Pertanian, dengan bidang kajian Mikrobiologi Industri, Teknologi Bioproses, Pengelolaan Limbah Pertanian serta Biodegradasi. Saat ini

penulis sedang menekuni bidang Biokonversi bahan berlignoselulosa dengan pretreatment kombinasi. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: wenny.murtius@gmail.com

BIODATA PENULIS



Kavadya Syska, S.P., M.Si.

Dosen Bidang Teknologi Pangan (Food Technology)

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas
Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

Penulis lahir di Palembang tanggal 19 Oktober 1979. Saat ini penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap per November 2023. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Teknologi Pangan Universitas Muhammadiyah Palembang dan melanjutkan S2 pada Program Studi Teknologi Pasca Panen Institut Pertanian Bogor. Saat ini penulis sedang menempuh jenjang doctoral pada Program Studi Ilmu Pangan Institut Pertanian Bogor. Mulai berkarier sebagai Dosen pada tahun 2016 pada Program Studi Teknologi Pangan Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto (UNU Purwokerto). Matakuliah yang diampu khususnya pada bidang teknologi pangan yaitu biokimia pangan, rekayasa pangan, pangan fungsional, evaluasi sensori, kimia pangan, analisis pangan, teknologi penyimpanan dan pengemasan, dan teknologi pengolahan pangan. Selain itu, aktif dalam penelitian di bidang teknologi pangan seperti pada kopi specialty, pangan fungsional berbasis purwoceng, beluntas, serta *plant based food* lainnya, serta kajian *green manufacturing* di UMKM pangan bersumber pada pendanaan dari DRTPM, institusi internal, kerjasama industri, sampai *Matching Fund* Kemdikbudristek. Diseminasi teknologi ke masyarakat dilakukan bekerja sama dengan

beberapa kelompok UMKM gula kelapa, kopi, jagung, serta pemerintah daerah dan desa untuk pendampingan dan memperkenalkan metode, teknologi, dan produk baru yang dihasilkan melalui pengembangan inovasi produk pangan. Pengalaman dalam pengembangan institusi sebagai Ketua Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Sains dan Teknologi, UNU Purwokerto 2 Periode (2018-2022 dan 2022-2023), Senat Universitas (2018-2022), Senat Fakultas (2018-2022 dan 2022-2023), serta kegiatan ad hoc lainnya di level fakultas dan universitas, serta lembaga di luar kampus (PATPI, ADN, dan PII). Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: syska.kavadya@gmail.com

BIODATA PENULIS



Prof.Dr.Ir. I Ketut Budaraga,M.Si.CIRR

Dosen Program Studi Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian
Universitas Ekasakti.

Prof. Dr. Ir. I Ketut Budaraga, MSi. CIRR lahir di Desa Bulian Kecamatan Kubutambahan Kabupaten Buleleng Provinsi Bali pada tanggal 22 Juli 1968. Menamatkan SD No.1 Bulian tahun 1982, SMP 1 Singaraja tahun 1984. SMA Lab Uhud Singaraja tahun 1987. Melanjutkan ke Fakultas Pertanian Universitas Mataram tahun 1987 dan tamat 1992. Melanjutkan pendidikan S2 tahun 1995 Ke Pasca sarjana program studi Teknik Pasca Panen IPB tamat 1998. Diberikan kesempatan lanjut ke S3 Ilmu pertanian tamat tahun 2016. Diangkat sebagai Dosen PNSD di Kopertis Wilayah X Padang di tempatkan di Fakultas Pertanian Universitas Ekasakti pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian. Pernah menjabat mulai wakil Wakil dekan III Fakultas Pertanian Universitas Ekasakti, Wakil Dekan 1 Fakultas Pertanian Universitas Ekasakti, Dekan Fakultas Pertanian Universitas Ekasakti, sekarang diberikan kepercayaan sebagai Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Ekasakti. Terhitung mulai tanggal 1 Agustus 2023 diberikan kepercayaan oleh pemerintah menjadi guru besar bidang ilmu Teknologi Pengolahan. Punya semboyan hidup kembali ke alam (*back to nature*), banyak kajian-kajian yang sudah dipublikasi di jurnal Internasional terindeks scopus, jurnal nasional terindeks sinta seperti pemanfaatan hasil samping kelapa menjadi produk yang memiliki nilai tambah, penggunaan pengawet alami asap cair pada pengolahan pangan, serta pengolahan

pangan yang lain seperti pengolahan pisang, pembuatan keju cottage dengan penggumpal alami. Selama ini sudah pernah memperoleh paten sederhana pada tahun 2010 tentang kompor briket tahan panas, Pada tahun 2022 memperoleh paten sederhana berjudul Keju Cottage Dari Susu Sapi Dengan Penambahan Belimbing Wuluh. Informasi lebih lanjut bisa menghubungi email iketutbudaraga@unespadang.ac.id.

BIODATA PENULIS



Dr.Drs.Ketut Gede Dharma Putra,M.Sc

Staf edukatif di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Udayana Bali

Dr.Drs.Ketut Gede Dharma Putra,M.Sc adalah staf edukatif di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Udayana Bali. Dapat dihubungi melalui email : kgdharmap@gmail.com.