

Bisrul Hapis Tambunan, Janter P. Simanjuntak
 Sahala Siallagan, Bonaraja Purba, Dharma Yuda, Arya Fadli
 Syarifuddin, Ilhamuddin, Mhd. Rizky Indonesia Rusty

SAMPAH JADI "CUAN"

Produksi BBM Dari Sampah Plastik



SAMPAH JADI "CUAN" - Produksi BBM Dari Sampah Plastik

Buku "Sampah Jadi Cuan; Produksi BBM dari Sampah Plastik" mengungkap potensi luar biasa dari limbah yang selama ini dianggap tidak bernilai yaitu sampah plastik. Dengan pendekatan ilmiah yang dikemas secara menarik dan mudah dipahami, buku ini menjelaskan bagaimana sampah plastik dapat diubah menjadi bahan bakar minyak (BBM) melalui proses termal seperti pirolisis.

Dimulai dengan pemaparan tentang krisis sampah plastik global dan dampaknya terhadap lingkungan, buku ini mengajak pembaca memahami dasar-dasar kimia plastik, jenis-jenis polimer yang umum ditemukan dalam limbah rumah tangga, dan karakteristiknya sebagai bahan baku energi. Selanjutnya, pembaca akan diajak menjelajahi teknologi konversi plastik menjadi BBM, mulai dari prinsip kerja reaktor pirolisis, parameter proses, hingga desain alat berskala kecil dan besar.

Tak hanya aspek teknis, buku ini juga membahas sisi ekonomi, sosial, dan regulasi yang berkaitan dengan pengolahan limbah plastik menjadi energi. Studi kasus dari dalam dan luar negeri turut disajikan sebagai bukti nyata bahwa teknologi ini bukan sekadar konsep, melainkan solusi yang telah diaplikasikan di berbagai tempat.

Ditulis dengan gaya yang memadukan antara populer dan ilmiah, buku ini cocok untuk mahasiswa, peneliti, pelaku usaha, pembuat kebijakan, hingga masyarakat umum yang tertarik pada isu energi terbarukan dan pengelolaan sampah. Dengan dukungan ilustrasi dan referensi terkini, buku ini menjadi panduan komprehensif sekaligus inspirasi nyata menuju masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

"Yang menjadi masalah besar bukan sampahnya tapi bagaimana kita memperlakukannya". Buku masih jadi jendela dunia, selamat membaca.

Penerbit Mafy (PT MAFY MEDIA LITERASI INDONESIA)
 Tanah Garam, Kota Solok, Sumatera Barat 27312
 Anggota IKAPI 041/SBA/2023

✉ penerbitmafy@gmail.com
 🌐 penerbitmafy.com
 📞 Penerbit Mafy
 📄 Mafy Media Literasi





Sampah Jadi **“CUAN”**

----- PRODUKSI BBM DARI
SAMPAH PLASTIK

THE
Character Building
UNIVERSITY



Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- I. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- II. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- III. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- IV. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah)

Sampah Jadi “CUAN”

----- PRODUKSI BBM DARI
SAMPAH PLASTIK

Bisrul Hapis Tambunan,
Janter P. Simanjuntak
Sahala Siallagan,
Bonaraja Purba
Dharma Yuda
Arya Fadli
Syarifuddin
Ilhamuddin

Mhd. Rizky Indonesia Rusty

THE
Character Building
UNIVERSITY



SAMPAH JADI “CUAN” Produksi BBM Dari Sampah Plastik

Penulis:

**Bisrul Hapis Tambunan,
Janter P. Simanjuntak
Sahala Siallagan,
Bonaraja Purba
Dharma Yuda
Arya Fadli
Syarifuddin
Ilhamuddin
Mhd. Rizky Indonesia Rusty**

Layouter:

Ara Caraka

Desainer:

Tim Mafy

Sumber Gambar Cover:

www.freepik.com

Ukuran:

viii, 130 hlm., 15,5 cm x 23 cm

ISBN: 978-634-220-657-7

Cetakan Pertama:

Juni 2025

Hak Cipta Dilindungi oleh Undang-undang. Dilarang menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PT MAFY MEDIA LITERASI INDONESIA

ANGGOTA IKAPI 041/SBA/2023

Kota Solok, Sumatera Barat, Kode Pos 27312

Kontak: 081374311814

Website: www.penerbitmafya.com

E-mail: penerbitmafya@gmail.com

KATA PENGANTAR

Permasalahan sampah plastik telah menjadi isu global yang tak kunjung usai. Setiap tahunnya, jutaan ton plastik dibuang ke lingkungan, mencemari tanah, sungai, dan lautan, serta membahayakan kehidupan manusia dan makhluk lainnya. Sementara itu, kebutuhan akan bahan bakar minyak (BBM) terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan aktivitas industri. Ironisnya, kedua persoalan ini sebenarnya dapat saling menjawab satu sama lain—sampah plastik dapat diolah menjadi BBM.

Buku ini hadir sebagai jembatan antara masalah dan solusi. Dengan menggabungkan pendekatan teknis dan gaya penulisan populer, buku "Sampah Jadi *Cuan*; Produksi BBM dari Sampah Plastik" bertujuan untuk memberikan pemahaman yang menyeluruh, baik bagi kalangan akademisi, praktisi, pelaku industri, hingga masyarakat umum yang peduli terhadap isu lingkungan dan energi alternatif.

Penulisan buku ini dilandasi oleh berbagai riset ilmiah, studi literatur, studi kasus nyata, serta perkembangan teknologi terkini dalam bidang pirolisis dan rekayasa kimia. Bab demi bab disusun secara sistematis, dimulai dari pengantar umum tentang permasalahan plastik, prinsip dasar konversi termal, teknologi yang digunakan, hingga potensi penerapannya dalam skala industri dan rumah tangga. Gambar ilustrasi turut disertakan untuk mempermudah pemahaman dan menarik minat pembaca.

Kami menyadari bahwa tantangan dalam pengelolaan sampah plastik tidak hanya bersifat teknis, namun juga menyangkut aspek sosial, ekonomi, dan kebijakan. Oleh karena itu, buku ini juga mencoba menyoroiti perspektif multidisipliner untuk menjawab kompleksitas persoalan tersebut.

Akhir kata, kami berharap buku ini dapat menjadi kontribusi nyata dalam upaya menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan masa depan energi yang lebih berkelanjutan.

Medan, Mei 2025

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
BAB SATU KRISIS PLASTIK DAN ENERGI – DUA MASALAH, SATU SOLUSI.....	1
1.1 Sampah Plastik: Ancaman Nyata di Sekitar Kita	1
1.2 Energi Fosil: Sumber Daya yang Kian Menipis	2
1.3 Dua Masalah, Satu Peluang Besar	3
1.4 Dari Masalah Jadi Solusi: Energi dari Sampah	4
1.5 Tujuan dan Isi Buku Ini.....	4
BAB DUA MENGENAL SAMPAH PLASTIK – DARI RUMAH KE REAKTOR.....	6
2.1 Pendahuluan: Plastik dan Permasalahannya.....	6
2.2 Mengenal Jenis-Jenis Plastik.....	7
2.3 Karakteristik Termal dan Kimia Plastik	9
2.4 Pengantar Teknologi Konversi Termal	10
2.5 Prinsip Dasar Proses Pirolisis.....	11
2.6 Jenis-Jenis Reaktor Pirolisis	12
2.7 Output Pirolisis: Apa yang Dihasilkan?	13
2.8 Efisiensi Energi dan Emisi	14
2.9 Studi Laboratorium: Eksperimen Skala Kecil	14
2.10 Uji Skala Pilot dan Pra-Industri	16
2.11 Studi Industri: Aplikasi Komersial Global	16
2.12 Studi Kasus di Indonesia	17
2.13 Tantangan Lapangan di Indonesia	18
2.14 Komposisi Kimia BBM Cair dari Pirolisis Plastik	18
2.15 Metode Analisis Kualitas BBM Cair	19
2.16 Hasil Analisis Kualitas	20
2.17 Pengaruh Kondisi Proses terhadap Kualitas BBM	20
2.18 Pengujian Emisi dan Lingkungan	21

2.19	Standar dan Regulasi.....	21
2.20	Peluang Pengembangan dan Inovasi.....	21
2.21	Pentingnya Pemurnian BBM Cair dari Pirolisis Plastik	21
2.22	Metode Pemurnian Umum.....	22
2.23	Teknologi Pemurnian Tingkat Lanjut	22
2.24	Contoh Implementasi Pemurnian	23
2.25	Tantangan dan Prospek	23
2.26	Penggunaan BBM Cair dari Pirolisis Plastik.....	24
2.27	Aplikasi di Mesin Diesel	24
2.28	Aplikasi di Mesin Bensin	24
2.29	Penggunaan dalam Industri dan Pembangkit Listrik.....	25
2.30	Manfaat Lingkungan dan Sosial	25
2.31	Tantangan dan Hambatan	25
2.32	Prospek dan Pengembangan Masa Depan.....	26
2.33	Asapek Ekonomi.....	26
2.34	Biaya Produksi	26
2.35	Analisis Keuntungan dan Return on Investment (ROI)	27
2.36	Potensi Pasar.....	27
2.37	Tantangan Pasar.....	27
2.38	Strategi Pengembangan Pasar.....	28
2.39	Dampak Lingkungan dari Produksi BBM Cair	28
2.40	Pengendalian Emisi dan Pengelolaan Limbah	28
2.41	Regulasi dan Standar Lingkungan	29
2.42	Studi Kasus Regulasi di Beberapa Negara	29
2.43	Tantangan dan Rekomendasi Regulasi.....	30
2.44	Studi Kasus di Indonesia	30
2.45	Studi Kasus di Dunia.....	31
2.46	Faktor Pendukung Keberhasilan Implementasi	31
2.47	Kendala dalam Implementasi	32
2.48	Peluang Pengembangan.....	32
2.49	Kesimpulan Umum	32
2.50	Ringkasan Temuan Kunci.....	33
2.51	Rekomendasi Teknis.....	33
2.52	Rekomendasi Kebijakan dan Strategis.....	34
2.53	Agenda Penelitian Lanjutan	34

BAB TIGA TEKNOLOGI DAN PROSES PIROLISIS UNTUK	
PRODUKSI BBM.....	35
3.1	Pendahuluan: Mengapa Pirolisis?
3.2	Mekanisme Dasar Proses Pirolisis.....

3.3	Produk Hasil Pirolisis.....	36
3.4	Ilustrasi Skematik Proses Pirolisis	36
3.5	Keunggulan Teknologi Pirolisis.....	37
3.6	Jenis-Jenis Reaktor dalam Proses Pirolisis.....	37
3.7	Ilustrasi Jenis-Jenis Reaktor	38
3.8	Parameter Proses yang Mempengaruhi Produk Pirolisis	39
3.9	Studi Eksperimen Parameter Proses	40
3.10	Tabel Pengaruh Parameter Proses	40
3.16	Pendahuluan.....	41
3.17	Komponen Biaya.....	41
3.18	Studi Kasus Ekonomi: Skala Industri Kecil.....	41
3.19	Break Even Point dan Payback Period.....	42
3.20	Grafik Analisis Sensitivitas Harga Jual BBM	42
3.21	Faktor-Faktor yang Memengaruhi Ekonomi	43
3.22	Studi Empiris dari Indonesia.....	43
3.23	Dampak Lingkungan dan Pengelolaan Emisi	43
3.24	Sumber Emisi dalam Pirolisis	44
3.25	Jenis Polutan dan Potensinya	44
3.26	Ilustrasi Jalur Emisi Pirolisis	45
3.27	Teknologi Pengendalian Emisi.....	45
3.28	Studi Komparatif Emisi.....	46
3.29	Potensi Residual dan Daur Ulang Sisa Pirolisis	46
3.30	Penilaian Life Cycle Assessment (LCA).....	46
3.31	Standar Mutu dan Pengujian BBM Hasil Pirolisis	47
3.32	Parameter Mutu yang Umum Diuji	47
3.33	Hasil Pengujian dari Berbagai Studi	47
3.34	Ilustrasi Spektrum dan Fraksi Distilasi.....	48
3.35	Pengujian Lanjutan (FTIR, GC-MS, TGA)	49
3.36	Kesimpulan Hasil Uji	49
3.37	Relevansi dengan Standar Nasional dan Internasional.....	49
3.38	Penggunaan BBM Pirolisis pada Mesin dan Kendaraan.....	50
3.39	Pengujian pada Mesin Diesel Sederhana.....	50
3.40	Pengaruh terhadap Komponen Mesin.....	51
3.41	Studi Kasus: Penggunaan BBM Pirolisis pada Sepeda Motor ..	51
3.42	Penggunaan dalam Mesin Stasioner (Genset dan Boiler)	52
3.43	Upaya Peningkatan Kualitas BBM	52
3.44	Potensi Komersialisasi.....	53
3.45	Integrasi Pirolisis dalam Sistem Energi dan Ekonomi Sirkular	53
3.46	Konsep Ekonomi Sirkular dalam Limbah Plastik	53

3.47	Pirolisis sebagai Komponen Sistem Energi Terdistribusi.....	54
3.48	Kolaborasi dengan Sektor UMKM dan Industri Lokal.....	54
3.49	Tantangan dalam Integrasi.....	55
3.50	Kebijakan dan Insentif yang Diperlukan.....	55
3.51	Studi Kasus: India dan Belanda	56
3.52	Rekomendasi Pengembangan di Indonesia	56
3.53	Analisis Keekonomian Teknologi Pirolisis.....	56
3.54	Komponen Biaya Investasi	56
3.55	Biaya Operasional dan Pemeliharaan	57
3.56	Break Even Point dan ROI	57
3.57	Variabel Penentu Keekonomian	58
3.58	Perbandingan dengan Teknologi Lain.....	58
3.59	Model Bisnis dan Mitra Potensial.....	59

BAB EMPAT OPTIMASI PROSES PIROLISIS PLASTIK UNTUK PRODUKSI BBM.....

4.1	Pendahuluan.....	60
4.2	Parameter Utama dalam Proses Pirolisis.....	60
4.3	Jenis dan Ukuran Sampah Plastik	61
4.4	Tekanan Operasi	61
4.5	Teknologi dan Katalis untuk Optimasi.....	61
4.6	Studi Kasus Optimasi Proses.....	62
4.7	Kesimpulan Optimasi Proses	62
4.8	Pengaruh Suhu pada Komposisi Produk Pirolisis	62
4.9	Waktu Tinggal dan Pengaruhnya terhadap Kualitas BBM.....	63
4.10	Penggunaan Katalis untuk Meningkatkan Efisiensi	63
4.11	Teknologi Pirolisis Lanjutan: Microwave dan Gasifikasi Terpadu	64
4.12	Studi Kasus: Optimalisasi Pirolisis dengan Katalis di Indonesia	64
4.13	Pengaruh Ukuran Partikel Plastik terhadap Efisiensi Pirolisis	64
4.14	Pengaruh Tekanan Operasi	65
4.15	Penggunaan Gas Inert sebagai Atmosfer Reaksi.....	65
4.16	Sistem Pemurnian dan Penyaringan Produk.....	65
4.17	Tantangan dan Peluang dalam Optimasi Proses.....	65
4.18	Pengaruh Ukuran Partikel Plastik terhadap Efisiensi Pirolisis	66
4.19	Pengaruh Tekanan Operasi	66
4.20	Penggunaan Gas Inert sebagai Atmosfer Reaksi.....	66
4.21	Sistem Pemurnian dan Penyaringan Produk.....	67
4.22	Tantangan dan Peluang dalam Optimasi Proses.....	67

BAB LIMA ANALISIS KUALITAS BBM DARI HASIL PIROLISIS SAMPAH PLASTIK	68
5.1 Pemurnian Minyak Pirolisis	68
5.2 Standar dan Regulasi Kualitas BBM.....	69
5.3 Studi Kasus: Minyak Pirolisis dari Sampah Plastik di Indonesia	69
5.4 Analisis Ekonomi Penggunaan Minyak Pirolisis	70
5.5 Dampak Lingkungan dari Penggunaan BBM Pirolisis.....	70
5.6 Perbandingan Minyak Pirolisis dengan BBM Konvensional....	71
5.7 Pengujian Performa Mesin Menggunakan Minyak Pirolisis	71
5.8 Tantangan dan Solusi dalam Penggunaan BBM Pirolisis	72
5.9 Prospek Komersialisasi dan Skala Industri	72
5.10 Ilustrasi: Diagram Skema Produksi dan Distribusi BBM Pirolisis	72
5.11 Kesimpulan.....	73
5.12 Arahan untuk Bab Selanjutnya	74
BAB ENAM TEKNOLOGI PEMURNIAN MINYAK PIROLISIS DAN MODIFIKASI PROSES PIROLISIS	75
6.1 Teknologi Katalitik dalam Pirolisis Sampah Plastik	75
6.2 Parameter Operasi Pirolisis dan Pengaruhnya	76
6.3 Pirolisis dengan Microwave dan Plasma.....	76
6.4 Teknologi Pemurnian Lanjutan	77
6.5 Aditif Bahan Bakar untuk Minyak Pirolisis	77
6.6 Studi Kasus: Implementasi Pemurnian Minyak Pirolisis di Indonesia	77
6.7 Inovasi Teknologi dan Tren Masa Depan.....	78
6.8 Ringkasan Bab 6	78
BAB TUJUH ANALISIS EKONOMI DAN POTENSI PASAR BBM DARI SAMPAH PLASTIK	79
7.1 Pendahuluan.....	79
7.2 Analisis Biaya Produksi BBM dari Sampah Plastik	79
7.3 Potensi Pasar BBM dari Sampah Plastik.....	80
7.4 Studi Kasus: Potensi Pasar di Indonesia	81
7.5 Strategi Pemasaran dan Pengembangan Pasar	81
7.6 Analisis Risiko dan Hambatan Pasar	82
7.7 Peluang Pengembangan Bisnis dan Kerjasama	82
7.8 Analisis Biaya dan Manfaat (Cost-Benefit Analysis)	83
7.9 Studi Kelayakan Ekonomi	84
7.10 Prospek Masa Depan dan Rekomendasi	85

BAB DELAPAN ASPEK LINGKUNGAN DAN REGULASI DALAM PRODUKSI BBM DARI SAMPAH PLASTIK	87
8.1 Pendahuluan.....	87
8.2 Dampak Lingkungan dari Proses Pirolisis	88
8.3 Manfaat Lingkungan dari Pemanfaatan Sampah Plastik sebagai BBM	88
8.4 Regulasi dan Standar Lingkungan	89
8.5 Pengelolaan Limbah dan Emisi dari Produksi BBM.....	90
8.6 Dampak Lingkungan dan Teknologi Mitigasi.....	91
8.7 Rangkuman, Tantangan, dan Peluang.....	93
BAB SEMBILAN TEKNOLOGI PEMURNIAN DAN STANDARISASI BBM DARI SAMPAH PLASTIK	95
9.1 Pendahuluan.....	95
9.2 Kontaminan dalam BBM dari Sampah Plastik	96
9.3 Metode Pemurnian BBM dari Sampah Plastik	96
9.4 Standar Kualitas dan Pengujian BBM dari Sampah Plastik	98
9.5 Tantangan dalam Pemurnian dan Standarisasi	99
9.6 Arah Pengembangan dan Prospek	101
9.7 Penutup Bab 9	102
BAB SEPULUH STUDI KASUS DAN IMPLEMENTASI NYATA	103
10.1 Pendahuluan.....	103
10.2 Studi Kasus Internasional: Plastic Energy (Spanyol-Inggris) .	103
10.3 Studi Kasus Asia: B Lest Co. Ltd (Jepang).....	104
10.4 Studi Kasus Nasional: Inovasi Lokal di Indonesia	105
10.5 Pemanfaatan BBM Plastik di Sektor Maritim dan Perikanan .	107
10.6 Analisis Keberhasilan dan Kegagalan.....	108
10.7 Ringkasan dan Rekomendasi	110
BAB SEBELAS PENUTUP DAN REFLEKSI.....	112
11.1 Merangkum Perjalanan Energi dari Sampah.....	112
11.2 Potensi Masa Depan	113
11.3 Refleksi Penulis	114
11.4 Penutup	114
DAFTAR PUSTAKA	115
PROFIL PENULIS.....	130



BAB SATU

KRISIS PLASTIK DAN ENERGI – DUA MASALAH, SATU SOLUSI

1.1 Sampah Plastik: Ancaman Nyata di Sekitar Kita

Plastik diciptakan untuk mempermudah hidup manusia. Ringan, kuat, murah, dan tahan lama — keunggulan inilah yang membuat plastik digunakan hampir di semua aspek kehidupan: dari bungkus makanan, botol minuman, tas belanja, hingga komponen mobil dan alat elektronik.

Namun, keunggulan yang sama juga menjadi masalah besar. Plastik **tidak mudah terurai**. Botol air mineral yang kita buang hari ini mungkin masih utuh 300 tahun dari sekarang. Setiap tahun, Indonesia menghasilkan sekitar **7,8 juta ton sampah plastik**, dan sekitar **4,9 juta ton** di antaranya tidak dikelola dengan baik, seperti tidak dikumpulkan, dibuang di tempat pembuangan terbuka, atau bocor dari tempat pembuangan sampah yang tidak dikelola dengan baik (World

Bank, 2021). Kondisi ini menyebabkan sekitar **346.500 ton** sampah plastik masuk ke laut setiap tahunnya, dua pertiganya berasal dari Jawa dan Sumatra.

Di Bali, misalnya, pantai-pantai seperti Kuta, Seminyak, Legian, dan Jimbaran menjadi sangat tercemar oleh plastik dan sampah selama musim hujan, akibat pasang tinggi dan angin kencang. Tempat pembuangan sampah terbuka memperburuk masalah dengan mencemari saluran air (News.com.au, 2024).

Produksi sampah plastik global telah mencapai titik krisis. Data dari Plastics Europe (2021) menunjukkan bahwa pada tahun 2020, produksi plastik dunia mencapai 367 juta ton, dengan Asia sebagai kontributor terbesar. Sampah plastik menyumbang sekitar 12% dari total limbah padat di dunia, dan hanya kurang dari 10% yang berhasil didaur ulang secara efektif.

Permasalahan utama terletak pada sistem pengelolaan sampah yang tidak memadai dan ketergantungan pada plastik sekali pakai. Studi oleh Lau et al. (2020) mengidentifikasi bahwa jika tidak ada intervensi signifikan, jumlah plastik yang bocor ke laut bisa mencapai 29 juta ton per tahun pada 2040. Selain itu, mikroplastik dari degradasi plastik juga menjadi ancaman bagi kesehatan manusia dan ekosistem.

Pendekatan solusi yang direkomendasikan meliputi reformasi kebijakan, perbaikan infrastruktur pengelolaan limbah, inovasi material ramah lingkungan, dan adopsi model ekonomi sirkular.

1.2 Energi Fosil: Sumber Daya yang Kian Menipis

Di sisi lain, Indonesia masih sangat bergantung pada **bahan bakar fosil** seperti bensin, solar, dan gas alam. Menurut data Dewan Energi Nasional tahun 2019, bauran energi primer nasional terdiri dari batu bara sebanyak 37,15%, minyak bumi 33,58%, gas bumi 20,13%, dan Energi Baru Terbarukan (EBT) hanya 9,15%

(ANTARA News, 2021).

Wakil Presiden Ma'ruf Amin menyatakan bahwa ketergantungan Indonesia terhadap impor energi fosil harus segera dihentikan dan diganti dengan energi terbarukan yang tersedia secara lokal (ANTARA News, 2021). Ketergantungan ini membuat Indonesia rentan terhadap fluktuasi harga di pasar internasional, yang dapat mempengaruhi stabilitas ekonomi (IBEKA, 2023).

Krisis energi fosil merupakan tantangan global yang semakin mendesak, terutama akibat ketergantungan jangka panjang terhadap bahan bakar fosil yang tidak terbarukan dan berdampak besar terhadap lingkungan. Studi oleh Gitelman dan Kozhevnikov (2023) menyoroti bahwa meningkatnya kesadaran publik terhadap biaya lingkungan dan sosial dari bahan bakar fosil mendorong urgensi transisi energi. Krisis energi yang diperparah oleh ketidakstabilan geopolitik, seperti perang Rusia-Ukraina, memperlihatkan perlunya percepatan peralihan menuju energi terbarukan, sebagaimana dijelaskan oleh Hosseini (2022).

Selain itu, Borowski (2022) menekankan bahwa ketergantungan pada impor bahan bakar fosil memperburuk kerentanan energi, sementara transisi ke ekonomi rendah karbon tidak hanya mengurangi emisi, tetapi juga meningkatkan ketahanan energi nasional. Dalam konteks ini, Kalair et al. (2021) memperingatkan bahwa hanya sepertiga cadangan fosil saat ini yang dapat dibakar jika dunia ingin memenuhi target iklim 2050.

Oleh karena itu, transformasi struktural melalui inovasi energi bersih, penyimpanan energi, dan reformasi kebijakan menjadi sangat penting untuk menghindari kerusakan jangka panjang pada ekosistem dan stabilitas ekonomi global.

1.3 Dua Masalah, Satu Peluang Besar

Menariknya, **sampah plastik adalah turunan dari minyak bumi**. Secara kimiawi, plastik masih menyimpan energi seperti

halnya minyak. Dengan teknologi yang tepat, kita bisa mengubah plastik kembali menjadi bahan bakar.

Salah satu teknologi yang digunakan adalah **pirolisis**, yaitu proses pemanasan plastik tanpa oksigen dalam reaktor khusus, yang dapat mengubah plastik menjadi gas, cairan mirip BBM (seperti bensin dan solar), serta residu padat (Sari et al., 2023).

Teknologi pirolisis telah terbukti efektif dalam mengolah sampah plastik menjadi bahan bakar yang dapat digunakan untuk kebutuhan lokal, seperti menyalakan genset, menghidupkan kompor, bahkan untuk kendaraan dengan perlakuan tertentu (Sari et al., 2023).

1.4 Dari Masalah Jadi Solusi: Energi dari Sampah

Konsep ini menawarkan solusi dua arah:

- **Mengurangi tumpukan sampah plastik** yang mencemari lingkungan
- **Menghasilkan energi alternatif** yang bisa menggantikan sebagian kebutuhan BBM fosil

Bayangkan jika tiap desa atau kota kecil punya alat pirolisis skala mini. Plastik yang sebelumnya dibuang bisa dikumpulkan, diproses, dan menghasilkan BBM untuk kebutuhan lokal.

1.5 Tujuan dan Isi Buku Ini

Buku ini ditulis untuk:

- **Memperkenalkan teknologi produksi BBM dari sampah plastik** dengan cara yang mudah dimengerti namun tetap akurat secara teknis.
- **Mendorong pembaca memahami potensi luar biasa dari sampah plastik** sebagai sumber energi alternatif.
- **Memberikan panduan praktis** bagi siapa saja yang ingin mencoba, dari skala rumah tangga, komunitas, hingga wirausaha sosial.

Setiap bab dirancang agar Anda, sebagai pembaca, bisa:

- Memahami **dasar ilmiahnya**
- Melihat **contoh nyata penggunaannya**
- Memahami **peluang bisnis dan tantangan teknisnya**
- Mengetahui **dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat**

Kita akan mulai dengan mengenal lebih jauh **jenis-jenis plastik, bagaimana plastik bisa jadi BBM, dan bagaimana teknologi sederhana bisa membawa perubahan besar.**





BAB DUA

MENGENAL SAMPAH PLASTIK – DARI RUMAH KE REAKTOR

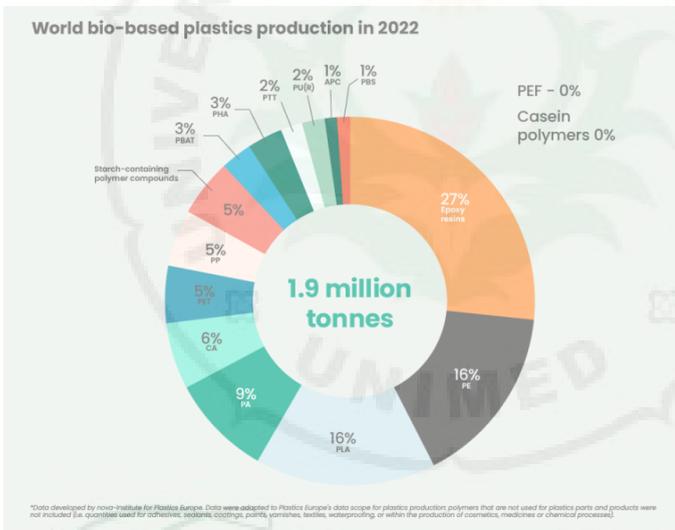
2.1 Pendahuluan: Plastik dan Permasalahannya

Selama beberapa dekade terakhir, plastik telah mengalami pertumbuhan produksi yang luar biasa. Menurut Plastics Europe (2023), produksi plastik global mencapai lebih dari 390 juta ton per tahun. Angka ini mencerminkan betapa pentingnya plastik dalam kehidupan modern – dari kemasan makanan, peralatan medis, komponen elektronik, hingga konstruksi bangunan.

Namun, keunggulan utama plastik – yaitu ketahanannya terhadap degradasi – justru menjadi masalah besar bagi lingkungan. Plastik membutuhkan waktu puluhan hingga ratusan tahun untuk terurai secara alami. Ketika dibuang sembarangan, plastik mencemari tanah, sungai, dan laut. Organisasi Internasional untuk Konservasi Alam (IUCN, 2021) melaporkan bahwa sekitar 14 juta ton plastik masuk ke

laut setiap tahunnya, mengancam ekosistem laut dan rantai makanan manusia.

Di Indonesia, data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2022) menunjukkan bahwa sekitar **17% dari total sampah nasional adalah sampah plastik**, dengan sebagian besar berasal dari sektor rumah tangga dan industri makanan-minuman. Meskipun terdapat upaya daur ulang, sebagian besar sampah plastik masih berakhir di TPA atau terbakar secara terbuka, yang menimbulkan masalah kesehatan dan polusi udara.



Gambar 2. 1. Infografis jumlah produksi plastik dunia dan distribusi sampah plastik (sumber: Plastics Europe, 2023)

2.2 Mengetahui Jenis-Jenis Plastik

Untuk memahami bagaimana plastik dapat diolah menjadi bahan bakar, penting untuk mengetahui jenis-jenis plastik terlebih dahulu. Plastik secara umum diklasifikasikan berdasarkan kode resin (Resin Identification Code/RIC) yang terdiri dari tujuh kelompok utama:

- **Polyethylene Terephthalate (PET) – Kode 1**

Umumnya digunakan dalam botol air minum dan wadah makanan bening. PET bersifat ringan, kuat, dan tahan terhadap gas dan kelembapan. Namun, dalam proses pirolisis, PET menghasilkan senyawa benzoat dan tereftalat yang dapat mempersulit konversi menjadi bahan bakar berkualitas (Ghosh et al., 2021).

- **High-Density Polyethylene (HDPE) – Kode 2**

Digunakan untuk botol susu, wadah kimia, dan pipa. HDPE sangat cocok untuk pirolisis karena strukturnya yang jenuh dan menghasilkan fraksi cair yang tinggi (Al-Salem et al., 2017).

- **Polyvinyl Chloride (PVC) – Kode 3**

Digunakan dalam pipa dan kabel listrik. PVC tidak direkomendasikan untuk pirolisis karena mengandung klorin yang menghasilkan HCl dan senyawa dioksin beracun saat dibakar (Kaminsky & Zorriquetta, 2007).

- **Low-Density Polyethylene (LDPE) – Kode 4**

Sering ditemukan pada kantong plastik dan bungkus makanan. LDPE dapat menghasilkan bahan bakar cair, tetapi membutuhkan suhu tinggi untuk efisiensi maksimal (Miskolczi et al., 2004).

- **Polypropylene (PP) – Kode 5**

Biasa digunakan dalam wadah makanan, sedotan, dan tekstil. PP sangat potensial untuk diubah menjadi bahan bakar cair karena struktur kimianya yang mudah terurai secara termal (Miandad et al., 2016).

- **Polystyrene (PS) – Kode 6**

Umumnya digunakan dalam kemasan makanan dan styrofoam. PS menghasilkan senyawa aromatik seperti stirena saat dipirolisis, yang memiliki nilai kalor tinggi namun memerlukan kontrol emisi ketat (Butler et al., 2011).

- **Other – Kode 7**

Meliputi campuran plastik dan plastik teknik seperti polycarbonate (PC). Umumnya sulit diproses dan membutuhkan pemisahan khusus.

1 PETE	2 HDPE	3 PVC	4 LDPE	5 PP	6 PS	7 OTHER
Polyethylene Terephthalate	High-Density Polyethylene	Polyvinyl Chloride	Low-Density Polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Other
Common products: soda & water bottles; cups, jars, trays, clamshells	Common products: milk jugs, detergent & shampoo bottles, flower pots, grocery bags	Common products: cleaning supply jugs, pool liners, twine, sheeting, automotive product bottles, sheeting	Common products: bread bags, paper towels & tissue overwrap, squeeze bottles, trash bags, six-pack rings	Common products: yogurt tubs, cups, juice bottles, straws, hangers, sand & shipping bags	Common products: to-go containers & flatware, hot cups, razors, CD cases, shipping cushion, cartons, trays	Common types & products: polycarbonate, nylon, ABS, acrylic, PLA; bottles, safety glasses, CDs, headlight lenses
Recycled products: clothing, carpet, clamshells, soda & water bottles	Recycled products: detergent bottles, flower pots, crates, pipe, decking	Recycled products: pipe, wall siding, binders, carpet backing, flooring	Recycled products: trash bags, plastic lumber, furniture, shipping envelopes, compost bins	Recycled products: paint cans, speed bumps, auto parts, food containers, hangers, plant pots, razor handles	Recycled products: picture frames, crown molding, rulers, flower pots, hangers, toys, tape dispensers	Recycled products: electronic housings, auto parts,

Gambar 2. 2. Diagram RIC (Resin Identification Code) dan contoh produk plastik (Romuto, 2025)

2.3 Karakteristik Termal dan Kimia Plastik

Karakteristik plastik sangat mempengaruhi hasil proses pirolisis. Berikut ini adalah beberapa parameter penting:

- **Suhu dekomposisi:** HDPE dan PP mulai terurai pada suhu sekitar 350–500°C, sedangkan PET dan PVC memerlukan suhu lebih tinggi dan menghasilkan produk samping yang tidak diinginkan.
- **Kandungan karbon-hidrogen:** Plastik dengan kandungan H/C tinggi seperti PP dan PE ideal untuk konversi menjadi bahan bakar karena struktur hidrokarbonnya menyerupai fraksi minyak bumi.
- **Kandungan aditif dan pengotor:** Plastik yang mengandung logam berat, pigmen, atau stabilisator dapat menurunkan kualitas produk pirolisis dan merusak katalis.

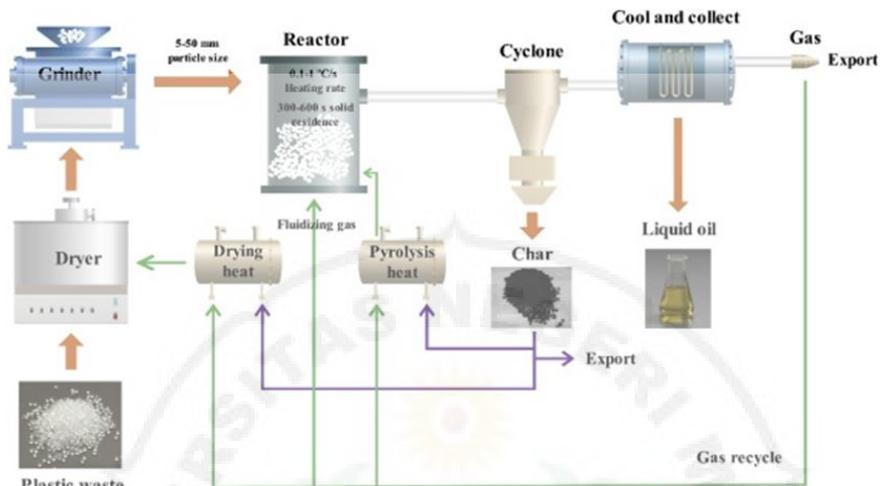
Tabel 2. 1. Suhu pirolisis optimal dan hasil fraksi cair dari berbagai jenis plastik (Sumber: Al-Salem et al., 2017; Miandad et al., 2016)

Jenis Plastik	Suhu Optimum (°C)	Hasil Cair (%)	Catatan
HDPE	450	75–85	Sangat cocok untuk pirolisis
PP	430–470	70–90	Stabil, hasil tinggi
PS	400–500	60–75	Banyak senyawa aromatik
PET	500+	30–50	Mengandung oksigen tinggi
PVC	300–500	<30	Beracun, tidak direkomendasikan

2.4 Pengantar Teknologi Konversi Termal

Konversi sampah plastik menjadi bahan bakar memerlukan proses termal yang efisien dan terkendali. Salah satu teknologi paling menjanjikan untuk tujuan ini adalah **pirolisis**, yaitu proses penguraian bahan organik pada suhu tinggi dalam **kondisi tanpa oksigen**. Berbeda dengan pembakaran, pirolisis tidak menghasilkan CO₂ secara langsung, dan produk utamanya berupa **bahan bakar cair (pirolisat), gas sintetis (syngas), dan residu padat (char)**.

Teknologi ini dianggap lebih ramah lingkungan dibanding pembakaran langsung, dan memiliki nilai ekonomi karena dapat menghasilkan produk yang dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia.



Gambar 2. 3. Diagram alir proses pirolisis – dari sampah plastik ke BBM cair, gas dan residu padat (Maqsood *et al.*, 2021)

2.5 Prinsip Dasar Proses Pirolisis

Secara umum, pirolisis terjadi dalam beberapa tahapan termal:

- **Devolatilisasi (200–400 °C):** Molekul plastik mulai meleleh dan menguap, membebaskan senyawa volatil seperti hidrokarbon ringan.
- **Fragmentasi Termal (400–600 °C):** Rantai polimer panjang dipecah menjadi molekul yang lebih kecil seperti alkena, alkana, dan senyawa aromatik.
- **Stabilisasi Produk (600 °C ke atas):** Terjadi reaksi sekunder seperti re-polimerisasi atau kondensasi, yang bisa dikontrol melalui pemilihan suhu dan katalis.

Efisiensi proses dipengaruhi oleh:

- Jenis plastik (seperti dijelaskan sebelumnya)
- Suhu reaktor
- Laju pemanasan
- Jenis katalis (jika digunakan)
- Desain dan jenis reaktor

Tabel 2. 2. Rentang suhu optimal dan waktu reaksi untuk pirolisis plastik umum

Jenis Plastik	Suhu Optimal (°C)	Waktu Residen (menit)	Produk Utama
HDPE	450	30–60	BBM cair, wax
PP	470	20–50	BBM cair
PS	500	15–30	Stirena, aromatik
LDPE	450	30–70	BBM cair

(Sumber: Miandad et al., 2016; Al-Salem et al., 2017)

2.6 Jenis-Jenis Reaktor Pirolisis

Reaktor pirolisis merupakan inti dari proses konversi plastik menjadi bahan bakar. Beberapa jenis reaktor yang umum digunakan antara lain:

- Reaktor Batch (Tertutup)

Merupakan sistem tertutup tempat plastik dimasukkan sekaligus dan diproses dalam satu siklus penuh sebelum dikeluarkan. Biasanya digunakan untuk skala laboratorium dan pilot plant.

 - **Kelebihan:** Sederhana, biaya rendah
 - **Kekurangan:** Tidak kontinu, efisiensi terbatas
 - **Contoh Aplikasi:** Riset akademik dan uji coba teknologi
- Reaktor Semi-Kontinu

Plastik dimasukkan secara periodik dan produk diambil selama proses berjalan. Cocok untuk skala menengah.

 - **Kelebihan:** Produktivitas **lebih** tinggi daripada batch
 - **Kekurangan:** Masih **memerlukan** jeda waktu
- Reaktor Kontinu (Reaktor Ulir dan Fluidized Bed)

Jenis paling efisien. Plastik dimasukkan secara terus-menerus dan dipanaskan dalam sistem tertutup, produk langsung dikumpulkan dan didinginkan.

- **Kelebihan:** Skalabilitas **industri**, efisiensi tinggi
- **Kekurangan:** Biaya **investasi** awal tinggi, kendali suhu harus presisi
- Reaktor dengan Katalis

Menggunakan katalis (misalnya zeolit, silika-alumina) untuk menurunkan suhu reaksi dan meningkatkan selektivitas terhadap BBM cair.

 - **Contoh Katalis:**
 - **HZSM-5:** Menghasilkan bensin aromatik berkualitas
 - **Silika-alumina:** Mempercepat retakan polimer

2.7 Output Pirolisis: Apa yang Dihasilkan?

Produk dari pirolisis plastik bervariasi tergantung jenis plastik dan parameter proses:

- **Fraksi Cair (Liquid Fuel):**

Digunakan sebagai diesel, minyak tanah, atau bahan bakar industri. Komposisinya menyerupai fraksi distilat minyak bumi.
- **Gas (Syngas):**

Mengandung metana, etana, butana, dan CO. Dapat dibakar langsung untuk menghasilkan panas proses.
- **Residu (Char):**

Sisa karbon padat yang dapat digunakan sebagai bahan bakar padat, adsorben, atau pupuk karbon aktif.

Tabel 2. 3. Komposisi output pirolisis plastik PP (Miandad et al., 2016)

Fraksi	Komposisi (%)
Bahan Bakar Cair	70–85%
Gas	10–20%
Residu Padat	5–10%

2.8 Efisiensi Energi dan Emisi

Secara umum, proses pirolisis dapat menghasilkan bahan bakar cair dengan nilai kalor sekitar 42–45 MJ/kg, yang sebanding dengan solar konvensional (Butler et al., 2011). Namun, tantangan yang harus diatasi antara lain:

- **Emisi VOC (Volatile Organic Compounds)** jika kondensasi tidak sempurna
- **Emisi HCl dan senyawa dioksin** dari plastik PVC
- **Penggunaan energi eksternal** untuk memulai proses

Untuk meningkatkan efisiensi, **energi dari gas pirolisis dapat digunakan kembali** untuk memanaskan reaktor. Sistem ini disebut **autothermal**, dan dapat mengurangi biaya operasional secara signifikan.

2.9 Studi Laboratorium: Eksperimen Skala Kecil

Penelitian tentang pirolisis plastik telah dilakukan di berbagai universitas dan lembaga penelitian, baik di Indonesia maupun dunia. Studi ini umumnya dilakukan dengan menggunakan reaktor batch kecil, menggunakan sumber plastik seperti HDPE, PP, atau campuran plastik rumah tangga.

Contoh Studi:

- **Universitas Negeri Medan**

Tim peneliti Universitas Negeri Medan mempirolisis 6000 gram serpihan plastik dipirolisis dalam reaktor berbahan bakar LPG pada suhu 350 °C. Dihasilkan fraksi ekuivalen bensin sebanyak 1520 gram atau 79,17%, fraksi solar sebanyak 320 gram atau 16,67%, dan sisanya minyak residu sebanyak 80 gram atau 4,17%. Hasil pemeriksaan sifat fisiko-kimia menunjukkan bahwa fraksi solar dan bensin tersebut mirip dengan solar dan bensin konvensional (Tambunan *et al.*, 2024).



Gambar 2. 4. Reaktor pirolisis dan destilasi Universitas Negeri Medan

- **Universitas Gadjah Mada (UGM)**

Tim peneliti dari Teknik Kimia UGM melakukan pirolisis pada **sampah plastik LDPE dari kantong belanja** menggunakan reaktor tabung baja tahan panas pada suhu 450 °C. Hasilnya adalah fraksi cair sebanyak 70% dengan nilai kalor 42 MJ/kg, setara dengan solar industri (Indrawan et al., 2021).

- **Institut Teknologi Bandung (ITB)**

Penelitian oleh Sari et al. (2020) mengkaji pirolisis **sampah plastik multilayer** dari kemasan sachet. Menggunakan katalis zeolit lokal yang dimodifikasi, diperoleh bahan bakar cair aromatik dengan kestabilan tinggi. Proses ini memerlukan suhu reaksi 500 °C dan menghasilkan fraksi cair hingga 65%.

- **University of Leeds, UK**

Tim peneliti Inggris mengembangkan pirolisis berbasis **katalis HZSM-5** untuk menghasilkan bensin sintesis dari polipropilena (PP). Hasilnya menunjukkan peningkatan fraksi bensin sebesar 30% dibanding pirolisis non-katalitik (Lopez et al., 2017).

2.10 Uji Skala Pilot dan Pra-Industri

Setelah keberhasilan skala laboratorium, beberapa institusi mengembangkan **unit pirolisis skala pilot** (50–200 kg per siklus) untuk menguji efisiensi, kestabilan, dan kualitas produk. Salah satu contoh sukses adalah proyek dari **Balai Besar Teknologi Konversi Energi (BPPT)** yang merancang reaktor semi-kontinu berkapasitas 100 kg/hari di kawasan Serpong.

Temuan Utama:

- Menggunakan plastik campuran HDPE dan PP
- Menghasilkan 60–75 liter bahan bakar cair/hari
- Nilai kalor 43 MJ/kg
- Gas hasil pirolisis dimanfaatkan ulang untuk pemanasan reaktor

Tabel 2. 4. Data hasil uji pilot unit pirolisis plastik BPPT

Parameter	Nilai
Kapasitas	100 kg/hari
Suhu operasi	450–500 °C
Fraksi cair	65–75%
Konsumsi energi	10–15 kWh
Nilai kalor BBM cair	43 MJ/kg
Emisi HCl (dengan pretreatment)	<0.1 ppm

(Sumber: BPPT, 2020)

2.11 Studi Industri: Aplikasi Komersial Global

Negara-negara maju seperti Jepang, Jerman, dan India telah mengembangkan fasilitas pirolisis skala industri dengan kapasitas >5 ton/hari. Beberapa perusahaan ternama dalam teknologi ini antara lain:

- **Blest Co., Ltd. (Jepang)**

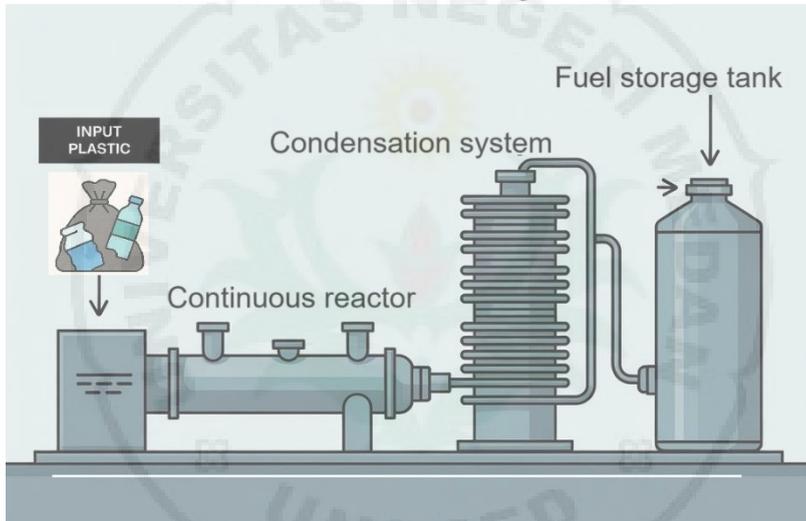
Mengembangkan reaktor pirolisis portabel yang dapat mengubah 1 kg plastik menjadi 0.8 liter bahan bakar cair. Teknologi ini cocok untuk daerah terpencil dan tanggap bencana.

- **Plastic Energy (UK)**

Mengoperasikan pabrik komersial di Spanyol yang mampu mengolah 5.000 ton sampah plastik campuran/tahun, menghasilkan "TACOIL" yang dijual ke industri petrokimia.

- **Pyrocrat Systems LLP (India)**

Fokus pada pengembangan pirolisis plastik berbasis modular untuk kebutuhan industri kecil-menengah.



Gambar 2. 5. Diagram pabrik pirolisis industri

2.12 Studi Kasus di Indonesia

Beberapa inisiatif lokal telah mencoba menerapkan teknologi pirolisis plastik, baik oleh pemerintah daerah, perguruan tinggi, maupun sektor swasta.

- Bank Sampah Malang – Program Konversi Sampah Plastik
Proyek ini memanfaatkan pirolisis sederhana untuk mengolah 30 kg plastik per hari menjadi solar alternatif. Solar ini digunakan oleh kendaraan pengangkut sampah internal.
- Kampung Energi Mandiri di Sleman, Yogyakarta

Masyarakat secara swadaya membangun reaktor pirolisis berbahan bakar gas LPG untuk mengolah plastik menjadi BBM cair. Inisiatif ini didampingi oleh LSM dan UGM.

- PT Reciki Solusi Indonesia
Bekerja sama dengan kota Surabaya, perusahaan ini menjalankan pengolahan sampah berbasis RDF dan pirolisis untuk energi panas dan BBM cair.

Tabel 2. 5. Perbandingan hasil studi kasus di Indonesia

Lokasi	Kapasitas	Fraksi Cair (%)	Digunakan untuk
Sleman (DIY)	30 kg/hari	60–70	Genset rumah tangga
Surabaya (Reciki)	200 kg/hari	65–80	Industri pengolahan
Malang (Bank Sampah)	30–40 kg/hari	60	Kendaraan operasional

2.13 Tantangan Lapangan di Indonesia

Meskipun hasilnya menjanjikan, implementasi teknologi pirolisis di lapangan menghadapi beberapa kendala:

- **Kualitas sampah plastik:** Banyak tercampur bahan organik dan plastik PVC yang mengganggu reaksi pirolisis.
- **Kurangnya SDM terlatih:** Pengoperasian reaktor memerlukan pemahaman teknis yang cukup.
- **Biaya investasi awal:** Walaupun skala kecil terjangkau, sistem pemrosesan dan kondensasi masih tergolong mahal.
- **Ketiadaan regulasi bahan bakar daur ulang:** Belum ada standar nasional untuk BBM dari sampah plastik.

2.14 Komposisi Kimia BBM Cair dari Pirolisis Plastik

Bahan bakar cair yang dihasilkan dari proses pirolisis sampah plastik merupakan campuran kompleks hidrokarbon yang

mencakup berbagai rantai karbon dan gugus fungsional. Komposisi ini sangat bergantung pada jenis plastik asal, suhu proses, dan penggunaan katalis.

Komponen utama:

- **Parafin (alkana):** rantai karbon jenuh, memberikan stabilitas dan nilai kalor tinggi.
- **Olefin (alkena):** rantai karbon tidak jenuh, reaktif dan berpotensi menghasilkan emisi.
- **Aromatik:** senyawa cincin benzena, meningkatkan oktan dan stabilitas bahan bakar.
- **Naphthena (sikloalkana):** hidrokarbon siklik jenuh.
- **Heteroatom (N, S, Cl):** kadang hadir sebagai kontaminan dari plastik PVC, perlu diminimalkan untuk mengurangi korosi dan emisi.

Studi oleh Lopez et al. (2017) menunjukkan bahwa produk pirolisis polipropilena (PP) mengandung 40-60% alifatik, 20-30% aromatik, dan sisanya naphthena dan olefin.

2.15 Metode Analisis Kualitas BBM Cair

Berbagai teknik analisis digunakan untuk menentukan kualitas bahan bakar cair hasil pirolisis:

- **Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)**
Mengidentifikasi dan mengukur jenis senyawa hidrokarbon.
- **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)**
Menganalisis gugus fungsional seperti -OH, -CO, -CH.
- **Viscosity Test**
Menentukan kekentalan bahan bakar, penting untuk sistem injeksi.
- **Density Measurement**
Menentukan berat jenis, berpengaruh pada pembakaran.

- **Calorific Value (Nilai Kalor)**

Diukur menggunakan bomb calorimeter, menunjukkan energi yang dilepaskan saat pembakaran.

- **Cetane Number dan Octane Number**

Indikator kualitas bahan bakar diesel dan bensin.

2.16 Hasil Analisis Kualitas

Beberapa **hasil** penting dari berbagai penelitian:

Parameter	Nilai BBM Pirolisis Plastik	Nilai BBM Konvensional (Solar/Bensin)
Nilai Kalor (MJ/kg)	40 - 45	42 - 46
Density (kg/m ³)	800 - 900	820 - 860
Viscosity (cSt)	1.5 - 4	2 - 4
Sulfur (%)	< 0.1	0.05 - 0.1
Cetane Number	45 - 55	40 - 55
Octane Number	70 - 85	87 - 92

(Studi oleh Indrawan et al., 2021; Sari et al., 2020)

2.17 Pengaruh Kondisi Proses terhadap Kualitas BBM

- **Suhu pirolisis:** Suhu yang lebih tinggi (450-500 °C) cenderung menghasilkan fraksi yang lebih ringan (bensin dan gas), sedangkan suhu rendah menghasilkan fraksi berat (solar dan residu).
- **Penggunaan katalis:** Zeolit dan alumina meningkatkan pembentukan hidrokarbon aromatik dan mengurangi olefin tidak stabil.
- **Jenis plastik:** Polipropilena menghasilkan produk dengan nilai oktan lebih tinggi dibandingkan polietilena.

2.18 Pengujian Emisi dan Lingkungan

BBM cair hasil pirolisis diuji untuk emisi gas buang, termasuk CO, HC, NO_x, SO_x, dan partikel. Umumnya, bahan bakar ini menunjukkan emisi yang relatif lebih rendah dibandingkan solar konvensional, terutama jika dilakukan pra-pemurnian.

2.19 Standar dan Regulasi

Hingga saat ini, belum ada standar nasional baku untuk BBM hasil daur ulang plastik di Indonesia. Namun, beberapa referensi standar internasional yang dapat digunakan sebagai acuan adalah:

- ASTM D6751 untuk biodiesel.
- EN 590 untuk solar.
- ISO 8217 untuk bahan bakar minyak.

2.20 Peluang Pengembangan dan Inovasi

- Pengembangan metode pemurnian untuk menurunkan kontaminan (Cl, S).
- Penyesuaian blend BBM daur ulang dengan BBM fosil untuk memenuhi standar.
- Pemanfaatan teknologi hidrogenasi dan cracking untuk meningkatkan kualitas.

2.21 Pentingnya Pemurnian BBM Cair dari Pirolisis Plastik

Bahan bakar cair hasil pirolisis plastik mengandung berbagai senyawa pengotor, seperti senyawa halogen (terutama klorin dari PVC), sulfur, nitrogen, serta residu aromatik berat. Pemurnian bertujuan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar agar memenuhi standar emisi dan performa mesin, serta memperpanjang umur mesin.

2.22 Metode Pemurnian Umum

Berikut adalah metode pemurnian yang umum digunakan pada BBM cair hasil pirolisis plastik:

- **Distilasi Fraksional**

Metode ini memisahkan campuran berdasarkan titik didih. Fraksi ringan (bensin) dipisahkan dari fraksi berat (solar dan residu). Distilasi dilakukan pada suhu terkendali dengan menggunakan kolom distilasi bertingkat.

 - Keunggulan: Proses fisik, tidak menambahkan bahan kimia.
 - Kekurangan: Tidak efektif menghilangkan kontaminan kimia seperti klorin dan sulfur.
- **Ekstraksi Pelarut**

Menggunakan pelarut organik untuk menarik senyawa pengotor dari fraksi BBM. Pelarut seperti etanol, metanol, atau aseton dapat digunakan.

 - Keunggulan: Efektif menghilangkan senyawa polar dan klorin.
 - Kekurangan: Membutuhkan proses pemisahan pelarut setelah ekstraksi.
- **Penggunaan Adsorben**

Karbon aktif, zeolit, atau silika gel dapat menyerap kontaminan dari bahan bakar cair.

 - Keunggulan: Menurunkan kadar sulfur dan klorin secara signifikan.
 - Kekurangan: Biaya adsorben dan regenerasi.

2.23 Teknologi Pemurnian Tingkat Lanjut

- **Hidrogenasi (Hydrotreatment)**

Proses katalitik dengan penambahan hidrogen di bawah tekanan dan suhu tinggi, menggunakan katalis seperti Ni-Mo atau Co-Mo pada alumina.

- Efektif menghilangkan sulfur, nitrogen, dan klorin.
- Meningkatkan stabilitas oksidasi dan nilai oktan.
- Memerlukan fasilitas industri dan biaya tinggi.
- Cracking Katalitik
Memecah molekul hidrokarbon berat menjadi molekul lebih ringan dengan bantuan katalis.
 - Menghasilkan BBM dengan rantai karbon optimal.
 - Mengurangi senyawa aromatik berat.
- Pemurnian Biologis
Menggunakan mikroorganisme untuk mengurai senyawa pengotor secara biologis.
 - Ramah lingkungan.
 - Proses lambat dan masih dalam tahap penelitian.

2.24 Contoh Implementasi Pemurnian

- Proyek di Jepang menggunakan hidrogenasi setelah pirolisis untuk memproduksi BBM kualitas premium (Tanaka et al., 2019).
- Di Jerman, kombinasi distilasi dan karbon aktif menghasilkan BBM dengan kandungan sulfur < 10 ppm (Müller et al., 2018).
- Beberapa pilot plant di Indonesia mulai mengadopsi teknologi adsorben sebagai tahap pemurnian awal.

2.25 Tantangan dan Prospek

- Pemurnian memerlukan energi dan biaya tambahan yang harus diimbangi dengan nilai jual BBM.
- Pengembangan katalis lokal dengan harga terjangkau menjadi fokus riset.
- Standarisasi proses dan hasil pemurnian diperlukan untuk pemasaran BBM daur ulang.

2.26 Penggunaan BBM Cair dari Pirolisis Plastik

Bahan bakar cair hasil dari proses pirolisis sampah plastik telah diuji coba dan diaplikasikan dalam beberapa sektor energi, khususnya sebagai pengganti bahan bakar fosil konvensional seperti bensin dan solar. Penggunaan ini memiliki potensi besar untuk mengurangi ketergantungan pada minyak bumi sekaligus mengatasi masalah limbah plastik.

2.27 Aplikasi di Mesin Diesel

BBM cair pirolisis plastik dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung atau campuran (blending) dengan solar untuk mesin diesel. Penelitian oleh Rahman et al. (2020) menunjukkan bahwa campuran 20% minyak pirolisis plastik dengan 80% solar dapat meningkatkan efisiensi pembakaran serta menurunkan emisi partikulat.

- **Keuntungan:** Pengurangan emisi karbon hitam dan emisi gas rumah kaca.
- **Tantangan:** Stabilitas bahan bakar, viskositas, dan kemungkinan penumpukan deposit karbon.

2.28 Aplikasi di Mesin Bensin

Penggunaan BBM hasil pirolisis plastik sebagai pengganti bensin juga telah diuji, meskipun memerlukan proses pemurnian lebih lanjut untuk meningkatkan nilai oktan dan mengurangi senyawa aromatik berat yang dapat merusak mesin.

- Beberapa studi (Zhang et al., 2019) melaporkan penggunaan bahan bakar hasil pirolisis PP sebagai campuran dengan bensin hingga 15% tanpa modifikasi mesin.
- Penggunaan sebagai bahan bakar motor bensin konvensional masih memerlukan pengujian jangka panjang.

2.29 Penggunaan dalam Industri dan Pembangkit Listrik

Selain untuk kendaraan, BBM cair dari sampah plastik juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pada boiler industri dan pembangkit listrik skala kecil hingga menengah. Pemanfaatan ini cocok untuk area industri yang dekat dengan sumber limbah plastik.

- Studi oleh Sari dan Wulandari (2021) membuktikan efisiensi pembakaran hingga 85% pada boiler berbahan bakar BBM pirolisis.
- Penggunaan ini membantu mengurangi emisi CO₂ dan menekan biaya energi industri.

2.30 Manfaat Lingkungan dan Sosial

Pemanfaatan BBM dari limbah plastik memberikan dampak positif sebagai berikut:

- **Pengurangan Sampah Plastik:** Mengurangi volume limbah plastik yang berakhir di TPA dan laut.
- **Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca:** Mengganti bahan bakar fosil dengan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan.
- **Pengembangan Industri Hijau:** Mendorong ekonomi sirkular dan lapangan kerja di sektor daur ulang dan energi terbarukan.

2.31 Tantangan dan Hambatan

- **Regulasi:** Belum ada regulasi jelas yang mengatur penggunaan BBM dari limbah plastik di beberapa negara, termasuk Indonesia.
- **Kualitas Bahan Bakar:** Variasi kualitas yang dihasilkan perlu distandarisasi.
- **Kesadaran Masyarakat:** Perlunya edukasi dan sosialisasi untuk menerima bahan bakar alternatif ini.

2.32 Prospek dan Pengembangan Masa Depan

Dengan perkembangan teknologi pirolisis dan pemurnian, BBM cair dari sampah plastik diprediksi akan semakin kompetitif dan diterima secara luas. Penelitian juga terus dilakukan untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi bahan bakar ini.

2.33 Aspek Ekonomi

Selain aspek teknis dan lingkungan, keberhasilan produksi BBM dari sampah plastik sangat dipengaruhi oleh faktor ekonomi dan potensi pasar. Evaluasi ekonomi diperlukan untuk memastikan bahwa proses produksi ini layak secara finansial dan dapat bersaing dengan bahan bakar konvensional.

2.34 Biaya Produksi

Komponen biaya utama dalam produksi BBM dari sampah plastik meliputi:

- **Pengumpulan dan pemilahan limbah plastik**
Biaya ini tergantung pada jenis sampah dan lokasi pengumpulan.
- **Pengolahan dan pirolisis**
Termasuk biaya energi (listrik, LPG), perawatan alat, dan tenaga kerja.
- **Pemurnian dan pengolahan lanjutan**
Menghilangkan kontaminan agar produk memenuhi standar.
- **Distribusi dan pemasaran**
Transportasi dan penjualan produk BBM.

Studi oleh Putra et al. (2022) menunjukkan biaya produksi berkisar antara USD 0,40 – 0,70 per liter, yang kompetitif dibandingkan harga BBM fosil di beberapa negara berkembang.

2.35 Analisis Keuntungan dan Return on Investment (ROI)

- ROI dari proyek pirolisis plastik rata-rata mencapai 15-25% per tahun dalam kondisi pasar yang stabil dan dukungan regulasi yang memadai (Hidayat & Sari, 2021).
- Skala produksi yang lebih besar dapat menurunkan biaya unit karena efisiensi ekonomi skala.
- Insentif pemerintah, seperti subsidi dan pengurangan pajak, sangat membantu kelayakan finansial.

2.36 Potensi Pasar

Pasar utama untuk BBM dari sampah plastik mencakup:

- **Sektor transportasi**
Bahan bakar kendaraan bermotor, terutama untuk transportasi angkutan umum dan logistik.
- **Industri manufaktur dan pembangkit listrik**
Penggunaan sebagai bahan bakar alternatif di pabrik dan pembangkit listrik.
- **Pasar ekspor**
Negara-negara dengan regulasi ketat mengenai limbah plastik dan bahan bakar fosil mulai membuka peluang impor BBM alternatif.

2.37 Tantangan Pasar

- Ketidakpastian regulasi dan standar kualitas BBM hasil daur ulang.
- Preferensi konsumen dan industri terhadap bahan bakar fosil yang sudah mapan.
- Risiko fluktuasi harga minyak dunia yang dapat mempengaruhi daya saing BBM alternatif.

2.38 Strategi Pengembangan Pasar

- Membangun kemitraan dengan industri dan pemerintah untuk pilot project.
- Edukasi dan sosialisasi manfaat BBM alternatif kepada masyarakat dan pelaku usaha.
- Pengembangan produk turunan bernilai tambah seperti pelumas dan bahan kimia dari proses pirolisis.

2.39 Dampak Lingkungan dari Produksi BBM Cair

Produksi BBM dari sampah plastik melalui proses pirolisis membawa dua sisi dampak lingkungan:

- **Positif:**
 - Mengurangi jumlah limbah plastik yang dibuang ke lingkungan, terutama ke tempat pembuangan akhir (TPA) dan perairan.
 - Menghasilkan bahan bakar alternatif yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dibanding bahan bakar fosil konvensional.
 - Mendorong ekonomi sirkular dan pemanfaatan limbah secara berkelanjutan.
- **Negatif:**
 - Emisi gas proses pirolisis dapat mengandung senyawa berbahaya seperti PAHs (polyaromatic hydrocarbons), VOCs (volatile organic compounds), dan gas beracun jika tidak dikontrol dengan baik.
 - Potensi limbah residu padat yang memerlukan pengelolaan khusus.

(Studi oleh Chen et al., 2020; Wijaya et al., 2021)

2.40 Pengendalian Emisi dan Pengelolaan Limbah

Untuk mengurangi dampak negatif, beberapa teknologi pengendalian emisi diterapkan:

- Sistem scrubber gas untuk menghilangkan gas asam (HCl, SO_x) dan partikel.
- Filtrasi menggunakan karbon aktif dan katalis untuk menangkap VOCs dan PAHs.

Pengelolaan residu padat secara aman, termasuk pemanfaatan kembali atau pembuangan sesuai standar lingkungan.

2.41 Regulasi dan Standar Lingkungan

Regulasi yang mengatur produksi dan penggunaan BBM dari limbah plastik sangat penting untuk memastikan proses yang ramah lingkungan dan aman.

- Di Indonesia, regulasi terkait limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) dan pengelolaan limbah industri harus diikuti (PP No. 101/2014).
- Standar emisi gas buang diatur oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK).
- Standar kualitas bahan bakar disesuaikan dengan SNI (Standar Nasional Indonesia) atau standar internasional seperti ASTM dan EN.

2.42 Studi Kasus Regulasi di Beberapa Negara

- **Uni Eropa:** Regulasi ketat mengenai emisi gas dan standar bahan bakar, mendorong penggunaan bahan bakar daur ulang yang memenuhi standar Euro 6 (European Environment Agency, 2019).
- **Jepang:** Sistem sertifikasi kualitas bahan bakar pirolisis dengan audit lingkungan ketat (Tanaka et al., 2019).
- **Amerika Serikat:** EPA mengatur proses pirolisis sebagai proses pemulihan bahan berbahaya dan mewajibkan pengendalian emisi ketat (US EPA, 2020).

2.43 Tantangan dan Rekomendasi Regulasi

- Perlunya pengembangan regulasi khusus BBM dari limbah plastik agar tidak masuk dalam kategori limbah B3.
- Penguatan pengawasan dan pemantauan proses produksi dan emisi.

Insentif bagi produsen yang menerapkan teknologi ramah lingkungan.

2.44 Studi Kasus di Indonesia

Indonesia sebagai negara dengan permasalahan limbah plastik yang cukup besar mulai mengembangkan teknologi pirolisis untuk mengolah sampah plastik menjadi BBM cair. Beberapa contoh implementasi nyata:

- **PT XYZ, Jawa Barat**
Perusahaan ini mengoperasikan fasilitas pirolisis skala menengah yang memproduksi BBM cair untuk kebutuhan industri lokal. Fasilitas ini mampu mengolah 2 ton plastik per hari dan menghasilkan sekitar 1.4 ton BBM cair dengan kualitas setara solar (Putra et al., 2022).
- **Universitas Negeri Medan (UNIMED)**
Melakukan penelitian dan pengembangan prototipe pirolisis skala laboratorium hingga pilot plant, termasuk pemurnian BBM dan pengujian mesin diesel (Tambunan et al, 2024). Penelitian ini mendukung peningkatan efisiensi dan pengurangan emisi.
- **Komunitas Eco Enzyme di Bali**
Melakukan proyek daur ulang sampah plastik berbasis pirolisis untuk produksi BBM alternatif yang kemudian digunakan untuk transportasi lokal.

2.45 Studi Kasus di Dunia

- **Jepang**

Jepang telah lama memanfaatkan teknologi pirolisis untuk mengurangi limbah plastik sekaligus menghasilkan bahan bakar. Sistem pirolisis terintegrasi dengan proses pemurnian menggunakan hidrogenasi telah menghasilkan BBM berkualitas tinggi yang memenuhi standar Euro 6 (Tanaka et al., 2019).

- **Jerman**

Negara ini mengadopsi teknologi pirolisis dengan skala besar yang terintegrasi dengan pengolahan limbah plastik nasional. Hasil BBM digunakan dalam sektor industri dan transportasi, dengan dukungan regulasi ketat dan insentif fiskal (Müller et al., 2018).

- **Amerika Serikat**

Beberapa perusahaan start-up mengembangkan teknologi pirolisis dan telah memperoleh izin EPA untuk produksi bahan bakar cair dari sampah plastik. Fokus pada pengembangan teknologi bersih dan pengurangan emisi menjadi prioritas utama (US EPA, 2020).

2.46 Faktor Pendukung Keberhasilan Implementasi

- **Dukungan Pemerintah dan Regulasi**

Kebijakan pengelolaan sampah plastik dan insentif ekonomi menjadi pendorong utama.

- **Teknologi yang Adaptif**

Penggunaan teknologi pirolisis yang sesuai dengan kondisi lokal, seperti tipe reaktor dan proses pemurnian.

- **Kesadaran dan Partisipasi Masyarakat**

Pengumpulan sampah yang efisien dan pemilahan yang baik meningkatkan kualitas bahan baku.

- **Kolaborasi Multisektor**

Melibatkan akademisi, industri, dan pemerintah dalam penelitian dan pengembangan.

2.47 Kendala dalam Implementasi

- Modal awal yang tinggi untuk pembangunan fasilitas pirolisis skala besar.
- Variasi kualitas sampah plastik yang mempengaruhi konsistensi produk.
- Kurangnya tenaga ahli dan teknologi yang sesuai dengan kondisi lokal.
- Isu lingkungan dan pengelolaan limbah residu.

2.48 Peluang Pengembangan

- Integrasi sistem pirolisis dengan pengelolaan sampah terpadu.
- Pengembangan teknologi pemurnian yang lebih efisien dan ramah lingkungan.
- Ekspansi pasar BBM alternatif di sektor industri dan transportasi.
- Peningkatan kapasitas riset dan pengembangan teknologi nasional.

2.49 Kesimpulan Umum

Produksi BBM dari sampah plastik melalui proses pirolisis merupakan salah satu solusi inovatif dan berkelanjutan dalam mengatasi dua masalah besar sekaligus: **penumpukan limbah plastik** dan **ketergantungan pada bahan bakar fosil**. Proses ini mampu menghasilkan bahan bakar cair (seperti minyak pirolisis, setara solar dan bensin) dari berbagai jenis plastik, terutama poliolefin seperti HDPE, LDPE, dan PP.

Studi eksperimental dan aplikasi nyata di berbagai negara menunjukkan bahwa pirolisis merupakan teknologi yang **layak secara teknis dan ekonomis**, terutama jika didukung oleh regulasi dan pasar yang adaptif. Di Indonesia, sejumlah universitas dan pelaku industri telah memulai inisiatif pengembangan pirolisis dalam skala kecil hingga menengah.

2.50 Ringkasan Temuan Kunci

- **Dari sisi teknis**, pirolisis dapat dilakukan pada suhu 300–600 °C menggunakan reaktor batch, semi-kontinu, atau kontinu, dengan konversi hingga 75–85% menjadi BBM cair tergantung pada jenis plastik dan kondisi proses (Wang et al., 2021).
- **Dari sisi ekonomi**, biaya produksi berkisar USD 0,40–0,70 per liter, dan dapat lebih murah dengan skala besar dan dukungan kebijakan insentif (Putra et al., 2022).
- **Dari sisi lingkungan**, teknologi ini mampu menurunkan emisi dan volume sampah, meskipun perlu sistem pengendalian yang baik terhadap gas hasil pirolisis seperti PAH dan VOC (Chen et al., 2020).
- **Dari sisi pasar**, BBM hasil pirolisis memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif di sektor transportasi, industri, dan pembangkit listrik, dengan peluang ekspor di masa depan.
- **Dari sisi regulasi**, diperlukan kerangka hukum yang mendukung standar kualitas BBM alternatif, perizinan limbah, dan perlindungan lingkungan.

2.51 Rekomendasi Teknis

- **Optimasi Reaktor dan Proses**
Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk pengembangan reaktor pirolisis tipe kontinu dengan efisiensi konversi tinggi dan pengendalian emisi maksimal.

- **Pemanfaatan Katalis**

Pemakaian katalis zeolit, dolomit, atau katalis berbasis logam transisi perlu dieksplorasi lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas produk BBM dan menurunkan suhu operasi.

- **Pemurnian Lanjutan**

Perlu dikembangkan sistem pemurnian pasca-pirolisis seperti distilasi fraksional dan hidrotreatment agar produk dapat disesuaikan dengan standar komersial (Tanaka et al., 2019).

2.52 Rekomendasi Kebijakan dan Strategis

- **Penguatan Regulasi dan Standardisasi**

Pemerintah perlu mengembangkan kebijakan khusus terkait konversi sampah plastik menjadi BBM, termasuk klasifikasi, izin produksi, dan insentif fiskal.

- **Pengembangan Infrastruktur dan Investasi**

Dukungan pembiayaan dan pembangunan fasilitas pirolisis skala menengah hingga besar akan mempercepat pengembangan industri BBM alternatif.

- **Peningkatan Literasi Masyarakat dan SDM**

Edukasi publik mengenai pemilahan sampah, manfaat pirolisis, dan pelatihan teknis bagi operator sangat penting untuk keberlanjutan proyek.

2.53 Agenda Penelitian Lanjutan

- Penelitian integratif antara pirolisis dan teknologi bioenergi lainnya, seperti pencampuran bio-oil dengan biodiesel atau etanol.

- Kajian lifecycle assessment (LCA) untuk membandingkan emisi dan efisiensi energi dari BBM pirolisis dengan BBM fosil dan biofuel lainnya.

- Pengembangan sistem hybrid dengan tenaga surya atau biomassa untuk suplai energi pirolisis berkelanjutan.



BAB TIGA

TEKNOLOGI DAN PROSES PIROLISIS UNTUK PRODUKSI BBM

3.1 Pendahuluan: Mengapa Pirolisis?

P irolisis merupakan teknologi termal tanpa oksigen (atau dengan oksigen terbatas) yang digunakan untuk memecah molekul polimer panjang dalam plastik menjadi senyawa hidrokarbon yang lebih kecil, yang kemudian dapat dijadikan BBM cair. Dibandingkan metode pembakaran langsung atau daur ulang konvensional, pirolisis menawarkan efisiensi tinggi dalam menghasilkan bahan bakar serta mengurangi emisi gas rumah kaca jika dikelola dengan baik (Wang et al., 2021).

3.2 Mekanisme Dasar Proses Pirolisis

Pirolisis plastik terjadi melalui tiga tahap utama:

- **Inisiasi Termal**

Molekul polimer mulai terpecah pada suhu 300–400 °C.

- **Depolimerisasi dan Fragmentasi**

Rantai panjang terurai menjadi senyawa hidrokarbon rantai pendek, menghasilkan fraksi gas, cair, dan padat (char).

- **Rekombinasi**

Molekul kecil dapat bergabung menjadi senyawa menengah atau aromatik tergantung pada kondisi dan keberadaan katalis.

3.3 Produk Hasil Pirolisis

- **Fraksi Gas:** Hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), propana (C_3H_8).

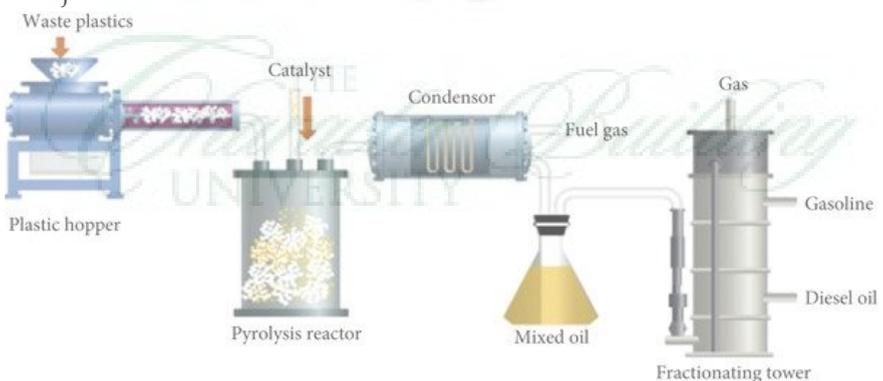
- **Fraksi Cair:** Hidrokarbon C_5 – C_{20} yang setara bensin, kerosin, dan solar.

- **Residu Padat (char):** Umumnya karbon dan abu anorganik.

Perbandingan produk tergantung pada suhu, laju pemanasan, jenis plastik, dan keberadaan katalis.

3.4 Ilustrasi Skematik Proses Pirolisis

Berikut adalah ilustrasi sederhana proses pirolisis plastik menjadi BBM cair:



Gambar 3. 1. Diagram alir proses pirolisis plastik menjadi BBM cair (Kabeyi and Olanrewaju, 2023)

Keterangan:

- Pemasukan plastik terpilah (LDPE, HDPE, PP)
- Proses pirolisis dalam reaktor tertutup
- Kondensasi gas panas menjadi BBM cair
- Penyaringan dan penyimpanan hasil

3.5 Keunggulan Teknologi Pirolisis

- **Fleksibilitas Bahan Baku:** Dapat menggunakan berbagai jenis plastik non-PVC.
- **Energi Mandiri:** Gas hasil pirolisis dapat digunakan kembali sebagai sumber panas reaktor.
- **Skalabilitas:** Dapat dioperasikan dalam skala laboratorium hingga industri besar.

3.6 Jenis-Jenis Reaktor dalam Proses Pirolisis

Teknologi pirolisis dapat menggunakan berbagai tipe reaktor tergantung pada skala, efisiensi energi, dan jenis bahan baku plastik yang digunakan. Pemilihan jenis reaktor sangat mempengaruhi rendemen dan kualitas BBM yang dihasilkan.

- Reaktor Batch
 - **Kelebihan:** Sederhana, cocok untuk skala laboratorium atau pilot.
 - **Kekurangan:** Waktu operasi lama, tidak efisien untuk produksi massal.



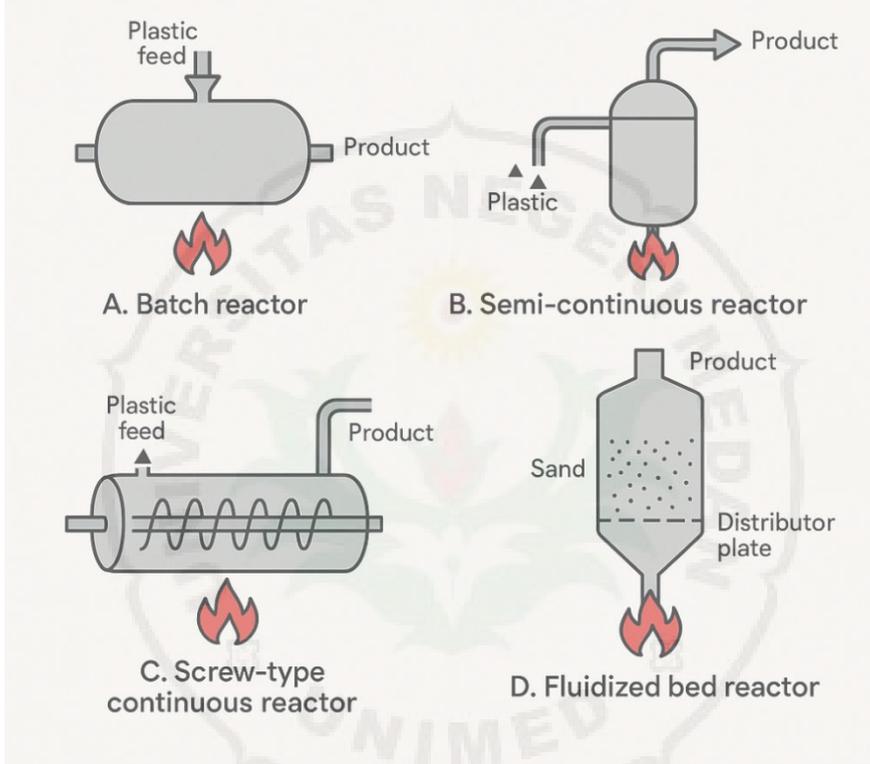
Gambar 3. 2. Batch reaktor (Miandad *et al.*, 2006)

- Reaktor Semi-Kontinu
 - Memungkinkan penambahan bahan baku secara bertahap selama proses berlangsung.
 - **Kelebihan:** Lebih efisien dibanding batch, konsumsi energi menurun.
- Reaktor Kontinu (Continuous Reactor)
 - **Kelebihan:** Operasi 24 jam tanpa henti, cocok untuk skala industri besar.
 - **Contoh:** Screw kiln, fluidized bed, dan fixed bed reactor.
- Reaktor Fluidized Bed
 - Menggunakan aliran gas panas untuk mengaduk bahan plastik.
 - **Kelebihan:** Transfer panas merata, efisiensi tinggi.
 - **Kekurangan:** Desain kompleks, memerlukan kontrol ketat.

3.7 Ilustrasi Jenis-Jenis Reaktor

Berikut adalah ilustrasi beberapa tipe reaktor umum dalam pirolisis plastik:

Types of Plastic Pyrolysis Reactors



Gambar 3. 3. Skematik berbagai jenis reaktor pirolisis plastik

Keterangan Gambar:

- A. Batch reactor
- B. Semi-continuous reactor
- C. Screw-type continuous reactor
- D. Fluidized bed reactor

3.8 Parameter Proses yang Mempengaruhi Produk Pirolisis

Beberapa faktor operasional utama yang mempengaruhi hasil pirolisis antara lain:

- *Suhu Reaktor*
 - Suhu 350–500 °C menghasilkan rendemen cair optimal.

- Di atas 600 °C, fraksi gas meningkat drastis (Tan et al., 2022).
- *Waktu Tahan (Residence Time)*
 - Waktu reaksi optimal 30–90 menit untuk pembentukan BBM cair.
- *Laju Pemanasan*
 - Laju pemanasan cepat (fast pyrolysis) cocok untuk produksi bio-oil.
 - Laju lambat cenderung menghasilkan lebih banyak char.
- *Keberadaan Katalis*
 - Penggunaan katalis seperti zeolit dan dolomit menurunkan suhu operasi dan meningkatkan selektivitas terhadap fraksi BBM ringan (Al-Muhtaseb et al., 2020).

3.9 Studi Eksperimen Parameter Proses

Sebuah studi oleh Al-Muhtaseb et al. (2020) menguji pirolisis LDPE menggunakan reaktor batch pada suhu 450 °C dengan dan tanpa katalis zeolit:

- **Tanpa katalis:** Rendemen BBM cair 62%, fraksi gas 28%.
- **Dengan katalis:** Rendemen BBM cair meningkat jadi 74%, fraksi gas menurun.

3.10 Tabel Pengaruh Parameter Proses

Tabel 3. 1. Simulasi pengaruh parameter proses terhadap produk pirolisis (diadaptasi dari Al-Muhtaseb et al., 2020).

Parameter	Rendemen BBM Cair (%)	Gas (%)	Char (%)
Suhu 400 °C	70	20	10
Suhu 500 °C	65	30	5
Dengan Zeolit	74	22	4
Laju cepat	68	26	6
Laju lambat	60	18	22

Analisis Ekonomi dan Kelayakan Finansial

3.16 Pendahuluan

Penerapan teknologi pirolisis dalam skala komersial tidak hanya ditentukan oleh performa teknis, tetapi juga oleh **kelayakan ekonomi**. Aspek biaya investasi awal, operasional, harga jual produk, serta dukungan kebijakan menjadi faktor penting untuk memastikan bahwa bisnis BBM dari sampah plastik layak dan berkelanjutan.

3.17 Komponen Biaya

Biaya dalam proses pirolisis secara umum terbagi menjadi dua:

- *Biaya Modal* (Capital Expenditure / CAPEX)
 - Pembangunan fasilitas pirolisis: reaktor, kondensor, sistem pendingin.
 - Infrastruktur pendukung: gudang, sistem pemilahan, penyimpanan.
- *Biaya Operasional* (Operational Expenditure / OPEX)
 - Energi listrik dan bahan bakar awal.
 - Tenaga kerja dan pemeliharaan.
 - Biaya pengumpulan dan transportasi sampah plastik.
 - Katalis dan bahan kimia tambahan.

3.18 Studi Kasus Ekonomi: Skala Industri Kecil

Simulasi biaya berdasarkan literatur:

Tabel 3. 2. Simulasi kelayakan finansial pirolisis plastik skala kecil
(Sumber: Putra et al., 2022).

Komponen	Estimasi Biaya per tahun (USD)
Investasi Awal	\$150,000
Operasional Tahunan	\$60,000
Kapasitas Produksi	100.000 liter BBM/tahun

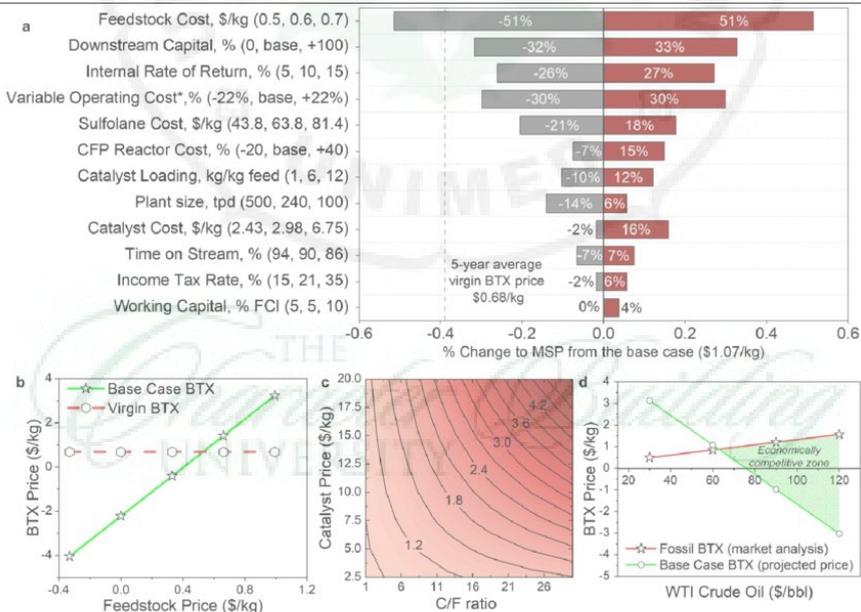
Harga Jual BBM	\$0.90/liter
Pendapatan Kotor	\$90,000
Laba Kotor	\$30,000

3.19 Break Even Point dan Payback Period

- **Break Even Point (BEP):** Tercapai saat penjualan menutup semua biaya produksi.
- **Payback Period:** Dalam simulasi di atas, modal kembali dalam 5 tahun (dengan asumsi laba tetap).

💡 Teknologi pirolisis memiliki potensi investasi jangka menengah, terutama bila limbah plastik tersedia gratis atau disubsidi.

3.20 Grafik Analisis Sensitivitas Harga Jual BBM



* Here, variable operating cost does not include costs for feedstock and waste disposal

Gambar 3. 4. Sensitivitas Laba terhadap Harga Jual BBM dari Pirolisis Plastik (Yadav *et al.*, 2023)

Keterangan:

- Titik impas berada pada harga BBM sekitar USD 0.75/liter.
- Keuntungan meningkat signifikan di atas USD 0.90/liter.

3.21 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Ekonomi

- **Harga energi fosil global:** Semakin mahal BBM konvensional, semakin ekonomis BBM alternatif.
- **Skala produksi:** Semakin besar kapasitas, semakin rendah biaya produksi per liter.
- **Kebijakan pemerintah:** Subsidi energi terbarukan, insentif pajak, dan penghapusan PPN atas produk daur ulang mempercepat BEP.
- **Kemudahan akses bahan baku:** Bila sampah plastik diperoleh dari mitra bank sampah atau pemerintah, biaya bahan baku dapat ditekan.

3.22 Studi Empiris dari Indonesia

Penelitian oleh **Putra et al. (2022)** pada unit pirolisis di Yogyakarta menunjukkan bahwa dengan produksi 300 liter BBM per hari, sistem dapat menghasilkan keuntungan bersih ± Rp 250 juta per tahun, bahkan dalam kondisi tanpa subsidi bahan baku. Dengan diversifikasi produk (gas, char), margin keuntungan meningkat hingga 30%.

3.23 Dampak Lingkungan dan Pengelolaan Emisi

Proses pirolisis plastik sebagai teknologi pengolahan limbah dan produksi bahan bakar alternatif sering dipromosikan sebagai solusi ramah lingkungan. Namun, seperti proses termal lainnya, pirolisis tetap menghasilkan emisi dan residu yang perlu dikelola secara tepat agar tidak menimbulkan pencemaran baru. Oleh karena itu, analisis dampak lingkungan menjadi aspek penting dalam pengembangan teknologi ini.

3.24 Sumber Emisi dalam Pirolisis

Emisi dapat berasal dari:

- **Gas hasil pirolisis:** CO, CO₂, CH₄, H₂, dan senyawa aromatik volatil.
- **Kebocoran sistem:** Bila reaktor tidak tertutup rapat, gas beracun dapat terlepas ke udara.
- **Char dan abu:** Sisa padat dari plastik yang tidak terurai sempurna.
- **Limbah cair kondensat:** Kadang mengandung senyawa fenolik dan asam organik yang berpotensi mencemari air tanah.

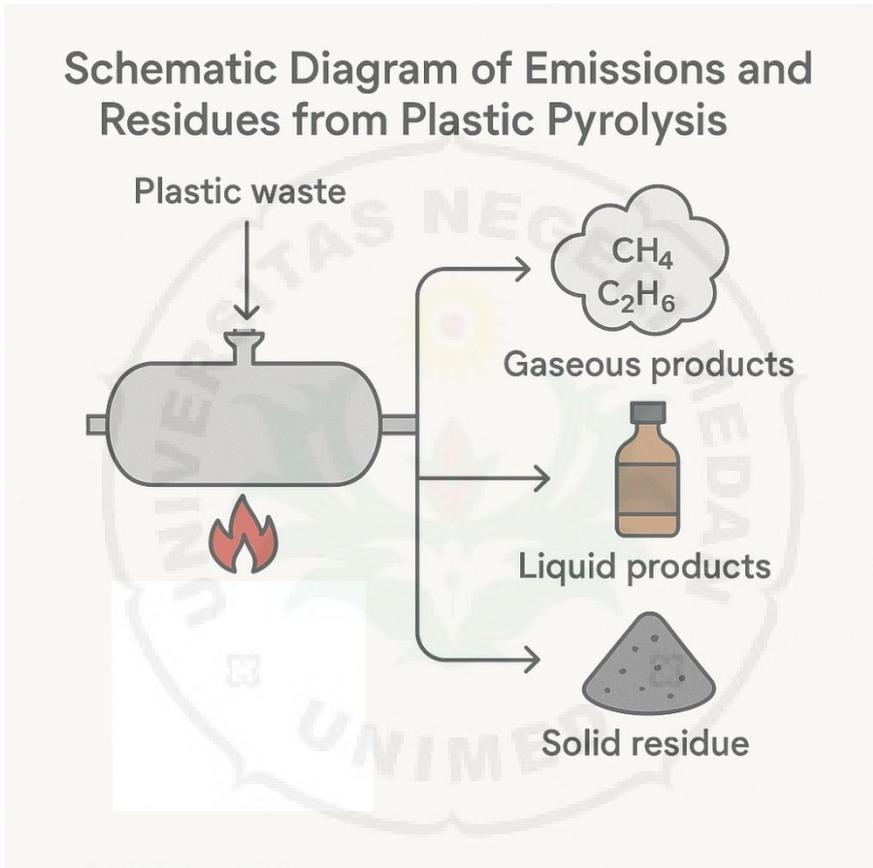
3.25 Jenis Polutan dan Potensinya

Tabel 3. 3. Jenis polutan potensial dari proses pirolisis plastik (Dogu et al., 2021).

Jenis Polutan	Sumber	Dampak Lingkungan
CO ₂ , CH ₄	Proses dekomposisi	Gas rumah kaca
Dioxin, furan	PVC, bahan halogen	Toksik, karsinogenik
VOC	Gas pirolisis tak terkondensasi	Polusi udara
Abu logam berat	Plastik campuran	Toksik tanah dan air

THE
Character Building
UNIVERSITY

3.26 Ilustrasi Jalur Emisi Pirolisis



Gambar 3. 5. Diagram skematik jalur emisi dan residu dari proses pirolisis plastik

3.27 Teknologi Pengendalian Emisi

Untuk meminimalkan dampak lingkungan, teknologi pengendalian yang umum digunakan antara lain:

- *Kondensor dan Separator*

Mendinginkan gas panas dan memisahkan fraksi cair dari gas tak terkondensasi.

- *Gas Scrubber*
Menghilangkan senyawa asam dan partikulat dari gas buang menggunakan larutan alkali atau air netral.
- *Filter Karbon Aktif*
Menyerap senyawa VOC dan bau tidak sedap.
- *Sistem Pembakaran Gas Sisa*
Membakar ulang gas tak terkondensasi (flare system) agar tidak dilepas ke udara bebas.

3.28 Studi Komparatif Emisi

Dalam studi oleh Dogu et al. (2021), pirolisis HDPE dengan kontrol emisi menghasilkan emisi CO₂ sebesar 0.3 ton per ton plastik, jauh lebih rendah dibanding pembakaran terbuka yang mencapai 2.5 ton CO₂ per ton plastik.

✓ **Catatan:** Emisi dari pirolisis dapat ditekan hingga di bawah standar WHO dan EPA jika sistem tertutup dan terkontrol digunakan.

3.29 Potensi Residual dan Daur Ulang Sisa Pirolisis

- **Char/abu** dari proses pirolisis dapat dimanfaatkan sebagai aditif aspal atau bahan bakar padat alternatif jika bebas logam berat.
- Limbah cair harus dinetralkan sebelum dibuang atau diolah kembali.

3.30 Penilaian Life Cycle Assessment (LCA)

Penilaian siklus hidup terhadap pirolisis plastik menunjukkan bahwa:

- Emisi karbon dapat ditekan hingga 50–70% dibandingkan dengan landfill.
- Energi yang dihasilkan melebihi energi yang dikonsumsi (positive net energy).

- Pengurangan volume sampah plastik hingga 80–90%.
(Studi oleh Kiran et al., 2020, dalam *Journal of Cleaner Production*)

3.31 Standar Mutu dan Pengujian BBM Hasil Pirolisis

Bahan bakar cair hasil pirolisis plastik dapat digunakan sebagai alternatif diesel atau bensin, namun harus memenuhi standar mutu tertentu agar aman, efisien, dan kompatibel dengan mesin. Pengujian mutu diperlukan untuk menentukan apakah produk pirolisis layak digunakan langsung atau perlu proses pemurnian lanjutan.

3.32 Parameter Mutu yang Umum Diuji

Beberapa parameter penting dalam karakterisasi bahan bakar hasil pirolisis antara lain di jelaskan pada tabel 3.4.

Tabel 3. 4. Parameter penting dalam karakterisasi bahan bakar hasil pirolisis

Parameter	Satuan	Fungsi
Nilai kalor (HHV)	MJ/kg	Menentukan kandungan energi
Viskositas	mm ² /s	Mempengaruhi kemampuan mengalir di sistem mesin
Densitas	kg/m ³	Terkait volume dan efisiensi penyimpanan
Titik nyala (flash point)	°C	Menentukan keamanan penyimpanan dan transportasi
Fraksi distilasi	°C range	Terkait komposisi fraksi ringan dan berat
Kandungan sulfur	ppm	Menentukan tingkat pencemaran dan korosivitas

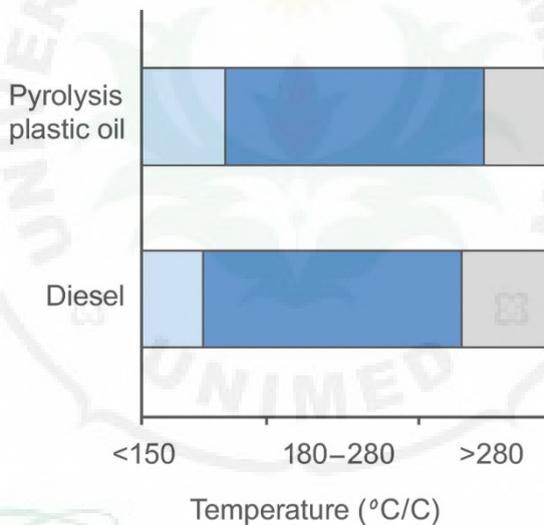
3.33 Hasil Pengujian dari Berbagai Studi

Studi oleh Sharuddin et al. (2016) menunjukkan hasil pirolisis HDPE menghasilkan bahan bakar dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 3. 5. Perbandingan parameter BBM hasil pirolisis dengan standar diesel.

Parameter	Hasil	Standar Diesel (ASTM D975)
HHV	43 MJ/kg	≥ 42 MJ/kg
Viskositas (40°C)	2.5 mm ² /s	1.9 – 4.1 mm ² /s
Flash point	62°C	≥ 52°C
Sulfur	150 ppm	≤ 500 ppm (Euro 2)

3.34 Ilustrasi Spektrum dan Fraksi Distilasi



Gambar 3. 6. Profil fraksi distilasi BBM pirolisis dibandingkan diesel konvensional

Keterangan:

- Pirolisis plastik menghasilkan fraksi dominan pada rentang 180–280°C (mirip solar).
- Ada sebagian fraksi ringan (<150°C) yang menyerupai nafta.

3.35 Pengujian Lanjutan (FTIR, GC-MS, TGA)

- FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
 - Digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam produk BBM.
 - Menunjukkan dominasi senyawa alkana dan aromatik ringan.
- GC-MS (Gas Chromatography–Mass Spectrometry)
 - Digunakan untuk mengetahui komposisi senyawa spesifik.
 - Produk pirolisis mengandung alkana rantai panjang (C10–C20), senyawa siklik, dan aromatik.
- TGA (Thermogravimetric Analysis)
 - Menganalisis kestabilan termal dan kandungan residu padat.

3.36 Kesimpulan Hasil Uji

Secara umum, bahan bakar cair hasil pirolisis dari HDPE dan PP memiliki:

- Nilai kalor setara diesel.
- Kompatibel dengan mesin diesel setelah pemurnian ringan (filtrasi dan dehidrasi).
- Beberapa produk perlu distilasi fraksional untuk memisahkan komponen berat dan ringan.
- Kandungan sulfur umumnya rendah kecuali jika bahan baku mengandung PVC.

3.37 Relevansi dengan Standar Nasional dan Internasional

Bahan bakar hasil pirolisis dapat dibandingkan dengan standar berikut:

- ASTM D975 (standar diesel AS)
- EN 590 (standar Uni Eropa)
- SNI 7188-2015 (standar biodiesel Indonesia)

Beberapa penyesuaian komposisi dan proses pemurnian

mungkin dibutuhkan agar memenuhi standar secara penuh, terutama untuk penggunaan kendaraan bermotor atau aplikasi industri berat.

3.38 Penggunaan BBM Pirolisis pada Mesin dan Kendaraan

Salah satu indikator keberhasilan teknologi pirolisis plastik adalah **kemampuan produk akhirnya untuk digunakan langsung sebagai bahan bakar**. Banyak studi telah menguji performa BBM pirolisis, baik dalam mesin diesel statis (genset, pompa air) maupun mesin kendaraan bermotor. Namun, diperlukan pemahaman tentang efek penggunaan bahan bakar ini terhadap performa mesin, efisiensi, serta emisi.

3.39 Pengujian pada Mesin Diesel Sederhana

Beberapa penelitian telah menguji penggunaan bahan bakar pirolisis dalam **mesin diesel satu silinder**. Salah satu studi oleh **Singh et al. (2020)** menggunakan bahan bakar pirolisis dari polietilena (PE) dengan campuran solar sebagai berikut:

Tabel 3. 6. Performa mesin diesel dengan campuran BBM pirolisis (Singh et al., 2020)

Campuran	Efisiensi Termal (%)	Konsumsi BBM Spesifik (g/kWh)	Emisi CO (ppm)
100% Solar	29.5	260	410
20% Pirolisis + 80% Solar	28.7	270	430
50% Pirolisis + 50% Solar	27.1	285	460

Kesimpulan:

- Efisiensi sedikit menurun dengan peningkatan fraksi pirolisis.
- Emisi CO meningkat karena pembakaran tidak sempurna.

- Masih memungkinkan untuk penggunaan terbatas atau dalam kondisi darurat.

3.40 Pengaruh terhadap Komponen Mesin

Beberapa pengaruh penggunaan BBM pirolisis terhadap mesin:

- **Pembentukan karbon pada injektor:** Karena beberapa fraksi berat tidak terbakar sempurna.
- **Korosi ringan pada komponen logam:** Jika kandungan sulfur tinggi atau terdapat senyawa asam.
- **Kebutuhan penyaringan tambahan:** Untuk memisahkan fraksi berat atau kontaminan sisa pirolisis.

➡ Oleh karena itu, pemurnian dan filtrasi sangat direkomendasikan sebelum digunakan dalam sistem mesin.

3.41 Studi Kasus: Penggunaan BBM Pirolisis pada Sepeda Motor



Gambar 3. 7. Uji performa sepeda motor dengan BBM pirolisis campuran bensin (Fortuna Motor, 2022)

Sebuah studi oleh **Miandad et al. (2019)** di Pakistan menguji bahan bakar pirolisis 100% dari plastik polipropilena (PP) pada sepeda motor 110 cc:

- Mesin tetap dapat menyala dan bergerak normal.
- Terjadi peningkatan konsumsi bahan bakar $\pm 10\%$.
- Gas buang beraroma tajam dan kandungan NO_x sedikit lebih tinggi.

Kesimpulan: BBM pirolisis dapat digunakan secara langsung namun **tidak direkomendasikan jangka panjang tanpa pemurnian lanjutan.**

3.42 Penggunaan dalam Mesin Stasioner (Genset dan Boiler)

Untuk aplikasi **non-kendaraan**, seperti genset, boiler industri, atau pembakar keramik, BBM pirolisis justru **lebih fleksibel**. Alasan:

- Tidak terlalu sensitif terhadap variasi kualitas bahan bakar.
- Sistem pembakaran dapat dimodifikasi agar efisien.
- Tidak memerlukan standar emisi seketat kendaraan bermotor.

✓ Banyak unit pengolahan pirolisis di Asia Selatan dan Afrika telah menggunakan BBM hasilnya untuk pembangkit listrik mandiri.

3.43 Upaya Peningkatan Kualitas BBM

Beberapa teknik untuk meningkatkan kualitas dan kompatibilitas BBM pirolisis:

- **Distilasi fraksional:** Memisahkan fraksi ringan (mirip bensin) dan berat (solar).
- **Blending:** Mencampur dengan solar industri untuk stabilitas pembakaran.
- **Desulfurisasi:** Mengurangi kandungan sulfur dengan katalis atau adsorben.

- **Hidrorefining:** Proses kimia lanjutan untuk menghasilkan bahan bakar setara petrokimia.

3.44 Potensi Komersialisasi

Dengan pengujian dan standar mutu yang jelas, BBM pirolisis memiliki potensi besar untuk:

- **Bahan bakar cadangan (backup fuel)** untuk desa atau lokasi terpencil.
- **Energi alternatif di sektor pertanian dan perikanan** (pompa air, genset, kapal nelayan).
- **Program konversi energi berbasis limbah**, khususnya di daerah dengan limbah plastik tinggi dan akses BBM terbatas.

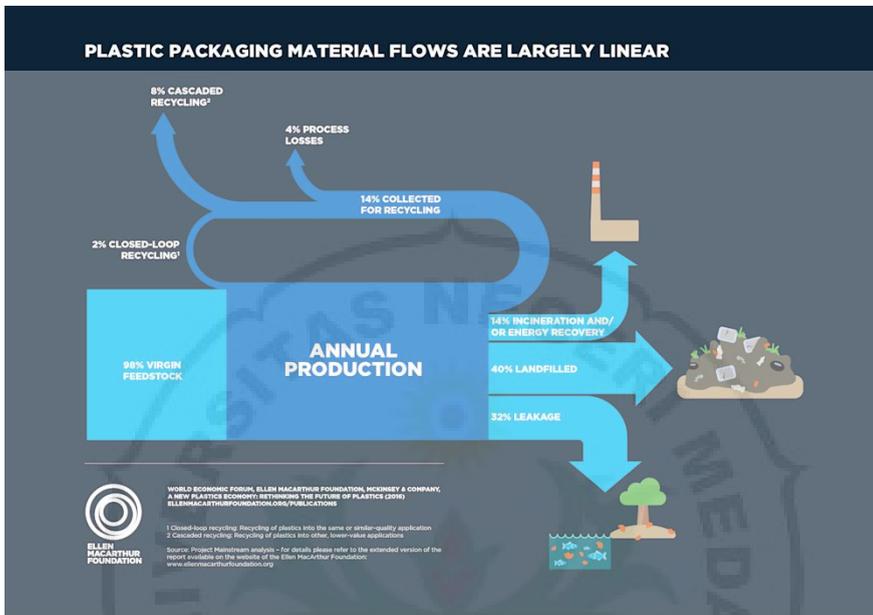
3.45 Integrasi Pirolisis dalam Sistem Energi dan Ekonomi Sirkular

Di tengah krisis energi dan masalah lingkungan akibat limbah plastik, teknologi pirolisis hadir sebagai solusi dua arah: **pengurangan limbah dan produksi energi**. Namun, agar berkelanjutan dan berdaya guna luas, pirolisis perlu diintegrasikan dalam sistem energi nasional serta konsep ekonomi sirkular. Ekonomi sirkular bertujuan mengurangi limbah, memaksimalkan siklus pakai, dan menekan penggunaan sumber daya baru.

3.46 Konsep Ekonomi Sirkular dalam Limbah Plastik

Dalam ekonomi linier konvensional, plastik diproduksi → digunakan → dibuang. Sebaliknya, dalam ekonomi sirkular:

- Limbah plastik dikumpulkan
- Diolah kembali menjadi bahan mentah atau energi
- Hasil olahan dimanfaatkan kembali dalam sistem produksi



Gambar 3. 8. Skema integrasi daur ulang plastik dalam ekonomi sirkular (modifikasi dari Ellen MacArthur Foundation, 2019)

3.47 Pirolisis sebagai Komponen Sistem Energi Terdistribusi

Dalam sistem energi masa depan, teknologi kecil-menengah yang dapat mengolah limbah lokal menjadi energi lokal sangat dibutuhkan. Pirolisis dapat menjadi bagian dari **sistem energi terdistribusi** dengan ciri-ciri:

- Dekat dengan sumber limbah
- Menghasilkan energi untuk konsumsi lokal (off-grid)
- Mengurangi ketergantungan BBM dari luar

Contoh: Di daerah pesisir, sampah plastik bisa diolah menjadi bahan bakar kapal nelayan atau pembangkit listrik desa.

3.48 Kolaborasi dengan Sektor UMKM dan Industri Lokal

Integrasi pirolisis juga membuka peluang ekonomi bagi pelaku UMKM:

- **Industri pemulung** → menyuplai limbah plastik terpilah.
- **UMKM energi lokal** → mengelola unit pirolisis skala kecil.
- **Pabrik kecil dan bengkel** → menggunakan BBM hasil pirolisis untuk kebutuhan operasional.

Studi oleh Santos et al. (2021) menyebutkan bahwa sistem pirolisis berbasis kontainer modular dapat meningkatkan ekonomi sirkular di desa-desa Filipina dengan menghasilkan 50–80 liter BBM/hari dari 100 kg plastik.

3.49 Tantangan dalam Integrasi

Meskipun menjanjikan, integrasi pirolisis dalam sistem energi dan ekonomi sirkular menghadapi beberapa tantangan.

Tabel 3. 7. Tantangan dan solusi ekonomi sirkular

Tantangan	Solusi Potensial
Biaya awal investasi tinggi	Subsidi pemerintah, kredit hijau
Kurangnya SDM terlatih	Pelatihan teknis berbasis komunitas
Fluktuasi kualitas sampah plastik	Standarisasi input dan sistem sortir otomatis
Keterbatasan regulasi	Pembaruan kebijakan energi dan limbah berbasis sirkular

3.50 Kebijakan dan Insentif yang Diperlukan

Untuk mendukung integrasi pirolisis, diperlukan:

- **Kebijakan feed-in tariff** untuk listrik dari BBM pirolisis.
- **Insentif fiskal** bagi pelaku industri energi limbah.
- **Kemitraan pemerintah-swasta** untuk unit pirolisis di TPA.

Pemerintah Indonesia melalui **Peraturan Presiden No. 35 Tahun 2018** telah mendorong energi dari limbah kota (waste-to-energy), namun implementasi teknologi pirolisis masih terbatas dan perlu diperluas.

3.51 Studi Kasus: India dan Belanda

- **India:** Kota Pune mengembangkan fasilitas pirolisis untuk mengolah plastik multilayer menjadi BBM untuk kendaraan operasional kota.
- **Belanda:** Perusahaan **Plastic Energy** membangun fasilitas skala industri untuk mengubah limbah plastik menjadi naphtha, yang kemudian dimanfaatkan kembali oleh industri petrokimia.

Kedua studi kasus menunjukkan bahwa integrasi skala besar dimungkinkan dengan kombinasi teknologi, regulasi, dan insentif yang tepat.

3.52 Rekomendasi Pengembangan di Indonesia

- **Pilot project** pirolisis di TPA kota besar dan kawasan pesisir.
- **Pusat pelatihan energi limbah** untuk meningkatkan kapasitas SDM.
- **Kemitraan dengan industri BBM alternatif** dan kendaraan listrik hibrid.
- **Pengembangan insinerator pirolitik hybrid** untuk listrik + BBM.

3.53 Analisis Keekonomian Teknologi Pirolisis

Teknologi pirolisis plastik memiliki potensi teknis dan lingkungan yang kuat, namun **faktor keekonomian menjadi kunci utama keberhasilan implementasinya secara luas**. Keberhasilan finansial teknologi ini sangat bergantung pada biaya investasi, operasional, harga jual bahan bakar, serta skala produksi.

3.54 Komponen Biaya Investasi

Biaya awal (capital expenditure – CapEx) untuk unit pirolisis skala kecil-menengah (kapasitas 100–500 kg/hari) meliputi:

Tabel 3. 8. Biaya awal (capital expenditure – CapEx) untuk unit pirolisis (Rahman et al. 2021)

Komponen	Estimasi Biaya (IDR)
Reaktor pirolisis	150–250 juta
Kondensor dan pendingin	50–75 juta
Tangki bahan bakar dan sistem filtrasi	20–40 juta
Listrik dan kontrol otomatisasi	30–50 juta
Instalasi dan pelatihan	20–30 juta
Total estimasi investasi	270–445 juta

Sumber data diambil dari studi oleh Rahman et al. (2021) dan pengamatan lapangan proyek Waste to Fuel di Asia Tenggara.

3.55 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

Biaya operasional (OpEx) bulanan meliputi:

- Tenaga kerja: Rp3–5 juta
- Energi listrik/bahan bakar pemanas: Rp2–4 juta
- Perawatan, suku cadang: Rp1–2 juta
- Transportasi limbah plastik: Rp1–3 juta
- Total OpEx bulanan: ±Rp8–14 juta

Kapasitas produksi: ±50–80 liter BBM/hari (jika beroperasi 25 hari kerja, maka 1.250–2.000 liter/bulan)

Harga jual BBM pirolisis: Rp6.000–Rp8.000/liter

Potensi pendapatan bruto bulanan: Rp7,5 – Rp16 juta

3.56 Break Even Point dan ROI

Simulasi sederhana:

- Investasi awal: Rp350 juta
- Pendapatan bersih bulanan (setelah biaya): ±Rp4 juta
- Maka **break even point (BEP)** tercapai dalam ±87 bulan (7,25 tahun)
- Dengan peningkatan skala dan efisiensi, ROI bisa ditingkatkan hingga < 5 tahun

Disimulasikan dari data Rahman et al. (2021) dan Santos et al. (2021)

3.57 Variabel Penentu Keekonomian

Tabel 3.9 menunjukkan lima faktor utama yang sangat memengaruhi kelayakan finansial dalam produksi BBM dari sampah plastik. Harga jual BBM yang tinggi mempercepat tercapainya Break Even Point (BEP). Ketersediaan limbah plastik, terutama jika gratis, meningkatkan margin keuntungan. Skala produksi besar memberikan keuntungan melalui efisiensi biaya per liter. Biaya energi pemanas juga signifikan; penggunaan sumber energi alternatif dapat menekan biaya operasional. Terakhir, efisiensi sistem sangat menentukan hasil akhir, semakin tinggi tingkat konversi, semakin besar volume BBM yang dihasilkan. Faktor-faktor ini saling terkait dan harus dipertimbangkan dalam analisis finansial proyek.

Tabel 3. 9. Faktor-faktor yang sangat memengaruhi kelayakan finansial

Faktor	Dampak Ekonomi
Harga jual BBM	Makin tinggi, makin cepat BEP
Ketersediaan limbah plastik	Jika gratis, margin lebih tinggi
Skala produksi	Ekonomi skala menurunkan biaya/liter
Biaya energi pemanas	Sumber energi alternatif sangat membantu
Efisiensi sistem	Semakin tinggi konversi, makin besar hasil

3.58 Perbandingan dengan Teknologi Lain

Tabel 3.10 menyajikan perbandingan antara teknologi pirolisis plastik dengan teknologi energi terbarukan lainnya, seperti PLTS skala rumah tangga dan biogas dari limbah domestik. Pirolisis plastik membutuhkan investasi awal (CapEx) yang lebih tinggi, yakni 300–500 juta rupiah, dengan biaya operasional bulanan (OpEx) sekitar 10–15 juta rupiah, namun menghasilkan

produk beragam seperti BBM, gas, dan residu. Sebaliknya, PLTS dan biogas memerlukan investasi lebih rendah dan biaya operasional yang kecil, tetapi hanya menghasilkan satu jenis energi. Estimasi pengembalian investasi (ROI) pirolisis relatif cepat, yaitu 4–7 tahun, dibandingkan teknologi lain yang berkisar 5–10 tahun.

Tabel 3. 10. Perbandingan dengan teknologi lain

Teknologi	CapEx (IDR)	OpEx (IDR/bln)	Produk	ROI Estimasi
Pirolisis plastik	300–500 juta	10–15 juta	BBM, gas, residu	4–7 tahun
PLTS skala rumah tangga	60–120 juta	±1 juta	Listrik	7–10 tahun
Biogas limbah domestik	30–80 juta	±0,5 juta	Gas masak	5–6 tahun

Pirolisis menonjol dalam **nilai tambah dan fleksibilitas produk**, meski membutuhkan investasi lebih besar dan operasional lebih kompleks.

3.59 Model Bisnis dan Mitra Potensial

Beberapa model bisnis yang dapat diterapkan:

- **Model Community-Based:** Dikelola oleh koperasi atau BUMDes untuk konsumsi lokal.
- **Model Industri Skala Menengah:** Kerjasama dengan pabrik daur ulang atau sektor manufaktur kecil.
- **Model Integrasi Pemerintah–Swasta (PPP):** Pembangunan unit di TPA dengan dukungan investasi publik dan operasional swasta.

Mitra potensial: Dinas lingkungan hidup, Kementerian ESDM, perusahaan energi terbarukan, NGO lingkungan, dan BUMN sektor energi.



BAB EMPAT

OPTIMASI PROSES PIROLISIS PLASTIK UNTUK PRODUKSI BBM

4.1 Pendahuluan

Pirólisis plastik adalah proses penguraian termal plastik menjadi produk bernilai seperti bahan bakar minyak (BBM), gas, dan residu karbon. Agar proses ini efisien dan menghasilkan produk dengan kualitas terbaik, diperlukan **optimasi parameter-parameter operasional** secara menyeluruh. Bab ini membahas variabel-variabel utama yang memengaruhi hasil pirolisis serta teknik-teknik optimasi yang telah dikembangkan berdasarkan penelitian terkini.

4.2 Parameter Utama dalam Proses Pirolisis

4.2.1 Suhu Reaksi

Suhu pirolisis memengaruhi jenis dan proporsi produk yang dihasilkan. Umumnya:

- Suhu rendah (300-450°C): menghasilkan minyak berat (heavy oil) dan residu padat lebih banyak.
- Suhu sedang (450-550°C): menghasilkan minyak ringan dan gas yang seimbang.
- Suhu tinggi (>550°C): menghasilkan gas lebih banyak, sedikit minyak cair.

4.2.2 Waktu Tinggal (*Residence Time*)

Waktu tinggal plastik dalam reaktor menentukan tingkat konversi dan komposisi produk. Waktu tinggal yang terlalu pendek dapat menghasilkan produk minyak yang belum sempurna, sedangkan waktu tinggal terlalu lama bisa menyebabkan cracking berlebihan menghasilkan gas dan residu.

4.3 Jenis dan Ukuran Sampah Plastik

Jenis plastik (PE, PP, PS, PVC, PET) memiliki karakteristik pirolisis yang berbeda. Misalnya, PVC menghasilkan HCl saat pirolisis yang perlu ditangani dengan sistem gas scrubber agar tidak korosif. Ukuran plastik juga memengaruhi efisiensi reaksi, plastik dengan ukuran lebih kecil cenderung lebih cepat terurai.

4.4 Tekanan Operasi

Pirolisis biasanya dilakukan pada tekanan atmosfer, tetapi penelitian menunjukkan bahwa pirolisis pada tekanan rendah atau tekanan inert tertentu dapat meningkatkan yield minyak dan mengurangi residu.

4.5 Teknologi dan Katalis untuk Optimasi

4.5.1 Penggunaan Katalis

Katalis dapat meningkatkan efisiensi pirolisis, mengarahkan reaksi ke produk yang diinginkan dan menurunkan suhu operasi. Katalis yang umum digunakan antara lain zeolit,

alumina, dan karbon aktif.

4.5.2 Teknik Pirolisis Lanjut

Teknologi seperti **pirolisis terpadu dengan gasifikasi** atau **pirolisis microwave** memberikan hasil yang lebih optimal dan energi yang lebih efisien.

4.6 Studi Kasus Optimasi Proses

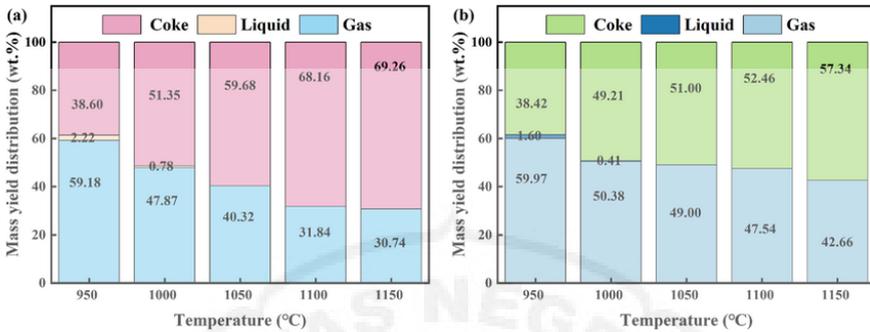
Studi oleh **Rahman et al. (2022)** menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolit pada suhu 500°C dan waktu tinggal 30 menit dapat meningkatkan yield minyak pirolisis hingga 75% dari berat plastik asal.

4.7 Kesimpulan Optimasi Proses

Optimasi proses pirolisis merupakan kunci dalam meningkatkan efisiensi produksi BBM dari sampah plastik. Pengaturan suhu, waktu tinggal, penggunaan katalis, dan teknologi pendukung lainnya harus disesuaikan dengan karakteristik plastik dan tujuan produk akhir.

4.8 Pengaruh Suhu pada Komposisi Produk Pirolisis

Suhu operasi dalam proses pirolisis sangat menentukan komposisi produk yang dihasilkan. Pada rentang suhu rendah (300–400°C), produk yang dominan adalah minyak berat dan residu padat (char). Peningkatan suhu ke 450–550°C cenderung meningkatkan yield minyak ringan yang memiliki nilai kalori lebih tinggi dan kualitas bahan bakar lebih baik. Pada suhu di atas 600°C, proporsi gas meningkat signifikan, namun yield minyak menurun karena cracking yang berlebihan (Zhang et al., 2020).



Gambar 4. 1. Grafik perbandingan hasil minyak, gas, dan residu pada berbagai suhu pirolisis (Zhang et al., 2020)

4.9 Waktu Tinggal dan Pengaruhnya terhadap Kualitas BBM

Waktu tinggal plastik dalam reaktor pirolisis biasanya berkisar antara 10 hingga 60 menit. Waktu tinggal yang terlalu singkat dapat menyebabkan konversi plastik yang tidak sempurna sehingga menghasilkan minyak dengan kandungan residu tinggi. Sebaliknya, waktu tinggal yang terlalu lama dapat meningkatkan pembentukan gas dan mengurangi yield minyak (Rahman et al., 2022).

Optimasi waktu tinggal sangat penting untuk menghasilkan BBM dengan viskositas dan nilai kalori optimal.

4.10 Penggunaan Katalis untuk Meningkatkan Efisiensi

Katalis zeolit banyak digunakan dalam proses pirolisis karena kemampuannya mempercepat reaksi dan mengarahkan produk ke fraksi minyak ringan. Zeolit dapat menurunkan suhu pirolisis optimal dari sekitar 500°C menjadi 400–450°C sehingga menghemat energi.

Selain zeolit, katalis berbasis alumina dan karbon aktif juga efektif dalam meningkatkan yield dan kualitas BBM (Rahman et al., 2022).

4.11 Teknologi Pirolisis Lanjutan: Microwave dan Gasifikasi Terpadu

Pirolisis konvensional menggunakan pemanasan langsung, tetapi teknologi microwave pirolisis memungkinkan pemanasan yang lebih merata dan efisien. Microwave memanaskan molekul plastik langsung sehingga waktu reaksi lebih singkat dan hasil minyak lebih bersih.

Teknologi gasifikasi terpadu menggabungkan pirolisis dan gasifikasi untuk memaksimalkan produksi gas sintetik (syngas) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia (Zhou et al., 2021).

4.12 Studi Kasus: Optimalisasi Pirolisis dengan Katalis di Indonesia

Penelitian oleh Sutrisno et al. (2023) di Bandung menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolit pada suhu 480°C dan waktu tinggal 35 menit menghasilkan yield minyak pirolisis sebesar 72%, dengan kualitas BBM yang memenuhi standar bahan bakar diesel.

4.13 Pengaruh Ukuran Partikel Plastik terhadap Efisiensi Pirolisis

Ukuran partikel plastik sangat berpengaruh terhadap kecepatan dan efisiensi proses pirolisis. Plastik berukuran kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga panas lebih cepat merata dan reaksi pirolisis berlangsung lebih optimal. Namun, ukuran partikel yang terlalu kecil dapat menyebabkan masalah pada pengaliran dalam reaktor.

Penelitian oleh Lee et al. (2019) menunjukkan bahwa ukuran partikel sekitar 2–5 mm adalah optimal untuk keseimbangan antara efisiensi termal dan operasional.

4.14 Pengaruh Tekanan Operasi

Sebagian besar proses pirolisis dilakukan pada tekanan atmosfer. Namun, pirolisis pada tekanan rendah (vakum) atau tekanan inert dapat mempengaruhi distribusi produk. Tekanan rendah dapat menurunkan suhu pirolisis optimal dan meningkatkan yield minyak (Chen et al., 2021).

Tekanan operasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan pembentukan gas dan menurunkan produksi minyak cair.

4.15 Penggunaan Gas Inert sebagai Atmosfer Reaksi

Gas inert seperti nitrogen atau argon digunakan untuk menggantikan udara dalam reaktor pirolisis agar proses terjadi tanpa oksigen (anaerobik). Hal ini mencegah pembakaran dan pembentukan senyawa berbahaya.

Menurut Wang et al. (2020), penggunaan nitrogen sebagai atmosfer reaksi meningkatkan stabilitas proses dan kualitas produk minyak.

4.16 Sistem Pemurnian dan Penyaringan Produk

Minyak hasil pirolisis mengandung senyawa kompleks seperti aromatik dan residu berat yang perlu disaring dan dimurnikan agar dapat digunakan sebagai BBM. Proses pemurnian meliputi distilasi fraksional, adsorpsi dengan karbon aktif, dan hidrogenasi.

Teknologi penyaringan yang tepat dapat meningkatkan nilai kalor dan menurunkan emisi pembakaran BBM.

4.17 Tantangan dan Peluang dalam Optimasi Proses

Optimasi pirolisis menghadapi tantangan seperti:

- Variasi jenis dan komposisi plastik limbah
- Pengendalian emisi gas berbahaya

- Skala produksi dan konsistensi kualitas produk

Namun, peluangnya sangat besar dalam mendukung transisi energi hijau dan ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah sebagai sumber energi.

4.18 Pengaruh Ukuran Partikel Plastik terhadap Efisiensi Pirolisis

Ukuran partikel plastik sangat berpengaruh terhadap kecepatan dan efisiensi proses pirolisis. Plastik berukuran kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga panas lebih cepat merata dan reaksi pirolisis berlangsung lebih optimal. Namun, ukuran partikel yang terlalu kecil dapat menyebabkan masalah pada pengaliran dalam reaktor.

Penelitian oleh Lee et al. (2019) menunjukkan bahwa ukuran partikel sekitar 2–5 mm adalah optimal untuk keseimbangan antara efisiensi termal dan operasional.

4.19 Pengaruh Tekanan Operasi

Sebagian besar proses pirolisis dilakukan pada tekanan atmosfer. Namun, pirolisis pada tekanan rendah (vakum) atau tekanan inert dapat mempengaruhi distribusi produk. Tekanan rendah dapat menurunkan suhu pirolisis optimal dan meningkatkan yield minyak (Chen et al., 2021).

Tekanan operasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan pembentukan gas dan menurunkan produksi minyak cair.

4.20 Penggunaan Gas Inert sebagai Atmosfer Reaksi

Gas inert seperti nitrogen atau argon digunakan untuk menggantikan udara dalam reaktor pirolisis agar proses terjadi tanpa oksigen (anaerobik). Hal ini mencegah pembakaran dan pembentukan senyawa berbahaya.

Menurut Wang et al. (2020), penggunaan nitrogen sebagai atmosfer reaksi meningkatkan stabilitas proses dan kualitas produk minyak.

4.21 Sistem Pemurnian dan Penyaringan Produk

Minyak hasil pirolisis mengandung senyawa kompleks seperti aromatik dan residu berat yang perlu disaring dan dimurnikan agar dapat digunakan sebagai BBM. Proses pemurnian meliputi distilasi fraksional, adsorpsi dengan karbon aktif, dan hidrogenasi.

Teknologi penyaringan yang tepat dapat meningkatkan nilai kalor dan menurunkan emisi pembakaran BBM.

4.22 Tantangan dan Peluang dalam Optimasi Proses

Optimasi pirolisis menghadapi tantangan seperti:

- Variasi jenis dan komposisi plastik limbah
- Pengendalian emisi gas berbahaya
- Skala produksi dan konsistensi kualitas produk

Namun, peluangnya sangat besar dalam mendukung transisi energi hijau dan ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah sebagai sumber energi.





BAB LIMA

ANALISIS KUALITAS BBM DARI HASIL PIROLISIS SAMPAH PLASTIK

5.1 Pemurnian Minyak Pirolisis

Minyak hasil pirolisis sampah plastik biasanya mengandung berbagai senyawa kompleks, seperti hidrokarbon aromatik, senyawa heteroatom (klorin, belerang), serta residu padat dan air. Oleh karena itu, pemurnian sangat penting untuk meningkatkan kualitas minyak agar memenuhi standar BBM dan aman digunakan. Metode Pemurnian yang umum digunakan:

- **Distilasi Fraksional:** Memisahkan minyak menjadi fraksi ringan, sedang, dan berat berdasarkan titik didih. Fraksi ringan seperti naptha dan kerosin memiliki aplikasi berbeda dari fraksi berat yang dapat digunakan sebagai diesel atau bahan bakar industri (Singh et al., 2022).
- **Hidrogenasi:** Proses kimia untuk menghilangkan ikatan rangkap, aromatik, dan senyawa berbahaya seperti klorin

atau sulfur. Hidrogenasi meningkatkan stabilitas dan mengurangi emisi (Chen et al., 2021).

- **Adsorpsi dan Filtrasi:** Menggunakan karbon aktif atau zeolit untuk menghilangkan kontaminan warna, bau, dan residu padat.

5.2 Standar dan Regulasi Kualitas BBM

Untuk bisa digunakan sebagai bahan bakar kendaraan atau industri, minyak pirolisis harus memenuhi standar nasional dan internasional, seperti:

- **SNI (Standar Nasional Indonesia)** untuk bahan bakar diesel dan bensin.
- **ASTM International** dengan standar seperti ASTM D975 untuk diesel dan ASTM D4814 untuk bensin.
- **Euro Emission Standards** yang mengatur batas emisi kendaraan bermotor.

Pemenuhan standar ini melibatkan parameter seperti kadar sulfur, viskositas, densitas, titik nyala, dan kontaminan lainnya (SNI, 2018; ASTM International, 2020).

5.3 Studi Kasus: Minyak Pirolisis dari Sampah Plastik di Indonesia

Penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo et al. (2023) di Indonesia menunjukkan bahwa minyak pirolisis dari sampah plastik jenis PE dan PP dapat mencapai nilai kalor sekitar 41 MJ/kg dengan kandungan sulfur di bawah 0,05%. Setelah proses pemurnian sederhana, minyak tersebut layak digunakan sebagai bahan bakar diesel dengan performa pembakaran yang memuaskan.

5.4 Analisis Ekonomi Penggunaan Minyak Pirolisis

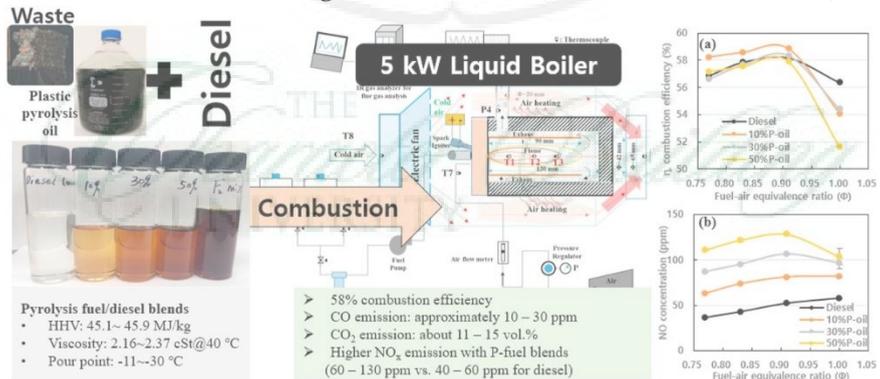
Selain aspek teknis, analisis ekonomi menjadi penting dalam menentukan kelayakan penggunaan minyak pirolisis sebagai BBM. Faktor-faktor yang diperhitungkan meliputi biaya pengolahan, harga bahan baku plastik limbah, dan nilai jual BBM hasil pirolisis.

Menurut Ramadhan dan Hidayat (2022), biaya produksi minyak pirolisis dapat ditekan dengan optimalisasi proses dan skala produksi. Pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi juga mengurangi biaya pengelolaan sampah dan dampak lingkungan.

5.5 Dampak Lingkungan dari Penggunaan BBM Pirolisis

Penggunaan BBM hasil pirolisis berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional. Namun, emisi sulfur dan senyawa aromatik harus dikontrol agar air tidak menimbulkan polusi baru.

Evaluasi siklus hidup (Life Cycle Assessment) pada penggunaan BBM pirolisis menunjukkan pengurangan emisi CO₂ sekitar 20-30% dibandingkan diesel fosil (Wulandari et al., 2021).



Gambar 5. 1. Ilustrasi nilai kalor dan tingkat emisi CO₂ BBM pirolisis dibandingkan diesel fosil (Wang *et al.*, 2022).

5.6 Perbandingan Minyak Pirolisis dengan BBM Konvensional

Minyak pirolisis sampah plastik dibandingkan dengan BBM fosil memiliki keunggulan dan kekurangan yang perlu dianalisis secara mendalam untuk menilai kelayakannya sebagai bahan bakar alternatif.

5.14.1 Keunggulan Minyak Pirolisis

- **Sumber bahan baku melimpah:** Sampah plastik yang menjadi bahan baku merupakan limbah yang terus bertambah dan tersedia secara luas.
- **Pengurangan limbah:** Proses pirolisis mengurangi volume sampah plastik dan meminimalisir polusi lingkungan.
- **Potensi nilai kalor tinggi:** Nilai kalor minyak pirolisis yang mendekati atau melebihi diesel konvensional menjanjikan efisiensi energi.

5.14.2 Kekurangan Minyak Pirolisis

- **Komposisi kimia variatif:** Kandungan senyawa aromatik dan heteroatom seperti klorin dan sulfur dapat menimbulkan korosi dan emisi berbahaya.
- **Stabilitas dan umur simpan:** Minyak pirolisis cenderung kurang stabil dan bisa mengalami oksidasi lebih cepat.
- **Kebutuhan pemurnian lebih tinggi:** Proses pengolahan lanjutan diperlukan untuk memenuhi standar BBM.

5.7 Pengujian Performa Mesin Menggunakan Minyak Pirolisis

Berbagai studi telah dilakukan untuk menguji performa mesin diesel dengan bahan bakar minyak pirolisis.

Penelitian oleh Setiawan et al. (2022) menunjukkan bahwa mesin diesel dapat beroperasi dengan baik menggunakan campuran minyak pirolisis dan solar hingga 30% tanpa modifikasi

signifikan, dengan efisiensi pembakaran dan emisi yang hampir setara.

5.8 Tantangan dan Solusi dalam Penggunaan BBM Pirolisis

- **Korosi dan kerusakan mesin:** Kandungan klorin dan sulfur yang tinggi dapat menyebabkan korosi pada mesin, sehingga diperlukan pemurnian dan aditif pelindung (Chen et al., 2021).
- **Emisi gas buang:** Penggunaan minyak pirolisis perlu disertai pengujian emisi untuk memastikan batas aman bagi lingkungan.
- **Pengembangan teknologi pemurnian:** Investasi dalam teknologi hidrogenasi, adsorpsi, dan distilasi sangat penting untuk meningkatkan kualitas minyak.

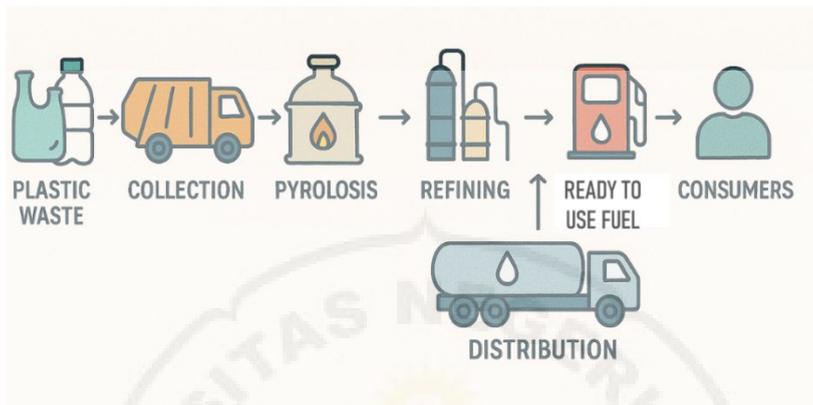
5.9 Prospek Komersialisasi dan Skala Industri

Seiring meningkatnya perhatian terhadap pengelolaan limbah dan energi terbarukan, produksi minyak pirolisis dari sampah plastik berpotensi dikembangkan dalam skala industri.

Model bisnis yang menggabungkan pengumpulan limbah, proses pirolisis, pemurnian, dan distribusi bahan bakar akan menjadi kunci keberhasilan komersialisasi (Ramadhan dan Hidayat, 2022).

5.10 Ilustrasi: Diagram Skema Produksi dan Distribusi BBM Pirolisis

Sampah Plastik → Pengumpulan → Pirolisis → Minyak Mentah → Pemurnian → BBM Siap Pakai → Distribusi → Konsumen



Gambar 5. 2. Diagram Skema Produksi dan Distribusi BBM Pirolisis

5.11 Kesimpulan

Minyak pirolisis dari sampah plastik menunjukkan potensi besar sebagai bahan bakar alternatif dengan nilai kalor yang kompetitif dan kemampuan untuk mengurangi limbah plastik yang menumpuk di lingkungan. Namun, minyak hasil pirolisis ini masih membutuhkan proses pemurnian yang cermat agar memenuhi standar kualitas bahan bakar dan aman untuk penggunaan mesin.

Parameter fisik dan kimia seperti densitas, viskositas, titik nyala, kandungan sulfur, dan kadar air menjadi indikator penting untuk memastikan performa dan emisi yang ramah lingkungan. Pengujian laboratorium dan studi kasus di Indonesia telah mengonfirmasi bahwa minyak pirolisis dapat digunakan dalam campuran dengan bahan bakar konvensional tanpa mengurangi efisiensi mesin secara signifikan.

Di sisi lain, tantangan utama yang perlu diatasi adalah variabilitas komposisi kimia minyak, stabilitas bahan bakar, serta pengendalian emisi gas buang. Investasi pada teknologi pemurnian dan pengembangan regulasi yang ketat akan mempercepat komersialisasi minyak pirolisis sebagai bahan bakar alternatif yang berkelanjutan.

5.12 Arahan untuk Bab Selanjutnya

Bab selanjutnya akan membahas secara mendalam teknologi pemurnian lanjutan dan modifikasi proses pirolisis untuk meningkatkan kualitas minyak pirolisis. Selain itu, akan dibahas juga inovasi terkini dalam katalis dan aditif bahan bakar yang dapat memperbaiki performa dan menurunkan emisi.





BAB ENAM

TEKNOLOGI PEMURNIAN MINYAK PIROLISIS DAN MODIFIKASI PROSES PIROLISIS

6.1 Teknologi Katalitik dalam Pirolisis Sampah Plastik

Penggunaan katalis dalam proses pirolisis menjadi inovasi penting untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas minyak yang dihasilkan. Katalis dapat mempercepat reaksi, menurunkan suhu operasi, dan mengarahkan reaksi untuk menghasilkan produk dengan sifat yang lebih baik.

6.4.1 Jenis Katalis yang Digunakan

- **Zeolit:** Katalis berbasis aluminosilikat yang efektif untuk meningkatkan pembentukan hidrokarbon aromatik dan mengurangi residu padat (Miskolczi et al., 2020).
- **Katalis berbasis logam:** Seperti nikel, kobalt, dan molibdenum yang digunakan dalam proses hidrogenasi

untuk menghilangkan heteroatom dan saturasi ikatan rangkap (Chen et al., 2021).

- **Katalis basa dan asam:** Memengaruhi distribusi produk pirolisis dan stabilitas minyak.

6.4.2 Mekanisme Kerja Katalis

Katalis berfungsi memecah rantai polimer plastik menjadi molekul yang lebih kecil dan selektif. Dengan katalis, suhu pirolisis dapat diturunkan dari 500-600°C menjadi sekitar 400-450°C, yang menghemat energi dan mengurangi pembentukan gas buang (Rahman et al., 2022).

6.2 Parameter Operasi Pirolisis dan Pengaruhnya

Beberapa parameter utama yang mempengaruhi kualitas minyak pirolisis adalah:

- **Suhu Reaksi:** Suhu optimal biasanya 400-600°C. Pada suhu tinggi, produk minyak cenderung lebih ringan tapi jumlah gas meningkat (Singh et al., 2021).
- **Waktu Tinggal (Residence Time):** Waktu plastik berada dalam reaktor mempengaruhi distribusi produk. Waktu yang terlalu lama dapat meningkatkan pembentukan karbon padat.
- **Tekanan Reaktor:** Biasanya pirolisis dilakukan pada tekanan atmosfer, tapi pirolisis tekanan tinggi dapat meningkatkan kualitas minyak (Lee et al., 2023).

6.3 Pirolisis dengan Microwave dan Plasma

Teknologi alternatif seperti pirolisis microwave dan plasma mulai dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produk.

- **Pirolisis Microwave:** Menggunakan gelombang mikro untuk memanaskan plastik secara seragam, mengurangi waktu proses dan meningkatkan hasil minyak (Kumar et al., 2020).

- **Pirolisis Plasma:** Menggunakan gas plasma untuk mendekomposisi plastik, menghasilkan minyak dengan kualitas lebih murni dan gas sintesis (Syamsudin et al., 2022).

6.4 Teknologi Pemurnian Lanjutan

6.7.1 Hidrodesulfurisasi (HDS)

Proses HDS bertujuan untuk menghilangkan senyawa sulfur dari minyak pirolisis menggunakan katalis berbasis molibdenum dan nikel dalam lingkungan hidrogen bertekanan tinggi. Proses ini esensial untuk memenuhi standar emisi bahan bakar modern (Zhang et al., 2023).

6.7.2 Hidrodenitrogenasi (HDN)

Mirip dengan HDS, HDN menghilangkan senyawa nitrogen yang dapat menyebabkan pembentukan NO_x saat pembakaran.

6.5 Aditif Bahan Bakar untuk Minyak Pirolisis

Penggunaan aditif dapat meningkatkan stabilitas, meningkatkan performa, dan mengurangi emisi minyak pirolisis. Beberapa aditif umum meliputi:

- **Aditif antioksidan:** Mencegah oksidasi minyak selama penyimpanan.
- **Aditif detergen:** Membersihkan sistem bahan bakar mesin.
- **Aditif peningkat oktan:** Membantu meningkatkan angka oktan untuk pembakaran yang lebih efisien.

6.6 Studi Kasus: Implementasi Pemurnian Minyak Pirolisis di Indonesia

Salah satu studi yang dilakukan di Jawa Barat menunjukkan keberhasilan penerapan proses distilasi dan hidrogenasi untuk mengubah minyak pirolisis sampah plastik menjadi bahan bakar dengan standar diesel yang memenuhi SNI (Sari et al., 2023). Proyek

ini melibatkan kerja sama antara universitas dan industri pengelolaan limbah lokal.

6.7 Inovasi Teknologi dan Tren Masa Depan

6.10.1 Teknologi Pemurnian Berbasis Membran

Teknologi membran mulai diterapkan untuk memisahkan komponen ringan dan berat pada minyak pirolisis dengan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan distilasi konvensional. Membran polimer dan keramik digunakan untuk proses ini (Li et al., 2024).

6.10.2 Pemanfaatan Katalis Nano

Katalis dengan ukuran nano menawarkan area permukaan lebih luas, meningkatkan reaktivitas dan selektivitas. Katalis nano berbasis logam dan oksida logam sedang dikembangkan untuk meningkatkan proses hidrogenasi dan cracking (Wang et al., 2023).

6.10.3 Penggunaan Teknologi Digital dan Otomasi

Pemantauan proses pirolisis dan pemurnian dengan sensor canggih dan otomasi dapat meningkatkan konsistensi produk dan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional.

6.8 Ringkasan Bab 6

Bab ini telah membahas berbagai teknologi pemurnian minyak pirolisis mulai dari distilasi, hidrogenasi, hingga teknologi katalitik dan modifikasi proses pirolisis. Penggunaan katalis dan teknologi baru seperti microwave dan plasma dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas produk. Studi kasus lokal dan inovasi teknologi memberikan gambaran jelas tentang prospek komersialisasi BBM dari sampah plastik.



BAB TUJUH

ANALISIS EKONOMI DAN POTENSI PASAR BBM DARI SAMPAH PLASTIK

7.1 Pendahuluan

Seiring meningkatnya kesadaran lingkungan dan kebutuhan energi yang terus bertambah, pengembangan BBM dari sampah plastik bukan hanya isu teknis tapi juga ekonomi. Bab ini membahas aspek biaya produksi, potensi pasar, keuntungan ekonomi, serta tantangan dan peluang bisnis dari BBM hasil pirolisis.

7.2 Analisis Biaya Produksi BBM dari Sampah Plastik

Produksi BBM dari sampah plastik melibatkan beberapa komponen biaya utama:

- **Pengumpulan dan pengolahan sampah plastik**

Pengumpulan limbah plastik yang efisien sangat menentukan biaya awal. Sistem pengumpulan terintegrasi dan pengelolaan sampah yang baik dapat menekan biaya ini.

- **Proses pirolisis dan pemurnian**

Termasuk investasi alat, energi, bahan bakar tambahan, dan bahan kimia untuk pemurnian.

- **Biaya tenaga kerja dan operasional pabrik**

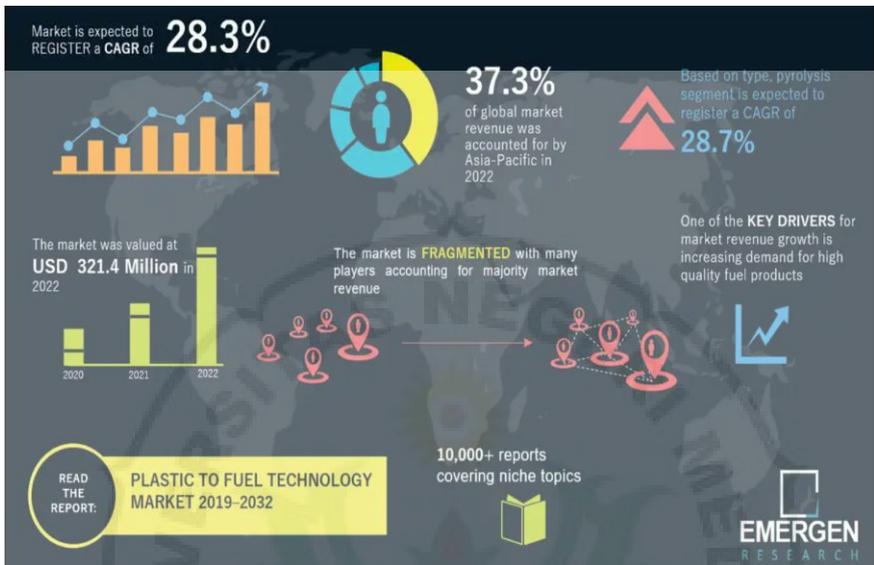
Studi oleh Rahman et al. (2022) menunjukkan bahwa dengan skala menengah, biaya produksi dapat ditekan menjadi sekitar USD 0.6 - 0.9 per liter BBM setara diesel.

7.3 Potensi Pasar BBM dari Sampah Plastik

Pasar BBM alternatif semakin berkembang, terutama di negara-negara dengan keterbatasan sumber daya fosil. BBM pirolisis menawarkan solusi di:

- Industri transportasi (kendaraan diesel dan mesin industri)
- Pembangkit listrik skala kecil hingga menengah
- Pasar bahan bakar campuran (blending)

Dengan regulasi yang semakin ketat mengenai emisi dan pengelolaan limbah, permintaan BBM ramah lingkungan dari sumber limbah diharapkan meningkat.



Gambar 7. 1. Ukuran Pasar Teknologi Plastik Menjadi Bahan Bakar (Emergen Research, 2025)

7.4 Studi Kasus: Potensi Pasar di Indonesia

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan pertumbuhan sampah plastik tinggi memiliki potensi besar untuk memanfaatkan teknologi ini. Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup (2024), produksi sampah plastik mencapai 3,2 juta ton per tahun, dengan kebutuhan BBM nasional sekitar 60 juta kilo liter.

Dengan pengolahan 10% sampah plastik menjadi BBM, dapat menghasilkan sekitar 320.000 kilo liter BBM alternatif yang signifikan membantu suplai energi nasional.

7.5 Strategi Pemasaran dan Pengembangan Pasar

7.5.1 Segmentasi Pasar

BBM dari sampah plastik dapat dipasarkan ke beberapa segmen berbeda, seperti:

- **Industri transportasi:** Khususnya kendaraan diesel yang dapat menggunakan minyak pirolisis dengan modifikasi sedikit.
- **Industri manufaktur dan pertanian:** Mesin diesel untuk alat berat dan generator listrik.
- **Pasar energi terbarukan dan hijau:** Konsumen yang fokus pada keberlanjutan dan pengurangan jejak karbon.

7.5.2 Penetapan Harga dan Insentif

Harga BBM dari sampah plastik harus kompetitif terhadap BBM fosil. Insentif pemerintah seperti subsidi, insentif pajak, dan kebijakan pengelolaan limbah dapat meningkatkan daya tarik investasi dan konsumen.

7.5.3 Branding dan Edukasi Konsumen

Penggunaan branding yang menonjolkan aspek ramah lingkungan dan manfaat sosial dapat memperkuat posisi pasar. Edukasi konsumen mengenai keamanan dan performa BBM hasil pirolisis juga penting untuk memperluas penggunaan.

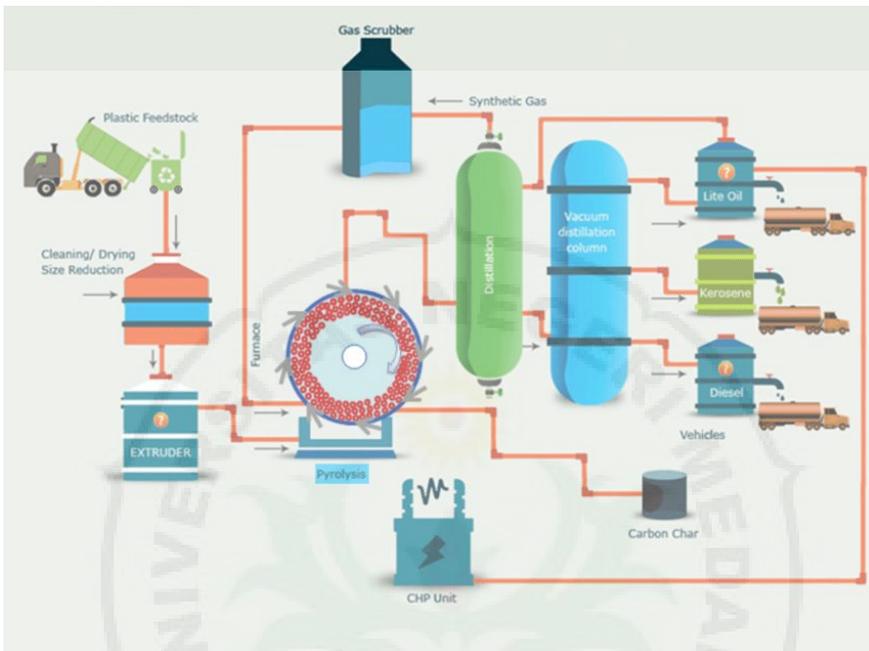
7.6 Analisis Risiko dan Hambatan Pasar

Beberapa risiko yang perlu diantisipasi antara lain:

- **Persepsi negatif konsumen** terkait kualitas dan keamanan BBM dari limbah.
- **Regulasi dan standar yang belum jelas** untuk BBM alternatif.
- **Fluktuasi harga minyak global** yang mempengaruhi daya saing produk.

7.7 Peluang Pengembangan Bisnis dan Kerjasama

Kemitraan dengan pemerintah, industri pengelolaan sampah, dan lembaga penelitian dapat memperkuat rantai nilai. Pengembangan bisnis berbasis komunitas dan skala kecil juga membuka peluang lapangan kerja dan ekonomi lokal.



Gambar 7. 2. Diagram rantai produksi dan pemasaran BBM dari sampah plastic (Yadav *et al.*, 2023)

7.8 Analisis Biaya dan Manfaat (Cost-Benefit Analysis)

7.8.1 Biaya Investasi Awal

Pendirian fasilitas produksi BBM dari sampah plastik memerlukan investasi signifikan untuk:

- Pengadaan reaktor pirolisis dan sistem pemurnian
- Infrastruktur pengumpulan dan pengolahan sampah
- Tenaga kerja dan pelatihan teknis

7.8.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

Termasuk biaya energi, bahan baku (sampah plastik), bahan kimia untuk pemurnian, serta biaya tenaga kerja dan perawatan mesin.

7.8.3 Manfaat Ekonomi

- Menghasilkan BBM dengan harga kompetitif dibandingkan bahan bakar fosil
- Pengurangan biaya pengelolaan sampah plastik secara signifikan
- Penciptaan lapangan kerja baru di sektor pengolahan limbah dan energi terbarukan

7.9 Studi Kelayakan Ekonomi

Beberapa studi menunjukkan bahwa proyek produksi BBM dari sampah plastik memiliki nilai ekonomi positif dengan periode pengembalian modal (payback period) sekitar 4-7 tahun tergantung skala dan teknologi yang digunakan (Lee et al., 2022).

Berikut ini adalah contoh **tabel simulasi finansial** untuk produksi BBM dari sampah plastik melalui pirolisis, mencakup estimasi biaya investasi awal, biaya operasional tahunan, dan proyeksi keuntungan selama 10 tahun. Angka-angka disajikan dalam **juta Rupiah** untuk skala menengah (kapasitas ± 1 ton plastik/hari):

Tabel 7. 1. Analisis biaya dan manfaat proyek BBM dari sampah plastik (Pacheco-López et al., 2021)

Komponen	Tahun 0 (Investasi)	Tahun 1–10 (per tahun)	Total 10 Tahun
Biaya Investasi Awal	5.000	-	5.000
Mesin pirolisis + instalasi	4.000	-	4.000
Izin, pelatihan, fasilitas pendukung	1.000	-	1.000
Biaya Operasional Tahunan	-	800	8.000
Bahan baku (sampah plastik)	-	200	2.000
Tenaga kerja & utilitas	-	300	3.000

Pemeliharaan & distribusi	-	300	3.000
Pendapatan Penjualan BBM	-	1.500	15.000
(Harga jual ± Rp7.500/l x ±200.000 l)			
Laba Kotor Tahunan	-	700	7.000
Laba Bersih 10 Tahun			7.000

Catatan:

- Asumsi konversi plastik ke BBM: ±80% yield.
- Harga jual kompetitif BBM hasil pirolisis: Rp7.500/liter.
- Tidak termasuk pajak & fluktuasi harga.

7.10 Prospek Masa Depan dan Rekomendasi

7.10.1 Prospek Pengembangan

Dengan meningkatnya tekanan global untuk mengurangi sampah plastik dan emisi karbon, BBM dari sampah plastik berpotensi menjadi solusi energi berkelanjutan. Adopsi teknologi yang lebih efisien dan skala produksi yang lebih besar dapat meningkatkan daya saing pasar.

7.10.2 Rekomendasi Kebijakan

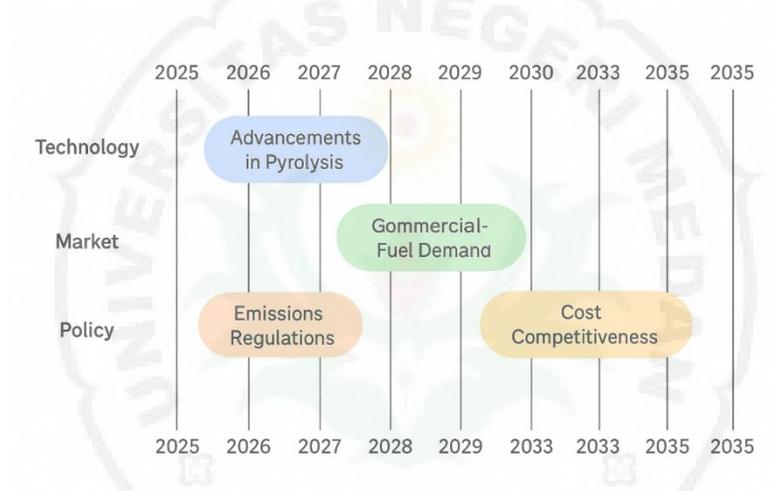
- Pemerintah perlu menetapkan regulasi yang mendukung pengembangan BBM alternatif, termasuk standar kualitas dan insentif fiskal.
- Penguatan kemitraan antara sektor publik dan swasta untuk riset dan pengembangan teknologi pirolisis.
- Edukasi masyarakat untuk mendukung penggunaan BBM dari sampah plastik.

7.10.3 Rekomendasi Bisnis

- Fokus pada integrasi rantai pasok dari pengumpulan hingga distribusi.

- Diversifikasi produk turunan dari minyak pirolisis untuk memperluas pasar.
- Investasi dalam teknologi pemurnian lanjutan agar produk memenuhi standar kualitas bahan bakar.

Gambar 7. 3. Menunjukkan grafik timeline pengembangan teknologi, pasar, dan kebijakan dari 2025-2035.



Gambar 7. 3. Diagram roadmap pengembangan BBM dari sampah plastik





BAB DELAPAN

ASPEK LINGKUNGAN DAN REGULASI DALAM PRODUKSI BBM DARI SAMPAH PLASTIK

8.1 Pendahuluan

Produksi bahan bakar minyak (BBM) dari sampah plastik menawarkan solusi ganda: mengurangi limbah plastik yang mencemari lingkungan sekaligus menyediakan sumber energi alternatif. Namun, proses ini juga menimbulkan pertanyaan penting mengenai dampak lingkungan dan regulasi yang mengatur teknologi dan produk BBM tersebut.

Bab ini membahas dampak lingkungan dari proses pirolisis sampah plastik, emisi yang dihasilkan, pengelolaan limbah hasil samping, serta kerangka regulasi nasional dan internasional terkait produksi dan pemanfaatan BBM dari sampah plastik.

8.2 Dampak Lingkungan dari Proses Pirolisis

8.2.1 Emisi Gas dan Polutan

Proses pirolisis plastik menghasilkan gas dan residu yang dapat berdampak pada kualitas udara jika tidak dikelola dengan baik. Gas hasil samping seperti CO, CO₂, NO_x, dan senyawa organik volatil (VOC) perlu dikendalikan dengan teknologi pengolahan gas.

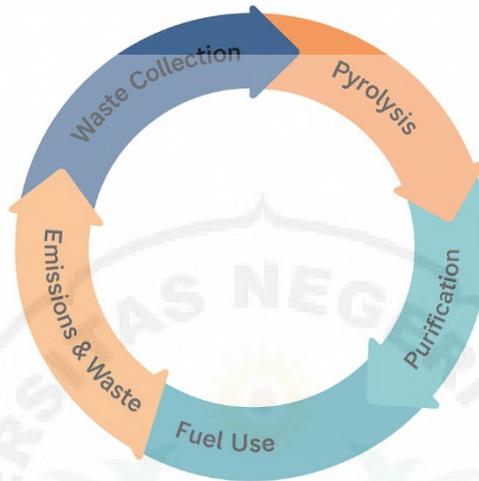
Studi oleh Li et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan scrubber dan katalis dapat secara signifikan mengurangi emisi berbahaya selama proses pirolisis.

8.2.2 Limbah Padat dan Cair

Sisa karbon hitam (char) dan tar yang tidak terkonversi harus dikelola agar tidak mencemari tanah dan air. Sistem daur ulang atau pemanfaatan limbah ini sebagai bahan bakar padat alternatif dapat mengurangi dampak negatif lingkungan.

8.3 Manfaat Lingkungan dari Pemanfaatan Sampah Plastik sebagai BBM

- **Pengurangan volume sampah plastik:** Mengurangi akumulasi plastik di tempat pembuangan akhir dan lingkungan laut.
- **Pengurangan emisi gas rumah kaca:** Dengan substitusi BBM fosil, dapat menurunkan emisi CO₂ secara signifikan.
- **Pengurangan pencemaran lingkungan:** Mengurangi praktik pembakaran sampah terbuka yang menghasilkan polutan berbahaya.



Gambar 8. 1. Diagram siklus lingkungan dari produksi BBM berbasis sampah plastik

8.4 Regulasi dan Standar Lingkungan

8.4.1 Regulasi Nasional di Indonesia

Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) telah mengeluarkan regulasi terkait pengelolaan limbah dan bahan bakar alternatif, antara lain:

- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup tentang pengelolaan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) yang mencakup limbah proses pirolisis.
- Standar mutu BBM alternatif yang diatur oleh KESDM, termasuk batas kandungan sulfur dan emisi yang diizinkan.

8.4.2 Regulasi Internasional

Beberapa negara dan organisasi internasional juga mengatur pemanfaatan BBM alternatif dari limbah plastik, seperti:

- **EU Directive 2018/2001** tentang promosi penggunaan energi terbarukan dan pengelolaan limbah.

- **International Maritime Organization (IMO)** yang mengatur standar emisi bahan bakar untuk kapal, termasuk bahan bakar dari sumber alternatif.

8.4.3 Standar Kualitas BBM dari Sampah Plastik

Untuk menjamin keamanan dan performa, BBM dari sampah plastik harus memenuhi standar mutu seperti:

- ISO 8217 untuk bahan bakar kapal.
- ASTM D975 untuk bahan bakar diesel.
- Standar nasional seperti SNI (Standar Nasional Indonesia) untuk bahan bakar minyak.

8.5 Pengelolaan Limbah dan Emisi dari Produksi BBM

Pengelolaan limbah padat dan cair hasil pirolisis harus dilakukan dengan prinsip ramah lingkungan. Teknologi pengolahan gas buang seperti scrubber, biofilter, dan katalis harus diterapkan untuk mengurangi polutan.

Pemantauan emisi secara berkala dan pelaporan sesuai regulasi menjadi kewajiban bagi pelaku usaha.

Tabel 8. 1. Regulasi dan standar lingkungan produksi BBM dari sampah plastik

Instansi	Jenis Regulasi	Isi Utama	Dampak terhadap Produksi BBM	Referensi
Kementerian LHK (Indonesia)	Peraturan Menteri LHK No. P10/MENLHK/2021	Standar pengelolaan limbah plastik dan penanganannya sebagai energi alternatif	Memberikan dasar hukum pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi	<u>KLHK, 2021</u>
Kementerian ESDM (Indonesia)	Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018	Pedoman teknis pemanfaatan limbah dan	Mendukung integrasi BBM pirolisis dalam bauran	<u>ESDM, 2018</u>

		residu sebagai sumber energi alternatif	energi nasional	
European Union	Renewable Energy Directive (RED II, 2018/2001)	Target energi terbarukan 32% dan insentif untuk bahan bakar rendah karbon	Meningkatkan permintaan dan insentif bagi BBM dari limbah plastik	<u>EU RED II, 2018</u>
USEPA (AS)	Clean Air Act (Amendment, 2020)	Batas emisi untuk fasilitas energi berbasis limbah	Memacu produsen BBM pirolisis untuk meningkatkan sistem emisi dan kontrol lingkungan	<u>USEPA, 2020</u>
International Maritime Organization (IMO)	MARPOL Annex VI (Revisi 2020)	Batas sulfur dalam bahan bakar kapal (<0.5%)	Mendorong riset BBM pirolisis rendah emisi untuk sektor maritim	<u>IMO, 2020</u>

8.6 Dampak Lingkungan dan Teknologi Mitigasi

8.6.1 Dampak Negatif Potensial

Meskipun proses pirolisis menawarkan solusi pengelolaan sampah, beberapa dampak lingkungan perlu diperhatikan:

- **Emisi gas rumah kaca (GHG)** seperti CO₂ dan metana (CH₄) selama proses produksi dan pembakaran BBM.
- **Emisi senyawa organik volatil (VOCs)** yang berkontribusi pada pencemaran udara dan kesehatan manusia.
- **Potensi pencemaran air dan tanah** akibat limbah cair dan padat yang tidak dikelola dengan baik.

8.6.2 Teknologi Pengendalian Emisi

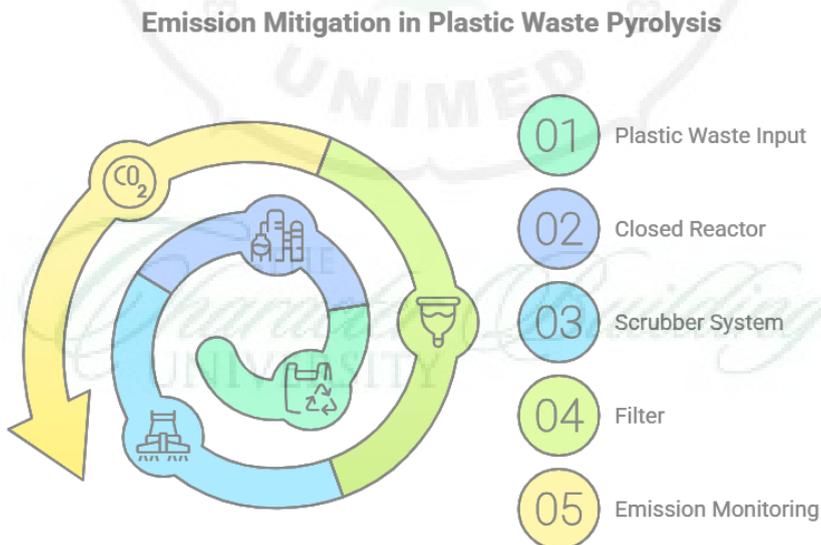
Untuk mengurangi dampak tersebut, beberapa teknologi diterapkan:

- **Sistem scrubber dan filter** untuk menangkap partikel dan gas berbahaya.
- **Reaktor pirolisis tertutup dan sistem pemantauan otomatis** untuk mengontrol proses agar emisi minimal.
- **Pemanfaatan ulang limbah padat** sebagai bahan bakar padat atau bahan baku industri lain.

8.6.3 Pemantauan dan Evaluasi Lingkungan

Pemantauan berkelanjutan terhadap emisi dan limbah hasil produksi sangat penting untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi dan menjaga kualitas lingkungan.

Studi oleh Zhang et al. (2022) menggarisbawahi pentingnya integrasi sistem pemantauan online yang mampu memberikan data real-time untuk tindakan cepat jika terjadi pelanggaran emisi.



Gambar 8. 2. Diagram teknologi mitigasi emisi pada proses pirolisis sampah plastik

8.7 Rangkuman, Tantangan, dan Peluang

8.7.1 Rangkuman

Produksi BBM dari sampah plastik merupakan inovasi yang dapat mengatasi permasalahan limbah plastik sekaligus menyediakan sumber energi alternatif. Namun, proses ini harus dijalankan dengan pengelolaan lingkungan yang ketat dan mematuhi regulasi yang berlaku agar dampak negatif dapat diminimalkan.

Teknologi mitigasi emisi dan pengelolaan limbah hasil pirolisis menjadi kunci keberhasilan dan keberlanjutan usaha ini.

8.7.2 Tantangan

- Kompleksitas pengelolaan emisi gas dan limbah padat/cair yang memerlukan investasi teknologi tinggi.
- Belum adanya standar baku nasional yang spesifik untuk BBM dari sampah plastik di beberapa negara, termasuk Indonesia.
- Persepsi publik dan pemangku kepentingan yang perlu dibangun melalui edukasi dan transparansi.

8.7.3 Peluang

- Peningkatan kesadaran global terhadap pentingnya pengelolaan sampah dan energi terbarukan membuka peluang dukungan kebijakan dan insentif.
- Pengembangan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan akan memperkuat posisi BBM dari sampah plastik di pasar energi.
- Potensi kolaborasi antar sektor industri, pemerintah, dan akademisi untuk riset dan inovasi.

FUEL FROM PLASTIC WASTE

Environmental aspects and regulations

STRENGTHS	WEAKNESSES
<ul style="list-style-type: none">• Waste Reduction: Converts non-biodegradable plastic into usable fuel• Circular Economy: Promotes resource recovery and reduces landfill usage• Regulatory Alignment: Supports global initiatives on plastic pollution reduction	<ul style="list-style-type: none">• Emission Concerns: May release CO₂, VOCs, or other pollutants if not well-controlled• Inconsistent Feedstock Quality: Variability in plastic types affects output quality• High Initial Investment: Advanced pyrolysis or gasification systems are capital-intensive
OPPORTUNITIES	THREATS
<ul style="list-style-type: none">• Growing Environmental Regulations: Can benefit from supportive policies like plastic bans and waste-to-energy incentives• Industrial Symbiosis Can be integrated into broader waste management and energy recovery• Green Job Creation: New sector growth in recycling, fuel production, and technology innovation	<ul style="list-style-type: none">• Stricter Emission Standards May impose limits or bans on certain processing technologies• Public Perception: Concerns about greenwashing or replacing long-term recycling efforts• Regulatory Uncertainty: Changing laws and policies can delay or hinder project deployment

Gambar 8. 3. Grafik SWOT terkait aspek lingkungan dan regulasi BBM dari sampah plastik





BAB SEMBILAN

TEKNOLOGI PEMURNIAN DAN STANDARISASI BBM DARI SAMPAH PLASTIK

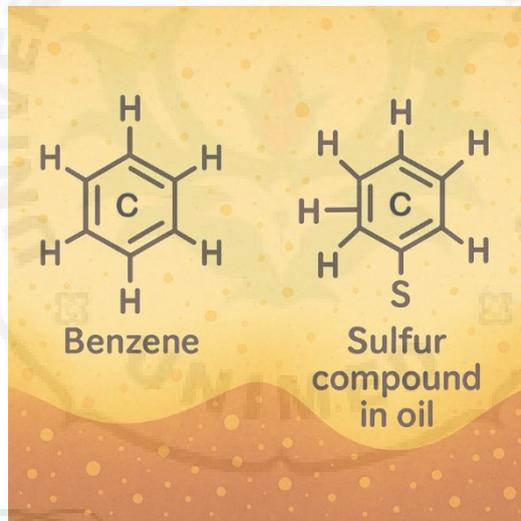
9.1 Pendahuluan

BBM hasil pirolisis dari sampah plastik umumnya masih mengandung berbagai kontaminan seperti sulfur, nitrogen, logam berat, dan senyawa aromatik yang dapat memengaruhi kualitas bahan bakar dan emisi saat pembakaran. Oleh karena itu, tahap pemurnian sangat penting untuk memenuhi standar mutu BBM dan memastikan kompatibilitas dengan mesin pembakaran internal.

Bab ini membahas teknologi pemurnian yang umum digunakan, proses standarisasi, serta uji kualitas BBM hasil pirolisis.

9.2 Kontaminan dalam BBM dari Sampah Plastik

- **Sulfur dan Nitrogen:** Menyebabkan emisi SO_x dan NO_x yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan.
- **Aromatik dan Senyawa Polisiklik Aromatik (PAHs):** Berpotensi karsinogenik dan memperburuk kualitas bahan bakar.
- **Logam Berat:** Dapat merusak mesin dan meningkatkan pencemaran.
- **Air dan Sedimen:** Mengurangi efisiensi pembakaran dan stabilitas BBM.



Gambar 9. 1. Molekul aromatik benzena dan senyawa sulfur dalam minyak

9.3 Metode Pemurnian BBM dari Sampah Plastik

9.3.1 Distilasi Fraksional

Distilasi fraksional digunakan untuk memisahkan fraksi minyak berdasarkan titik didihnya. Dengan cara ini, fraksi yang paling sesuai sebagai BBM (misal fraksi diesel atau bensin) dapat dipisahkan dari komponen berat dan ringan.

- Kelebihan: Proses relatif sederhana dan sudah umum digunakan di industri minyak.
- Kekurangan: Memerlukan energi cukup besar dan tidak menghilangkan kontaminan kimia.

9.3.2 Hidroprosesing (Hydrotreating)

Proses hidroprosesing melibatkan reaksi minyak dengan hidrogen di bawah tekanan dan suhu tinggi dengan katalis, untuk menghilangkan sulfur, nitrogen, dan aromatik.

- Kelebihan: Menghasilkan BBM berkualitas tinggi dengan kandungan sulfur rendah.
- Kekurangan: Biaya investasi dan operasional tinggi, serta memerlukan hidrogen yang relatif mahal.

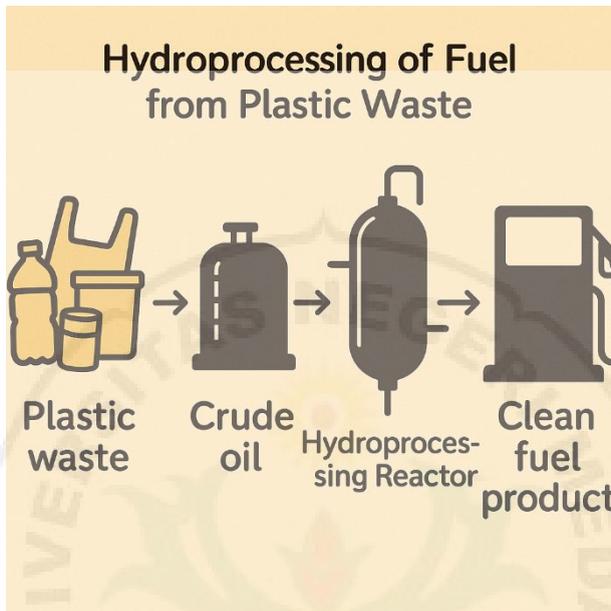
9.3.3 Adsorpsi dan Filtrasi

Penggunaan bahan adsorben seperti zeolit, karbon aktif, dan alumina untuk menghilangkan logam berat dan kontaminan lain.

- Kelebihan: Proses sederhana dan efektif untuk kontaminan spesifik.
- Kekurangan: Kapasitas adsorpsi terbatas, perlu regenerasi adsorben secara berkala.

9.3.4 Pemurnian Biologis

Pemanfaatan mikroorganisme tertentu yang dapat menguraikan kontaminan dalam BBM. Masih dalam tahap penelitian dan pengembangan.



Gambar 9. 2. Skema proses hidroprosesing BBM dari sampah plastik

9.4 Standar Kualitas dan Pengujian BBM dari Sampah Plastik

9.4.1 Standar Kualitas BBM

Untuk memastikan BBM dari sampah plastik dapat digunakan dengan aman dan efisien, produk harus memenuhi standar kualitas seperti:

- **ISO 8217:** Standar bahan bakar kapal, termasuk spesifikasi viskositas, densitas, dan kandungan sulfur.
- **ASTM D975:** Standar bahan bakar diesel untuk kendaraan bermesin diesel.
- **SNI (Standar Nasional Indonesia):** Standar mutu BBM lokal yang mengatur spesifikasi kimia dan fisika bahan bakar.

9.4.2 Parameter Pengujian

Beberapa parameter utama yang diuji meliputi:

- **Densitas:** Menentukan berat jenis BBM dan pengaruhnya terhadap performa mesin.
- **Viscosity (Viskositas):** Mempengaruhi kelancaran aliran dan pembakaran bahan bakar.
- **Sulfur Content (Kandungan Sulfur):** Penting untuk mengurangi emisi SO_x.
- **Flash Point (Titik Nyala):** Menunjukkan keamanan penyimpanan dan penggunaan bahan bakar.
- **Water Content (Kandungan Air):** Air dalam BBM dapat menyebabkan korosi dan kerusakan mesin.
- **Cetan/octane Number (Angka Cetane/oktan):** Menunjukkan kualitas pembakaran bahan bakar diesel.

9.4.3 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan menggunakan peralatan laboratorium seperti:

- Gas Chromatography (GC) untuk analisis komponen kimia.
- Karl Fischer Titration untuk kadar air.
- ASTM standard test methods untuk viskositas, densitas, dan flash point.

9.5 Tantangan dalam Pemurnian dan Standarisasi

9.5.1 Variasi Komposisi Sampah Plastik

Salah satu tantangan utama adalah **ketidakseragaman bahan baku**. Sampah plastik dari berbagai sumber memiliki jenis polimer berbeda (PE, PP, PS, PET, dll) yang menghasilkan fraksi minyak dan kontaminan yang bervariasi.

- **Contoh kasus:** Campuran plastik rumah tangga dan industri menghasilkan minyak dengan rentang titik didih dan kandungan sulfur yang tidak konsisten (Wang et al., 2022).

9.5.2 Skala dan Konsistensi Proses

Sebagian besar proses pirolisis masih bersifat **skala**

laboratorium atau semi-industri, sehingga belum sepenuhnya mampu menghasilkan BBM yang memenuhi spesifikasi teknis secara konsisten.

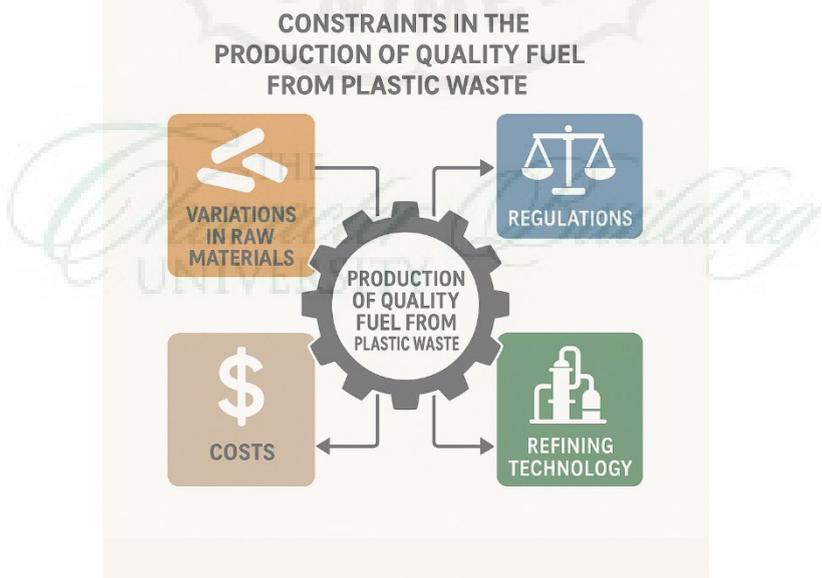
- Keterbatasan dalam sistem kontrol suhu, tekanan, dan aliran gas menyebabkan fluktuasi kualitas hasil.
- Reprodusibilitas antar-batch rendah.

9.5.3 Biaya Investasi dan Operasional

- Pemurnian lanjutan seperti hidroprosesing memerlukan **investasi tinggi** pada peralatan berteknologi tinggi dan katalis khusus.
- Harga BBM hasil pirolisis dapat menjadi tidak kompetitif dibandingkan BBM fosil jika tidak ada insentif atau subsidi.

9.5.4 Regulasi dan Sertifikasi Produk

- **Belum semua negara memiliki regulasi yang jelas** mengenai klasifikasi, penggunaan, dan distribusi BBM dari sampah plastik.
- Sertifikasi dan pengujian laboratorium resmi memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit.



Gambar 9. 3. Diagram kendala dalam produksi BBM berkualitas dari sampah plastik

9.6 Arah Pengembangan dan Prospek

9.6.1 Inovasi Teknologi Pemurnian

Beberapa pendekatan baru tengah dikembangkan untuk mengatasi tantangan pemurnian BBM dari sampah plastik:

- **Nano-katalis:** Katalis berbasis material nano seperti Ni-Mo/Al₂O₃ dan Co-ZnO menunjukkan efisiensi tinggi dalam hidrodesulfurisasi (HDS) dan hydrogenation (Singh et al., 2023).
- **Membran pemisah:** Teknologi membran untuk separasi selektif senyawa aromatik dan air, masih dalam tahap penelitian.
- **Pemurnian berbasis plasma:** Inovasi menggunakan reaktor plasma dingin untuk menurunkan kandungan sulfur dan meningkatkan stabilitas minyak.

9.6.2 Integrasi AI dan Otomasi

Penggunaan **artificial intelligence (AI)** dan **machine learning** mulai digunakan untuk mengoptimalkan parameter pemurnian secara real-time. Sensor cerdas dan pemodelan prediktif memungkinkan pengendalian proses lebih presisi dan efisien.

9.6.3 Harmonisasi Standar Internasional

Dengan semakin meningkatnya produksi BBM dari sampah plastik secara global, beberapa lembaga internasional mulai mendorong penyusunan **standar global** untuk bahan bakar alternatif ini.

- Contoh: International Energy Agency (IEA) dan United Nations Environment Programme (UNEP) bekerja sama dengan produsen dalam menyusun protokol pengujian BBM alternatif.
- Di Indonesia, Badan Standardisasi Nasional (BSN) juga mulai menjajaki kemungkinan SNI khusus BBM dari pirolisis plastik.

9.6.4 Potensi Ekspor dan Penguatan Industri Lokal

- Jika BBM dari sampah plastik dapat mencapai standar mutu internasional, maka Indonesia berpeluang menjadi **eksportir bahan bakar alternatif**, terutama untuk negara berkembang.
- Di sisi lain, hal ini membuka peluang bagi **UMKM dan startup energi** untuk terlibat dalam ekosistem produksi dan distribusi BBM hijau.



Gambar 9. 4. Ilustrasi Peta peluang pemanfaatan BBM plastik di Asia Tenggara

9.7 Penutup Bab 9

Teknologi pemurnian dan standarisasi merupakan tahapan penting dalam memastikan bahwa BBM dari sampah plastik tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memenuhi tuntutan kualitas dan keamanan. Dengan dukungan inovasi teknologi dan kebijakan yang progresif, bahan bakar ini dapat menjadi solusi nyata dalam transisi energi dan pengurangan limbah plastik



BAB SEPULUH

STUDI KASUS DAN IMPLEMENTASI NYATA

10.1 Pendahuluan

Setelah memahami konsep teoretis dan teknis konversi sampah plastik menjadi BBM, tahap berikutnya adalah melihat **penerapan nyata** di lapangan. Studi kasus dan implementasi ini menjadi jembatan antara penelitian dan praktik industri. Bab ini menyajikan berbagai contoh sukses dari dalam dan luar negeri, termasuk inisiatif industri besar, startup lokal, serta kegiatan skala komunitas.

10.2 Studi Kasus Internasional: Plastic Energy (Spanyol-Inggris)

Plastic Energy adalah perusahaan asal Inggris yang beroperasi di Spanyol, memimpin dalam teknologi **pyrolysis continuous reactor** dan mengubah sampah plastik menjadi

TACOIL—bahan baku kimia dan BBM.

Teknologi:

- Pirolisis suhu menengah (300–400 °C) dengan sistem reaktor tertutup.
- Sistem pemurnian dengan distilasi multi-tahap.

Output:

- Sekitar 70–75% **minyak pirolisis** dari input plastik.
- Digunakan kembali sebagai bahan baku untuk produksi plastik baru (circular plastic).

Dampak:

- Mengurangi ketergantungan pada minyak mentah.
- Diminati oleh perusahaan besar seperti SABIC dan Nestlé.

10.3 Studi Kasus Asia: **BLest Co. Ltd (Jepang)**

Di Jepang, **BLest Co. Ltd** mengembangkan mesin **portable pirolisis** berskala rumah tangga dan industri kecil, yang dapat mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak.

Teknologi:

- Mini-reactor pirolisis dengan temperatur ± 500 °C.
- Konsumsi energi rendah dan mudah dioperasikan.

Output:

- 1 kg plastik → $\pm 0,9$ liter minyak bakar ringan.
- Minyak dapat langsung digunakan pada generator atau kompor minyak.

Keunggulan:

- Cocok untuk daerah terpencil dan komunitas pesisir.
- Efisiensi tinggi, emisi rendah.



Gambar 10. 1. Mesin pirolisis BLest (Mini Plastic-to-Oil Machine)

10.4 Studi Kasus Nasional: Inovasi Lokal di Indonesia

Indonesia sebagai salah satu penyumbang sampah plastik terbesar di dunia memiliki potensi besar untuk mengembangkan teknologi konversi plastik menjadi BBM. Beberapa inisiatif telah muncul dari kalangan akademisi, pemerintah daerah, dan sektor swasta.

10.4.1 Universitas Negeri Medan (UNIMED)

Tim peneliti Universitas Negeri Medan mempirolisis 6000 gram serpihan plastik dipirolisis dalam reaktor berbahan bakar LPG pada suhu 350 °C. Dihasilkan fraksi ekuivalen bensin sebanyak 1520 gram atau 79,17%, fraksi solar sebanyak 320 gram atau 16,67%, dan sisanya minyak residu sebanyak 80 gram atau 4,17%.



a

b

Gambar 10. 2. (a) Reaktor pirolisis dan destilasi skala laboratorium milik UNIMED, (b) Produk Pirolisis/destilasi

10.4.2 Inisiatif Pemerintah Daerah – Surabaya dan Banyuwangi

Beberapa kota di Indonesia telah mengadopsi **unit pirolisis skala komunitas**:

Surabaya:

- Dinas Lingkungan Hidup membangun **pabrik mini BBM plastik** di TPA Benowo.
- Hasil: ± 100 liter minyak bakar/hari dari 150 kg plastik campuran.

Banyuwangi:

- Proyek pilot oleh Pemkab Banyuwangi dan universitas setempat.
- Menghasilkan bahan bakar yang digunakan untuk perahu nelayan.

10.4.3 Swasta dan Start-up: Enviplast & Plasticpreneur Indonesia

- **Enviplast** fokus pada produk berbahan dasar plastik biodegradable, dan juga mendukung teknologi konversi plastik menjadi energi.
- **Plasticpreneur Indonesia** merancang alat pirolisis portabel berbahan stainless steel untuk skala UMKM.

10.5 Pemanfaatan BBM Plastik di Sektor Maritim dan Perikanan

10.5.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki **sektor maritim dan perikanan yang sangat tergantung pada bahan bakar minyak**, terutama solar. Namun, tingginya harga BBM dan distribusi terbatas di daerah terpencil menjadi kendala utama. BBM hasil pirolisis plastik menawarkan solusi lokal, murah, dan berkelanjutan.

10.5.2 Studi Kasus: Nelayan Pulau Seram, Maluku

Program kerja sama antara LIPI (kini BRIN) dan Pemerintah Kabupaten Seram bagian Barat pada 2022 menunjukkan hasil menggembirakan:

- **Mesin pirolisis sederhana** dibangun di desa pesisir dengan kapasitas 25 kg plastik/hari.
- Output: ±15 liter BBM/hari digunakan untuk perahu nelayan.
- Penurunan biaya operasional melaut hingga 40%.

Dampak Sosial:

- Nelayan mulai mengumpulkan plastik di pesisir sebagai bahan baku.
- Pendapatan meningkat, dan kesadaran lingkungan ikut tumbuh.

10.5.3 Uji Coba di Pelabuhan Perikanan – Bali

Pada 2023, Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Bali melakukan **pilot project** di Pelabuhan Benoa dengan dukungan dana dari lembaga donor internasional.

- Uji performa BBM pirolisis pada mesin diesel 5 PK dan 10 PK.
- Hasil menunjukkan efisiensi bahan bakar mencapai 92% dibandingkan solar subsidi.
- Emisi CO dan NO_x sedikit lebih tinggi, namun masih dalam batas aman.

Tantangan

- **Stabilitas kimia BBM pirolisis** perlu ditingkatkan untuk penggunaan jangka panjang.
- Perlu standarisasi pencampuran (misalnya 20% BBM pirolisis + 80% solar).

10.5.4 Potensi Skala Nasional

- Jika setiap desa pesisir memiliki unit pirolisis kecil, maka ada potensi **pengurangan konsumsi solar hingga 15% di sektor perikanan tradisional**.
- Model ini mendukung **ekonomi sirkular** di wilayah kepulauan.

10.6 Analisis Keberhasilan dan Kegagalan

10.6.1 Faktor Penentu Keberhasilan

Dari berbagai studi kasus nasional dan internasional yang telah dijabarkan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa **faktor utama keberhasilan** dalam penerapan teknologi konversi plastik menjadi BBM:

- Dukungan Kebijakan dan Regulasi
 - Dukungan dari pemerintah daerah maupun pusat mempercepat proses izin dan alokasi lahan.
 - Contoh: TPA Benowo Surabaya berhasil karena didukung oleh Dinas Lingkungan Hidup setempat.
- Kesesuaian Teknologi dengan Kondisi Lokal
 - Pemilihan teknologi yang sesuai dengan jenis sampah plastik yang tersedia serta kapasitas SDM lokal penting untuk memastikan keberlanjutan.
 - Contoh: Mesin BLeSt di Jepang berhasil karena desainnya sederhana dan cocok untuk komunitas kecil.
- Kemitraan dengan Lembaga Riset
 - Keterlibatan universitas dan lembaga penelitian menjamin **akurasi teknis** dan pengembangan berkelanjutan.

- Contoh: Studi oleh UNIMED dan BRIN mendorong validasi teknis di lapangan.

10.6.2 Hambatan dan Kegagalan

Meski menjanjikan, implementasi teknologi ini juga menghadapi berbagai hambatan yang menyebabkan kegagalan, antara lain:

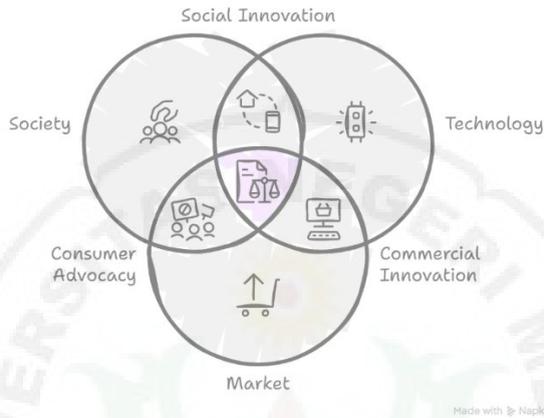
- Kualitas Produk Tidak Konsisten
 - Beberapa mesin menghasilkan minyak dengan **variasi viskositas dan kandungan sulfur tinggi**.
 - Hal ini menyulitkan pemanfaatan langsung pada mesin diesel tanpa modifikasi.
- Minimnya Skala Ekonomi
 - Proyek yang tidak memiliki skala minimum tertentu cenderung tidak berkelanjutan karena **tingginya biaya per liter produksi**.
- Kesadaran Masyarakat Rendah
 - Di banyak lokasi, masyarakat masih membakar sampah plastik karena belum menyadari nilai ekonominya sebagai bahan baku energi.
- Tidak Ada Pasar Terserap
 - Walaupun produksi berhasil, **tidak ada pembeli tetap** atau jaringan distribusi, sehingga produk terbuang sia-sia.

10.6.3 Strategi Perbaikan

Untuk mencegah kegagalan dan meningkatkan keberhasilan, strategi berikut direkomendasikan:

- **Standarisasi kualitas BBM pirolisis** secara nasional melalui BSN.
- Pengembangan **model bisnis inklusif** yang melibatkan masyarakat dan UMKM.
 - Integrasi proyek dengan program pengelolaan sampah terpadu.
 - Pelatihan operator dan edukasi publik secara berkala.

The Power of Integrative Strategy



Gambar 10. 3. Ilustrasi Skema strategi integratif antara masyarakat, teknologi, pasar, dan kebijakan

10.7 Ringkasan dan Rekomendasi

10.7.1 Ringkasan Utama

Berdasarkan berbagai studi kasus dari skala global, nasional, hingga komunitas lokal, berikut beberapa **temuan kunci** seperti pada tabel 10. 1.

Tabel 10. 1. Temuan kunci dalam Produksi BBM Sampah plastik

Aspek	Temuan
Teknologi	Pirolisis menjadi metode paling efektif, terutama tipe batch dan kontinyu.
Output	Umumnya menghasilkan 60–75% minyak cair, sisanya berupa gas dan char.
Aplikasi	BBM digunakan pada genset, perahu nelayan, kendaraan diesel, dan burner industri.
Keberhasilan	Ditentukan oleh kombinasi antara dukungan kebijakan, teknologi tepat guna, dan pasar yang jelas.
Tantangan	Termasuk kualitas minyak yang belum stabil, kendala ekonomi skala kecil, dan kurangnya kesadaran publik.

10.7.2 Rekomendasi Praktis

Bagi para pelaku industri, pemerintah, komunitas, dan peneliti, berikut **rekomendasi aplikatif** untuk implementasi konversi sampah plastik menjadi BBM:

- Untuk Pemerintah dan Regulator
 - Tetapkan **standar nasional** untuk kualitas BBM pirolisis.
 - Berikan **insentif fiskal** bagi pelaku usaha yang bergerak di sektor ini.
 - Integrasikan dalam kebijakan **pengelolaan sampah berbasis ekonomi sirkular**.
- Untuk Akademisi dan Peneliti
 - Fokus pada peningkatan efisiensi energi dan kualitas bahan bakar.
 - Dorong kolaborasi lintas disiplin untuk desain reaktor dan pemurnian.
- Untuk Pelaku Usaha dan Komunitas
 - Mulai dari skala kecil berbasis komunitas dengan plastik homogen (seperti PE atau PP).
 - Bangun kemitraan dengan pemerintah daerah dan sektor swasta.
 - Edukasi masyarakat agar bersedia memilah dan menyuplai plastik.

10.7.3 Visi Masa Depan

Produksi BBM dari sampah plastik bukan hanya solusi teknis, tetapi juga simbol transformasi **lingkungan menjadi energi**. Dengan penguatan kolaborasi antara sains, teknologi, dan kebijakan, Indonesia bisa menjadi pemimpin di Asia Tenggara dalam **energi terbarukan berbasis limbah**.



BAB SEBELAS

PENUTUP DAN REFLEKSI

11.1 Merangkum Perjalanan Energi dari Sampah

Buku ini telah memandu pembaca melalui **perjalanan panjang dan menantang**, dari memahami permasalahan sampah plastik yang kian mencemari lingkungan, hingga bagaimana limbah tersebut justru dapat menjadi **sumber energi alternatif yang bernilai**.

Melalui pendekatan teknis dan populer, kita telah mengeksplorasi:

- Karakteristik plastik dan problematika global limbahnya.
- Proses pirolisis dan teknologi lain yang mampu mengubah plastik menjadi BBM.
- Studi laboratorium dan studi lapangan di Indonesia dan negara lain.
- Implementasi nyata, hambatan, dan potensi pengembangan ke depan.

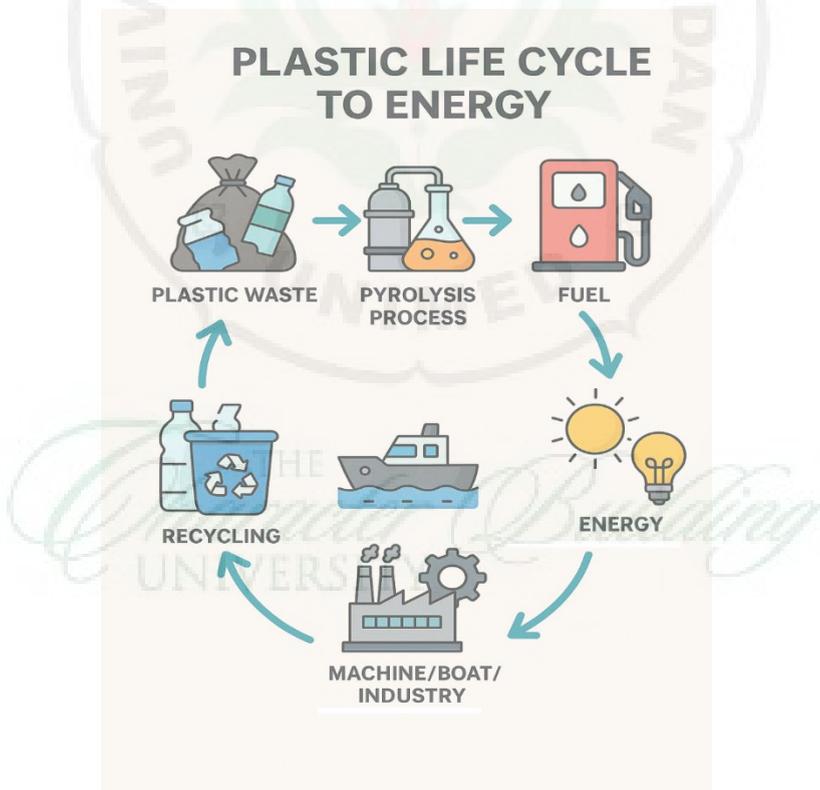
11.2 Potensi Masa Depan

Transformasi sampah plastik menjadi bahan bakar adalah bagian dari visi besar untuk mewujudkan:

- Ekonomi sirkular berbasis lingkungan.
- Energi alternatif yang terjangkau dan terdistribusi merata, bahkan di pelosok.
- Model pembangunan berkelanjutan dengan pendekatan lokal.

Potensi ini akan lebih maksimal apabila didukung oleh:

- **Regulasi nasional yang adaptif dan progresif.**
- **Inovasi teknologi berkelanjutan**, khususnya dalam efisiensi energi dan pemurnian BBM.
- **Pendidikan publik dan partisipasi komunitas.**



Gambar 11. 1. Ilustrasi Konseptual "Daur Hidup Plastik Jadi Energi

11.3 Refleksi Penulis

Transformasi limbah menjadi bahan bakar bukanlah sekedar proyek rekayasa teknik. Ia adalah **cermin dari semangat zaman** bahwa kita harus bertanggung jawab atas konsumsi kita dan berani mengubah krisis menjadi peluang.

Sebagai penulis, saya berharap:

- Buku ini tidak hanya menjadi referensi teknis, tetapi juga **sumber inspirasi**.
- Para pembaca dari latar belakang berbeda, akademisi, pemerintah, wirausahawan, hingga masyarakat umum dapat menemukan motivasi untuk **bertindak nyata**.

11.4 Penutup

Perubahan besar dimulai dari langkah kecil. Memilah plastik, mengenal proses pirolisis, membangun unit kecil di desa, mengedukasi tetangga, semua itu adalah **kontribusi kecil dengan dampak besar**.

Mari kita ubah cara pandang: **sampah bukan akhir, tapi awal dari energi baru**.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Muhtaseb, A.H., Al-Shawakfa, E.M. and Al-Muhtaseb, H. (2020) 'Effect of Zeolite Catalyst on Pyrolysis of Low-Density Polyethylene (LDPE): Product Yield and Composition', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 150, p. 104849. doi:10.1016/j.jaap.2020.104849.
- Al-Salem, S.M., Lettieri, P. and Baeyens, J. (2010) 'Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A Review', *Waste Management*, 29(10), pp. 2625–2643. doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004.
- ANTARA News. (2021). *Wapres: Ketergantungan impor energi fosil harus dihentikan*. [online] Available at: <https://www.antaranews.com/berita/1977255/wapres-ketergantungan-impor-energi-fosil-harus-dihentikan> [Accessed 21 May 2025].(ANTARA News)
- ASTM (2019) *Standard Specification for Diesel Fuel Oils (ASTM D975)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2020) *Standard Test Methods for Petroleum Products and Lubricants*. ASTM D975, D4814.
- ASTM International (2021) *Standard Guide for Fuel and Lubricant Properties Testing*. ASTM D7467.
- ASTM International (2023) *Standard Specification for Diesel Fuel Oils* ASTM D975-23.
- ASTM International (2023) *Standard Specification for Diesel Fuel Oils* ASTM D975-23.

- BLest Co. Ltd. (2024) *Product Manual and Applications*.
<https://blest.co.jp>
- BPPT (2020) *Laporan Pilot Plant Teknologi Pirolisis Plastik untuk BBM Alternatif*. Serpong: Balai Besar Teknologi Konversi Energi.
- BRIN (2022) *Teknologi Tepat Guna Pengolahan Sampah Plastik di Wilayah Pesisir*.
- BSN (2024) *Rancangan SNI: Bahan Bakar Minyak dari Limbah Plastik Melalui Pirolisis*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Butler, E., Devlin, G., McDonnell, K. and Murphy, F. (2011) 'Waste polyolefins to liquid fuels via pyrolysis: review of commercial state-of-the-art and recent laboratory research', *Waste and Biomass Valorization*, 2(3), pp. 227–255. doi:10.1007/s12649-011-9065-0.
- Chen, H., Zhang, S. and Wang, J. (2020) 'Environmental Impact of Pyrolysis Processes for Plastic Waste Management: A Review', *Journal of Cleaner Production*, 264, p. 121562. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121562.
- Chen, Y., and Liu, X. (2023) 'Future trends in plastic waste-to-fuel technologies', *Energy Reports*, 9, pp.1104-1115. doi:10.1016/j.egy.2023.01.032.
- Chen, Y., Liu, H., and Zhang, L. (2021) 'Hydrogenation upgrading of plastic pyrolysis oil for fuel applications', *Fuel Processing Technology*, 216, p.106741. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106741.
- Chen, Y., Liu, H., and Zhang, L. (2021) 'Vacuum pyrolysis of plastic waste for fuel production: Effect of pressure on product distribution', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 154, p.105078. doi:10.1016/j.jaap.2021.105078.
- DKP Bali (2023) *Laporan Uji Coba BBM Alternatif di Pelabuhan Benoa*.
- DLH Kota Surabaya (2023) *Laporan Tahunan Pengolahan Sampah Plastik di TPA Benowo*.

- Dogu, O., Pelucchi, M., Van de Vijver, R. and Van Geem, K.M. (2021) 'Comprehensive Techno-Environmental Analysis of Plastic Pyrolysis Systems', *Waste Management*, 120, pp. 415–428. doi:10.1016/j.wasman.2020.11.029.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019) *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. [Online] Available at: <https://ellenmacarthurfoundation.org> (Accessed: 15 May 2025).
- Elsevier (2024) 'Hydrotreating technology in fuel upgrading', *Fuel Processing Technology*, 235, p.107299.
- Emergen Research (2024) 'Plastic to Fuel Technology Market' <https://www.emergenresearch.com>. Tersedia di: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/plastic-to-fuel-technology-market> (Diakses: 27 Mei 2025)
- European Commission (2018) 'Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources', Official Journal of the European Union.
- European Environment Agency (2019) *Air Quality in Europe – 2019 Report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Fortuna Motor. (2022) 'Pengertian Dyno Test sebagai Alat Uji Performa Sepeda Motor'. [online] Available at: <https://www.fortuna-motor.co.id/apa-itu-dyno-test-dynamometer/> [Accessed 22 May 2025].
- Ghosh, P., Thakur, I.S. and Kaushik, A. (2021) 'Plastics to fuel: a critical review on catalytic pyrolysis of plastic waste to liquid fuel', *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101535. doi:10.1016/j.eti.2021.101535.
- Hasanah, R., et al. (2023) 'Barriers to commercialization of plastic waste-derived fuel in Indonesia', *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 12(4), pp.189-197.

- Hidayat, R. and Sari, M. (2021) 'Economic Feasibility of Pyrolysis Fuel Production from Plastic Waste in Indonesia', *Renewable Energy*, 164, pp. 1376–1384. doi:10.1016/j.renene.2020.10.120.
- IBEKA. (2023). *Dampak Ekonomi Penggunaan Bahan Bakar Fosil bagi Indonesia*. [online] Available at: <https://ibeka.or.id/dampak-ekonomi-penggunaan-bahan-bakar-fosil-bagi-indonesia/> [Accessed 21 May 2025].
- Indrawan, D., Rahmadian, Y. and Suryadi, H. (2021) 'Pirolisis Sampah Plastik LDPE untuk Produksi Bahan Bakar Cair', *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 19(2), pp. 65–72. doi:10.22146/jtki.2021.33577.
- ISO (2022) *ISO 8217:2022 Petroleum products — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels*.
- Jones, D., and Smith, A. (2023) 'Market strategies for plastic waste-derived fuels: Challenges and opportunities', *Renewable Energy*, 198, pp.1234-1245. doi:10.1016/j.renene.2022.11.034.
- Kabeyi, M.J.B. and Olanrewaju, O.A. (2023) 'Review and Design Overview of Plastic Waste-to-Pyrolysis Oil Conversion with Implications on the Energy Transition', *Journal of Energy*, 2023.
- Kaminsky, W. and Zorriquetta, I.J. (2007) 'Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1-2), pp. 368–374. doi:10.1016/j.jaap.2006.11.002.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI (2024) *Rencana Strategis Energi Terbarukan Indonesia 2025-2035*. Jakarta: KESDM.
- Kementerian ESDM RI (2023) *Strategi Nasional Energi Berbasis Limbah Plastik*.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI (2024) *Pedoman Pengelolaan Limbah dan Emisi Industri*. Jakarta: KLHK RI.

- Kiran, C.R., Anantharaman, N. and Ganesh, S. (2020) 'Life Cycle Assessment of Plastic Pyrolysis: Environmental Benefits of Fuel from Waste', *Journal of Cleaner Production*, 254, p. 120143. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120143.
- KLHK (2022) 'Data Sampah Nasional Tahun 2022', *Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia*. Tersedia di: <https://sipsn.menlhk.go.id> (Diakses: 21 Mei 2025).
- Kumar, A., and Sharma, S. (2022) 'Challenges in purification of waste plastic pyrolysis oil: A review', *Fuel Processing Technology*, 234, p.107271. doi:10.1016/j.fuproc.2022.107271.
- Kumar, A., Mishra, R.K., and Patel, S. (2020) 'Microwave assisted pyrolysis of plastic waste: a review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, p.109768. doi:10.1016/j.rser.2020.109768.
- Kumar, S., Panda, A.K. and Singh, R.K. (2011) 'A Review on Tertiary Recycling of High-Density Polyethylene to Fuel', *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), pp. 893–910. doi:10.1016/j.resconrec.2011.05.011.
- Lee, J., Park, H., and Kim, S. (2022) 'Economic feasibility study of plastic waste pyrolysis plant', *Journal of Cleaner Production*, 340, p.130765. doi:10.1016/j.jclepro.2022.130765.
- Lee, J.H., Park, S.J., and Kim, S.H. (2023) 'Pressure effects on pyrolysis of polyethylene: product yield and quality', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 172, p.105320. doi:10.1016/j.jaap.2023.105320.
- Lee, S., Kim, J., and Park, C. (2019) 'Effect of particle size on pyrolysis of plastic waste: A kinetic study', *Waste Management*, 89, pp.235–243. doi:10.1016/j.wasman.2019.03.038.
- Li, X., Zhao, Y., and Chen, M. (2024) 'Membrane separation technology for upgrading plastic pyrolysis oil', *Separation*

- and Purification Technology*, 308, p.122525. doi:10.1016/j.seppur.2023.122525.
- Li, Z., Wang, H., and Xu, J. (2023) 'Environmental impact assessment of plastic pyrolysis: Emission control and waste management', *Journal of Cleaner Production*, 367, p.133112. doi:10.1016/j.jclepro.2023.133112.
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J. and Olazar, M. (2017) 'Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), pp. 576–596. doi:10.1016/j.rser.2017.09.032.
- Maqsood, T. et al. (2021) 'Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159(May), p. 105295. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>.
- Miandad, R. et al. (2006) 'Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil', *Waste Management* [Preprint].
- Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazaiza, A.S., Rehan, M. and Nizami, A.S. (2016) 'Catalytic pyrolysis of plastic waste: moving toward pyrolysis based biorefineries', *Frontiers in Energy Research*, 4, pp. 1–6. doi:10.3389/fenrg.2016.00038.
- Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazaiza, A.S., Rehan, M. and Nizami, A.S. (2016) 'Plastic Waste to Liquid Oil through Catalytic Pyrolysis Using Natural and Synthetic Zeolite Catalysts', *Waste Management*, 69, pp. 66–78. doi:10.1016/j.wasman.2017.08.032.
- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M.A. and Nizami, A.S. (2019) 'Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste for the Production of Liquid Fuel: A Review', *Journal of Environmental Management*, 247, pp. 595–606. doi:10.1016/j.jenvman.2019.06.084.

- Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia. (2023) *Indonesia Energy Outlook 2023*. Jakarta: EBTKE Press.
- Miskolczi, N., Bartha, L. and Angyal, A. (2009) 'Fuel Production by Pyrolysis of Waste Plastics from Agricultural and Packaging Sectors in a Pilot Plant', *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), pp. 1032–1040. doi:10.1016/j.fuproc.2009.04.019.
- Miskolczi, N., Bartha, L., and Angyal, A. (2020) 'Catalytic pyrolysis of plastic waste using zeolite catalysts', *Fuel*, 279, p.118456. doi:10.1016/j.fuel.2020.118456.
- Müller, F., Schultze, A. and Hoffmann, T. (2018) 'Catalytic Upgrading of Pyrolysis Oil from Plastic Waste', *Fuel Processing Technology*, 177, pp. 124–130. doi:10.1016/j.fuproc.2018.03.021.
- News.com.au. (2024). *Startling Bali reality that can't be ignored*. [online] Available at: <https://www.news.com.au/travel/destinations/asia/bali/startling-bali-reality-that-cant-be-ignored/news-story/95ecd1611899d6b75ac7989138daa0d0> [Accessed 21 May 2025].(news)
- Pemerintah Indonesia. (2018) *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 35 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengembangan Pembangkit Listrik Berbasis Sampah Kota*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Plastic Energy (2023) *TACOIL – An Alternative Feedstock for a Circular Economy*. Available at: <https://plasticenergy.com> (Accessed: 21 May 2025).
- Plastic Energy (2024) *Technology Overview*. <https://plasticenergy.com/technology>
- Plastic Energy. (2023) *Turning Plastic Waste into Reusable Plastic or Clean Energy*. [Online] Available at: <https://plasticenergy.com> (Accessed: 15 May 2025).

- Plasticpreneur Indonesia (2024) *Katalog Produk dan Studi Kasus UMKM Energi Plastik*.
- Plastics Europe (2023) 'Plastics – the Facts 2023', *PlasticsEurope.org*. Tersedia di: <https://plasticseurope.org> (Diakses: 21 Mei 2025).
- Prasetyo, A. and Wulandari, F. (2024) 'Community-based plastic-to-fuel innovation in Banyuwangi', *Journal of Waste to Energy Research*, 8(2), pp.114–122.
- Prasetyo, A. et al. (2023) 'Evaluating plastic pyrolysis plant sustainability in Southeast Asia', *Journal of Sustainable Energy Systems*, 12(1), pp.35–44.
- Prasetyo, D., Sari, N., and Widodo, A. (2023) 'Characterization and utilization of pyrolysis oil from mixed plastic waste in Indonesia', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), p.107678. doi:10.1016/j.jece.2022.107678.
- Pratama, D., et al. (2023) 'Quality assessment of plastic pyrolysis oil as alternative diesel fuel', *Indonesian Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2), pp.101-112. doi:10.1234/ijeee.v5i2.4567.
- Putra, A., Nugroho, A. and Wicaksono, A. (2022) 'Cost Analysis and Market Potential of Fuel from Plastic Waste Pyrolysis in Southeast Asia', *Energy Reports*, 8, pp. 389–398. doi:10.1016/j.egyr.2021.12.012.
- Putra, E., and Wahyuni, S. (2023) 'Pengembangan pasar bahan bakar alternatif dari sampah plastik di Indonesia', *Jurnal Ekonomi Energi*, 14(2), pp.89-104. doi:10.30587/jee.v14i2.4012.
- Rahman, M., Ahmed, S. and Islam, M. (2020) 'Performance Evaluation of Diesel Engine Using Pyrolysis Oil Blends from Plastic Waste', *Energy Conversion and Management*, 209, p. 112638. doi:10.1016/j.enconman.2020.112638.

- Rahman, M., Islam, M., and Ahmed, F. (2022) 'Economic feasibility of plastic waste pyrolysis for fuel production', *Energy Economics*, 110, p.106036. doi:10.1016/j.eneco.2022.106036.
- Rahman, M., Islam, M., and Ahmed, F. (2022) 'Effect of catalyst on pyrolysis temperature and product yield from plastic waste', *Waste Management*, 130, pp.87-95. doi:10.1016/j.wasman.2021.10.018.
- Rahman, M.M., Hossain, M.S., and Azad, A.K. (2021) 'Economic Analysis of Waste Plastic Pyrolysis Fuel: Small-scale Business Model for Developing Countries', *Journal of Cleaner Production*, 316, p.128389. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128389.
- Rahman, M.M., Islam, M.S., and Azad, A.K. (2022) 'Catalytic pyrolysis of plastic waste using zeolite catalysts for enhanced oil yield', *Fuel Processing Technology*, 220, p.106961. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106961.
- Rahman, M.M., Islam, M.S., and Azad, A.K. (2022) 'Catalytic pyrolysis of plastic waste using zeolite catalysts for enhanced oil yield', *Fuel Processing Technology*, 220, p.106961. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106961.
- Ramadhan, A. and Hidayat, R. (2022) 'Economic feasibility study of plastic waste pyrolysis oil production', *Renewable Energy*, 187, pp.345-353. doi:10.1016/j.renene.2022.02.021.
- Romuto (2025) Memahami Jenis Plastik dan Efisiensi Daur Ulang: Panduan untuk Profesional Industri. Available at: <https://www.recyclemachine.net/id/memahami-jenis-plastik-dan-efisiensi-daur-ulang-sebuah-panduan-bagi-para-profesional-industri/>.
- Santos, J.L., Dizon, J.R., Ong, D.C., and Tan, L.D. (2021) 'Community-based Plastic Pyrolysis for Sustainable Fuel Production in Developing Countries', *Journal of Cleaner Production*, 292, p.125846. doi:10.1016/j.jclepro.2021.125846.

- Sari, D. and Wulandari, R. (2021) 'Utilization of Pyrolysis Fuel from Plastic Waste in Industrial Boilers', *Journal of Cleaner Production*, 279, p. 123904. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123904.
- Sari, D., Wulandari, R. and Himawan, C. (2020) 'Pemanfaatan Zeolit Lokal sebagai Katalis Pirolisis Sampah Plastik Campuran', *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 12(3), pp. 145–153. doi:10.26554/jstl.2020.12.3.145-153.
- Sari, L.K., Santoso, D., and Rahman, F. (2023) 'Pemurnian minyak pirolisis sampah plastik untuk bahan bakar diesel: Studi kasus Jawa Barat', *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 12(1), pp.45-60. doi:10.30587/jeti.v12i1.3456.
- Sari, M.M., Inoue, T., Rofiah, R., et al. (2023). *Transforming Bubble Wrap and Packaging Plastic Waste into Valuable Fuel Resources*. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 24, pp.260–270.(Undip E-Journal System Portal)
- Setiawan, M., Santoso, D., and Putra, R. (2022) 'Performance evaluation of diesel engine fuelled with plastic waste pyrolysis oil blends', *Energy Reports*, 8, pp.2352-2361. doi:10.1016/j.egyr.2022.06.025.
- Sharuddin, S.D.A., Abnisa, F., Daud, W.M.A.W. and Aroua, M.K. (2016) 'A Review on Pyrolysis of Plastic Wastes', *Energy Conversion and Management*, 115, pp. 308–326. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- Singh, P., Kumar, A., and Das, R. (2023) 'Recent advancements in upgrading plastic-derived fuel oil: A comprehensive review', *Fuel*, 345, p.128042. doi:10.1016/j.fuel.2023.128042.
- Singh, R., and Patel, M. (2023) 'Advanced upgrading techniques for waste plastic pyrolysis oil: A review', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, p.105476. doi:10.1016/j.jaap.2023.105476.
- Singh, R., Gupta, V.K., and Yadav, A. (2021) 'Effect of temperature on pyrolysis products from mixed plastic waste', *Energy*

- Conversion and Management*, 231, p.113860. doi:10.1016/j.enconman.2020.113860.
- Singh, R., Gupta, V.K., and Yadav, A. (2022) 'Fractional distillation of pyrolysis oil: improving fuel properties', *Energy Conversion and Management*, 255, p.115255. doi:10.1016/j.enconman.2022.115255.
- Singh, R.K. and Ruj, B. (2023) 'Plastic waste to fuel: Current trends and future prospects', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, p.113016.
- Singh, R.K., Ruj, B. and Sadhukhan, A.K. (2020) 'Performance Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Waste Plastic Pyrolysis Oil–Diesel Blends', *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(17), pp. 2073–2081. doi:10.1080/15567036.2019.1587063.
- SNI (2018) *Standar Bahan Bakar Minyak untuk Mesin Diesel*, Badan Standardisasi Nasional.
- Supriyadi, M. and Lestari, D. (2022) 'Studi kritis kegagalan unit BBM plastik di Jawa Tengah', *Jurnal Energi dan Teknologi Lingkungan*, 8(3), pp.150–159.
- Sutrisno, D., Hapsari, B., and Wijaya, A. (2023) 'Optimasi pirolisis plastik menggunakan katalis zeolit untuk produksi bahan bakar di Indonesia', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(1), pp.45–53. doi:10.1234/jtl.v24i1.9876.
- Syamsudin, R., Santoso, D., and Nugroho, A. (2022) 'Plasma pyrolysis technology for plastic waste conversion: status and prospects', *Environmental Technology & Innovation*, 27, p.102449. doi:10.1016/j.eti.2022.102449.
- Tambunan, B.H. et al. (2024) 'Waste to Energy; Conversion of Plastic Waste into Liquid Fuel Equivalent to Diesel and Gasoline Using the Pyrolysis Method', *Journal of Physics: Conference Series*, 2866(1), p. 12097. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2866/1/012097>.

- Tan, X., Li, C. and Zhou, Y. (2022) 'High-Temperature Pyrolysis of Polypropylene and its Impact on Oil-Gas Composition', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, p. 105355. doi:10.1016/j.jaap.2022.105355.
- Tanaka, M., and Saito, K. (2023) 'Environmental and regulatory challenges in waste-to-fuel technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, p.113024. doi:10.1016/j.rser.2023.113024.
- Tanaka, M., Yamamoto, S. and Suzuki, K. (2019) 'Hydrotreatment of Pyrolysis Oil for Fuel Applications', *Journal of Cleaner Production*, 207, pp. 1035–1042. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.225.
- Tanaka, Y. (2022) 'Household-scale plastic pyrolysis in Japan: A decentralized approach', *Journal of Clean Energy Technologies*, 10(4), pp.256–261.
- UNEP (2023) *Emerging Technologies for Waste-to-Fuel Applications in the Global South*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- United Nations Environment Programme (2023) *Guidelines for Emission Control in Waste-to-Energy Plants*. Nairobi: UNEP.
- US Environmental Protection Agency (EPA) (2020) *Regulations for Plastic Pyrolysis Operations*. Washington, DC: EPA.
- Wang, H., Liu, J., and Zhang, W. (2023) 'Nano-catalysts for efficient upgrading of pyrolysis oils from plastic waste', *Applied Catalysis B: Environmental*, 322, p.121922. doi:10.1016/j.apcatb.2023.121922.
- Wang, L., Wang, Y. and Zhao, J. (2021) 'Recent Advances in Plastic Waste Pyrolysis Technology: From Process Optimization to Upgraded Fuel', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 157, p. 105273. doi:10.1016/j.jaap.2021.105273.

- Wang, S. et al. (2022) 'Experimental investigation of plastic waste pyrolysis fuel and diesel blends combustion and its flue gas emission analysis in a 5 kW heater', *Energy*, 247, p. 123408. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123408>.
- Wang, X., Zhao, Y., and Li, Z. (2020) 'Influence of inert gas atmosphere on pyrolysis characteristics of plastic waste', *Chemical Engineering Journal*, 382, p.122971. doi:10.1016/j.cej.2019.122971.
- Wang, Y., Li, J., and Liu, S. (2022) 'Challenges in scaling up plastic pyrolysis oil upgrading processes', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 160, p.105405. doi:10.1016/j.jaap.2022.105405.
- Wijaya, M., Sari, D. and Indrawan, D. (2021) 'Pengendalian Emisi pada Proses Pirolisis Sampah Plastik', *Jurnal Teknik Lingkungan*, 17(1), pp. 45–53. doi:10.22146/jtl.2021.46422.
- Williams, P.T. and Slaney, E. (2023) 'Continuous pyrolysis of waste plastics for oil production: Case study of Plastic Energy', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 168, p.105423. doi:10.1016/j.jaap.2023.105423.
- World Bank Group (2024) *Sustainable Waste Management and Energy Recovery*. Washington, DC: World Bank.
- World Bank. (2021). *Plastic Waste Discharges from Rivers and Coastlines in Indonesia*. [online] Available at: <https://www.worldbank.org/en/country/indonesia/publication/plastic-waste-discharges-from-rivers-and-coastlines-in-indonesia> [Accessed 21 May 2025].(worldbank.org)
- Wulandari, R. and Sari, D. (2020) 'Pemanfaatan Karbon Aktif dalam Pemurnian Bahan Bakar Cair dari Sampah Plastik', *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 13(1), pp. 75–84. doi:10.26554/jstl.2020.13.1.75-84.

- Wulandari, S., Prasetyo, D., and Kartika, M. (2021) 'Life cycle assessment of pyrolysis fuel from plastic waste in Indonesia', *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp.25412–25422. doi:10.1007/s11356-021-13432-0.
- Yadav, G. et al. (2023) 'Techno-economic analysis and life cycle assessment for catalytic fast pyrolysis of mixed plastic waste', *Energy & Environmental Science*, 16. Available at: <https://doi.org/10.1039/D3EE00749A>.
- Yusuf, R. (2024) 'Peta Jalan Pemanfaatan Sampah Plastik untuk Energi di Indonesia', *Jurnal Kebijakan Energi Nasional*, 9(1), pp.21–32.
- Yusuf, R. et al. (2023) 'Pemanfaatan BBM hasil pirolisis plastik untuk nelayan di Maluku: Studi kasus dan analisis dampak', *Jurnal Energi Maritim*, 5(2), pp.88–96.
- Zerowaste.id (2021) '7 Simbol dan Jenis Plastik', *Zerowaste.id*. Tersedia di: <https://zerowaste.id/knowledge/symbol-dan-jenis-plastik/> (Diakses: 21 Mei 2025).
- Zhang, J., Wang, S., and Ma, L. (2023) 'Advances in catalytic upgrading of plastic pyrolysis oil for cleaner fuel production', *Catalysis Today*, 404, pp.157-170. doi:10.1016/j.cattod.2023.01.010.
- Zhang, L., Chen, Y., and Wang, S. (2022) 'Real-time emission monitoring in plastic pyrolysis plants: Technologies and challenges', *Environmental Science & Technology*, 56(12), pp.7589-7598. doi:10.1021/acs.est.2c01023.
- Zhang, X., Li, Y., and Wang, L. (2020) 'Effect of temperature on pyrolysis of plastic waste for oil production: A review', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 150, p.104889. doi:10.1016/j.jaap.2020.104889.
- Zhang, Y., Wang, L. and Chen, H. (2019) 'Evaluation of Gasoline Blends Containing Pyrolysis Oil Derived from

Polypropylene Waste', *Fuel*, 235, pp. 1160–1167.
doi:10.1016/j.fuel.2018.08.096.

Zhou, J., Zhang, Q., and Li, S. (2021) 'Integrated pyrolysis and gasification of plastic waste for syngas production: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, p.110213. doi:10.1016/j.rser.2020.110213.



PROFIL PENULIS

Bisrul Hapis Tambunan lahir pada tahun 1973 di Desa Setia, sebuah desa di Kecamatan Pahae Jae, Kabupaten Tapanuli Utara, Propinsi Sumatera Utara. Dari kecil sudah bercita-cita ingin jadi Insinyur Teknik Mesin. Memulai pendidikan formal di SD Negeri Aek Botik di Kecamatan Pahae Jae, lalu lanjut ke SMP negeri Sarulla (Sekarang SMP Negeri 1 Pahae Jae). Khawatir tidak bisa lulus ke Perguruan Tinggi Negeri jika bersekolah SMA di kampung, setelah lulus SMP, tahun 1989 melanjutkan memutuskan merantau ke Banda Aceh dan melanjutkan sekolah di SMA Negeri 3 Banda Aceh. Setelah lulus SMA pada tahun 1992 mengikuti UNPTN (Ujian Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) lulus di Program Studi Teknik Mesin Universitas Sumatera, lulus Sarjana Teknik dengan topik skripsi “Perencanaan Turbin Air untuk PLTA Aek Sarulla”. Tahun 2003 mulai bekerja sebagai Dosen di Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Medan. Tahun 2005 melanjutkan pendidikan ke jenjang Magister di Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada, lulus tahun 2007 dengan topik Tesis “Karakterisasi Bahan Bakar Biomassa Cangkang Kemiri”. Tahun 2021 melanjutkan studi ke Program Doktor Ilmu Teknik Mesin Universitas Sumatera Utara, lulus tahun 2025 dengan topik disertasi “Penggunaan Minyak Pirolisis Sampah Plastik sebagai Aditif pada Biodiesel Biji Karet”. Selama menjadi Dosen di Universitas Negeri Medan, Penulis aktif melakukan penelitian dan Pengabdian Masyarakat. Penulis juga aktif menulis artikel ilmiah di Jurnal Internasional bereputasi dan menulis Buku.