

Minyak Pirolisis Plastik Sebagai **ADITIF** Pada **BIODIESEL BIJI KARET**



Bisrul Hapis **Tambunan**, Himsar **Ambarita**
Tulus Burhanuddin **Sitorus**, Abdi Hanra **Sebayang**
Ilmi **Abdullah**, Taufiq Bin **Nur**

Minyak Pirolisis Plastik Sebagai **ADITIF** Pada **BIODIESEL BIJI KARET**





UU 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

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

Pembatasan Perlindungan Pasal 26

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

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

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

- Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- 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 Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).

Minyak Pirolisis Plastik Sebagai Aditif pada Biodiesel Biji Karet

Bisrul Hapis Tambunan, Himsar Ambarita
Tulus Burhanuddin Sitorus, Abdi Hanra Sebayang
Ilmi Abdullah, Taufiq Bin Nur

UNIVERSITAS SUMATERA
MEDAN
UNIMED
THE
Character Building
UNIVERSITY



Penerbit Yayasan Kita Menulis

Minyak Pirolisis Plastik Sebagai Aditif pada Biodiesel Biji Karet

Copyright © Yayasan Kita Menulis, 2024

Penulis:

Bisrul Hapis Tambunan, Himsar Ambarita
Tulus Burhanuddin Sitorus, Abdi Hanra Sebayang
Ilmi Abdullah, Taufiq Bin Nur

Editor: Matias Julyus Fika Sirait

Desain Sampul: Devy Dian Pratama, S.Kom.

Penerbit

Yayasan Kita Menulis

Web: kitamenulis.id

e-mail: press@kitamenulis.id

WA: 0821-6453-7176

IKAPI: 044/SUT/2021

Bisrul Hapis Tambunan., dkk.

Minyak Pirolisis Plastik Sebagai Aditif pada Biodiesel Biji Karet

Yayasan Kita Menulis, 2024

xii; 78 hlm; 16 x 23 cm

ISBN: 978-623-113-405-9

Cetakan 1, Juli 2024

- I. Minyak Pirolisis Plastik Sebagai Aditif pada Biodiesel Biji Karet
- II. Yayasan Kita Menulis

Katalog Dalam Terbitan

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak maupun mengedarkan buku tanpa
izin tertulis dari penerbit maupun penulis

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul "Minyak Pirolisis Plastik Sebagai Aditif pada Biodiesel Biji Karet" ini dapat tersusun dan diterbitkan dengan baik. Buku ini hadir sebagai upaya untuk memberikan wawasan dan pengetahuan yang lebih mendalam mengenai potensi penggunaan minyak pirolisis plastik sebagai aditif pada biodiesel, khususnya biodiesel yang berasal dari biji karet.

Permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh limbah plastik yang semakin meningkat setiap tahunnya menjadi salah satu pendorong utama penyusunan buku ini. Plastik yang sulit terurai dan menumpuk di lingkungan tidak hanya mencemari tanah dan air, tetapi juga membahayakan kehidupan makhluk hidup. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi dampak negatif limbah plastik melalui teknologi pirolisis menjadi sangat penting. Pirolisis plastik merupakan proses yang mengubah limbah plastik menjadi minyak yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

Di sisi lain, biji karet sebagai bahan baku biodiesel memiliki potensi yang besar dalam pengembangan energi terbarukan. Biji karet yang merupakan hasil samping dari industri karet seringkali tidak dimanfaatkan secara optimal. Dengan mengolah biji karet menjadi biodiesel, kita tidak hanya dapat menghasilkan energi terbarukan yang ramah lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan nilai ekonomi dari komoditas karet.

Buku ini mengupas tuntas mengenai proses pirolisis plastik, karakteristik minyak pirolisis, serta potensi penggunaannya sebagai aditif pada biodiesel biji karet. Potensi bijikaret sebagai bahan baku biodiesel, Hasil pengujian Performa mesin disel menggunakan campuran biodiesel biji

karet dan minyak pirolisis plastik. Kami berharap buku ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang energi terbarukan dan pengelolaan limbah. Selain itu, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti, akademisi, praktisi, serta masyarakat umum yang memiliki minat terhadap isu-isu lingkungan dan energi.

Tidak lupa, kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan inspirasi bagi pembaca dalam mengembangkan penelitian dan inovasi di bidang energi terbarukan dan pengelolaan limbah.

Akhir kata, kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan untuk perbaikan dan penyempurnaan di masa mendatang.

Selamat membaca!
Tim Penulis



Daftar Isi

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel.....	

Bab 1 Minyak Pirolisis Plastik

1.1 Jenis-jenis Plastik.....	2
1.2 Pirolisis Plastik Menjadi BBM	4

Bab 2 Bahan Baku Biodiesel

2.1 Minyak Nabati dapat Dimakan (Edibel Vegetable Oil)	25
2.2 Minyak Nabati Tidak Dapat Dimakan (Non Edibel Oil)	26
2.3 Minyak Limbah atau Minyak Bekas.....	26
2.4 Lemak Hewani.....	27
2.5 Micro Algae	27

Bab 3 Biji Karet (*Hevea brasiliensis*) Sebagai Bahan Baku Biodiesel

3.1 Potensi Biji Karet Sebagai Bahan Baku Biodiesel.....	29
3.2 Sifat Fisika Kimia Minyak Nabati Biji Karet.....	32

Bab 4 Sifat Fisika-kimia Bahan Bakar Cair Jenis Diesel

4.1 Viskositas Kinematik (Kinematic Viscosity)	37
4.2 Densitas (Density)	38
4.3 Bilangan Asam (acid value)/Total Acid Number (TAN).....	38
4.4 Stabilitas Oksidasi (Oxidation Stability).....	39
4.5 Cloud Point, Pour Point dan Flash Point	39
4.6 Nilai Kalor (Calorific Value).....	40
4.7 Angka Cetana (Cetane Number)	40
4.8 Bilangan Yodium (Iodine Value).....	41

Bab 5 Hasil Pengujian Sifat Fisika Kimia dan Performa Mesin Diesel

5.1 Perubahan Sifat Fisika kimia Biodiesel Biji Karet.....	43
5.1.1 Nilai Kalor	43
5.1.2 Nilai Setana	45

5.1.3 Viskositas	45
5.1.4 Stabilitas Oksidasi.....	46
5.2 Pengujian pada Mesin Diesel	47
5.2.1 Torsi	47
5.2.2 Daya Rem/Break power (BP)	48
5.2.3 Efisiensi Termal Rem/Brake Thermal Efficiency (BTE)	49
5.2.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik/Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)	50
5.2.5 Temperatur Gas Buang.....	51
5.2.6 Emisi Asap/Opacity.....	53
5.2.7 Emisi Hidrokarbon (HC).....	54
5.2.8 Emisi CO	55
5.2.9 Emisi CO ₂	56
Daftar Pustaka	59

Daftar Gambar

Gambar 1.1: Skema proses pirolisis plastik jadi BBM	6
Gambar 5.1: Instalasi Pengujian Performansi Mesin.....	47
Gambar 5.2: Torsi mesin pada load yang berbeda; a. 1kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.	48
Gambar 5.3: Brake power mesin disel pada load yang berbeda; a. 1kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.....	49
Gambar 5.4: Efisiensi termal pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg	50
Gambar 5.5: Brake spesifik fuel consumption pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg	51
Gambar 5.6: Temperatur gas buang pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg	52
Gambar 5.7: Emisi Opacity pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg	53
Gambar 5.8: Emisi HC pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.	54
Gambar 5.9: Emisi CO pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.	56
Gambar 5.10: Emisi CO ₂ pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg	57



THE
Character Building
UNIVERSITY

Daftar Tabel

Tabel 1.1: Jenis-jenis plastik dan karakteristiknya	4
Tabel 1.2: Hasil MPP dari pirolisis plastik menurut beberapa referensi.....	20
Tabel 3.1: Potensi Minyak Nabati dan Biodiesel dari Biji Karet.....	30
Tabel 3.2: Sifat fisika-kimia minyak biji karet dari berbagai referensi.....	31
Tabel 3.3: Perbandingan propeties biodiesel biji karet, biodiesel standar dan solar	35
Tabel 5.1: Sifat fisika-kimia biodiesel biji karet, minyak pirolisis plastik dan campurannya	44



Bab 1

Minyak Pirolisis Plastik

Minyak pirolisis plastik adalah hasil dari proses pirolisis, yaitu penguraian termal limbah plastik di bawah kondisi tanpa oksigen. Proses ini menghasilkan minyak yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif atau bahan baku dalam berbagai aplikasi industri (Demirbas, 2004). Pirolisis plastik bukan hanya membantu mengurangi limbah plastik yang masuk ke tempat pembuangan akhir tetapi juga memberikan potensi sumber energi terbarukan yang signifikan (Aguado et al., 2007).

Proses pirolisis plastik melibatkan pemanasan limbah plastik pada suhu tinggi dalam lingkungan anaerobik. Suhu ini biasanya berkisar antara 300 hingga 700 derajat Celsius. Dalam kondisi ini, rantai polimer plastik terurai menjadi molekul-molekul kecil, yang kemudian menguap dan akhirnya mengembun menjadi minyak (Williams & Brindle, 2003). Produk sampingan lain dari proses ini termasuk gas, yang bisa digunakan untuk membangkitkan energi, dan residu padat yang dikenal sebagai char, yang bisa digunakan sebagai aditif dalam produksi semen atau bahan bakar padat (Sharuddin et al., 2016).

Keuntungan utama dari minyak pirolisis plastik adalah potensinya untuk menggantikan bahan bakar fosil tradisional. Minyak ini dapat dimurnikan lebih lanjut menjadi bahan bakar seperti diesel atau digunakan secara langsung dalam beberapa aplikasi pembakaran (Mani et al., 2009). Dalam beberapa kasus, minyak pirolisis telah digunakan dalam mesin diesel untuk menggerakkan kendaraan atau generator listrik. Selain itu, minyak pirolisis

dapat diolah menjadi bahan kimia yang berguna di industri petrokimia, seperti nafta atau bahan bakar jet (Lopez et al., 2011).

Namun, ada beberapa tantangan dalam penggunaan minyak pirolisis plastik. Kualitas minyak yang dihasilkan sangat bervariasi tergantung pada jenis plastik yang diolah. Plastik yang mengandung aditif atau pengotor dapat menghasilkan minyak dengan sifat yang kurang diinginkan atau bahkan berbahaya (Lima et al., 2004). Oleh karena itu, pirolisis plastik memerlukan pemilihan bahan baku yang teliti dan proses pemurnian yang cermat untuk memastikan kualitas minyak akhir yang baik. Selain itu, aspek keberlanjutan dan dampak lingkungan dari pirolisis, termasuk emisi dari proses pirolisis itu sendiri, perlu dipertimbangkan dengan hati-hati (Demirbas, 2004).

Pengembangan lebih lanjut dalam teknologi pirolisis dan metode pemurnian minyak dapat membantu mengatasi tantangan ini, menjadikan minyak pirolisis plastik sebagai komponen penting dalam strategi energi berkelanjutan dan pengelolaan limbah (Sharuddin et al., 2016). Dengan peningkatan efisiensi dan penurunan biaya produksi, minyak pirolisis plastik berpotensi menjadi alternatif yang layak untuk bahan bakar fosil dan bahan baku industri di masa depan (Aguado et al., 2007).

1.1 Jenis-jenis Plastik

Penerapan plastik dalam aplikasi domestik dan industri semakin meningkat dari hari ke hari. Plastik dianggap memiliki banyak kelebihan di antaranya mudah dibentuk, bobot rendah, dan harga yang relatif murah (V. L. Mangesh et al., 2020). Ada berbagai jenis plastik yang digunakan dalam berbagai keperluan untuk menunjang produk-produk industri. Salah satu hal yang memengaruhi kuantitas dan karakteristik produk pirolisis adalah jenis plastik (Maqsood et al., 2021a), maka perlu diidentifikasi dulu berbagai jenis plastik.

Jenis-jenis Plastik yang umum digunakan untuk menunjang produk industri antara lain: (R. Miandad et al., 2017a)

1. Polystyrene (PS)

Karakteristik plastik jenis ini adalah: tahan panas, ringan, kekuatan tinggi, dan tahan lama. Plastik jenis ini biasanya digunakan pada

Mainan, alat medis, elektronik, kemasan makanan dan barang konstruksi.

2. Low density polyethylene (LDPE)

Karakteristik LDPE antara lain: Kekuatan tarik rendah, kekerasan rendah, Tahan air, merupakan Polimer yang diinginkan untuk berbagai aplikasi. Biasanya digunakan pada: Tong sampah, pembungkus foil untuk kemasan dan kantong plastik.

3. High density polyethylene (HDPE)

Karakteristik HDPE antara lain: rantai polimer yang panjang, merupakan polimer dengan sifat kekuatan tinggi, tinggi kristal. Biasanya digunakan pada mainan, wadah minyak, botol deterjen, botol susu.

4. Polypropylene (PP)

Karakteristik PP antara lain: Ketahanan panas dan kimia yang baik, kepadatan rendah, kekakuan tinggi, kekerasan tinggi. Biasanya digunakan pada: ember, karpet, perabotan, kotak penyimpanan, folder kantor, pot bunga, bumper mobil.

5. Polyvinyl chloride (PVC)

PVC memiliki karakteristik tahan api, merupakan plastik serba guna. Biasanya digunakan pada: pipa, interior otomotif, kartu kredit dan kartu lainnya, alat kesehatan, kemasan, insulasi listrik, foil makanan, sepatu bot, bingkai jendela.

6. Polyethylene-terephthalate (PET)

Karakteristik PET adalah ringan, tahanan tekanan, kapasitas lebih besar, polimer serbaguna. Biasanya digunakan pada: bingkai jendela, kemasan makanan, insulasi listrik, pita magnetik, rontgen, film fotografi.

1.2 Pirolisis Plastik Menjadi BBM

Limbah padat perkotaan seperti limbah plastik merupakan bagian utama dari limbah berbasis fosil yang dapat diubah menjadi bahan bakar terbarukan yang menguntungkan secara komersial atau bahan kimia bernilai tambah (K. and Udayakumar, 2020).

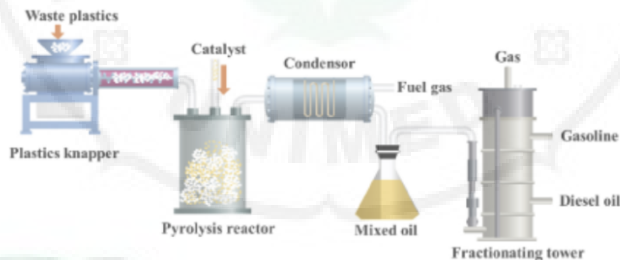
Tabel 1.1: Jenis-jenis plastik dan karakteristiknya (R. Miandad et al., 2017)

Jenis plastik	Karakteristik	Aplikasi	Sebagai bahan baku pirolisis
<i>Polystyrene (PS)</i>	- tahan panas - ringan - kekuatan tinggi - dan tahan lama	- Mainan - alat medis - elektronik - kemasan makanan - barang konstruksi	- Membutuhkan suhu rendah dibandingkan dengan jenis plastik PP dan PE - Menghasilkan minyak yang lebih sedikit kental dibandingkan dengan jenis plastik PE dan PP
<i>Low density polyethylene (LDPE)</i>	- kekuatan tarik rendah - kekerasan rendah - tahan air	- Tong sampah - pembungkus foil untuk kemasan - kantong plastik	
<i>High density polyethylene (HDPE)</i>	- rantai polimer yang panjang - merupakan polimer dengan sifat kekuatan tinggi - tinggi kristal	- mainan - wadah - minyak - botol deterjen - botol susu	- Memerlukan suhu tinggi > 500 °C karena struktur rantainya yang panjang - Ini mengubah menjadi lilin bukan bahan bakar cair dalam pirolisis termal - Pembentukan lilin terjadi di situs eksternal katalis sementara

Jenis plastik	Karakteristik	Aplikasi	Sebagai bahan baku pirolisis
			perengkahan lebih lanjut lilin menjadi gas dan cairan terjadi di situs internal katalis
<i>Polypropylene (PP)</i>	- ketahanan panas dan kimia yang baik - kepadatan rendah - kekakuan tinggi - kekerasan tinggi	- ember - karpet - perabotan - kotak penyimpanan - folder kantor - pot bunga - bumper mobil	- Memerlukan suhu tinggi - Sulit untuk menurunkan di bawah pirolisis termal - Menghasilkan hasil cair dengan senyawa aromatik tinggi di bawah pirolisis katalitik
<i>Polyvinyl chloride (PVC)</i>	- tahan api - merupakan plastik serba guna	- pipa - interior otomotif - kartu kredit dan kartu lainnya - alat kesehatan - kemasan, insulasi listrik - foil makanan, sepatu bot - bingkai jendela	- Menghasilkan gas klorin yang berbahaya - Deklorinasi melalui suhu rendah (250-320 °C) atau adsorpsi fisik atau kimia - Kehadiran klorin dan pengendapan kokas memengaruhi aktivitas katalitik katalis
<i>Polyethylene-terephthalate (PET)</i>	- Ringan - tahanan tekanan - kapasitas lebih besar - polimer serbaguna	- bingkai jendela - kemasan makanan - insulasi listrik - pita magnetik - rontgen - film fotografi	- Ini mengandung heteroatom

Hidrokarbon, yang ditemukan dalam plastik, merupakan sumber energi yang sangat baik karena nilai kalornya yang tinggi. Pembuangan limbah plastik menghadirkan peluang penghematan dan pemulihan energi yang signifikan.

Banyak penelitian yang telah dilakukan tentang pemanfaatan sampah plastik menjadi BMM, karena pemanfaatan sampah plastik menjadi BBM memiliki dua sisi keuntungan yaitu mengurangi limbah plastik dan mendapatkan BBM dari bahan baku yang gratis. Dalam kehidupan sehari-hari sebagian besar bahan yang digunakan adalah plastik karena bobotnya yang lebih ringan, daya tahan dan keserbagunaannya. Untuk menambah kekuatan plastik dibuat dengan berbagai kombinasi polimer yang menyebabkan masalah dalam proses daur ulang. Sampah plastik biasanya baik di daur ulang dan untuk mendapatkan bahan bakar dengan metode pirolisis plastik. Tingginya jumlah konsumsi plastik setiap hari menyebabkan jumlah limbah yang lebih besar. Daurlang adalah suatu metode pembuatan bahan bakar dari sampah plastik dengan cara pirolisis plastik (Kumar Jha and Kannan, 2021).



Gambar 1.1: Skema proses pirolisis plastik jadi BBM (Maqsood et al., 2021)

Studi yang dilakukan Abnisa, dkk. (2021) mengungkap konversi limbah padat berbasis fosil menjadi bahan bakar cair melalui teknik pirolisis, mulai dari penemuan sumber bahan baku hingga akhir pengumpulan produk. Limbah yang dipertimbangkan meliputi semua jenis plastik (polyethylene terephthalate, polystyrene, low-density polyethylene, high-density polyethylene, polyvinyl chloride, polypropylene), dan ban. Kekhawatirannya adalah lebih dari 62% limbah padat berbasis fosil yang tidak didaur ulang masih terus bertambah dengan pengelolaan yang tidak tepat, yang mengarah pada pemborosan sumber energi dan berbagai masalah lingkungan. Berbagai penelitian dalam teknik pirolisis secara umum diklasifikasikan menjadi tiga skenario; pirolisis termal, pirolisis katalitik, dan ko-pirolisis biomassa. Studi pirolisis termal menentukan parameter yang memengaruhi proses untuk

penggunaan material yang berbeda, sedangkan pirolisis katalistik difokuskan untuk menemukan katalis terbaik yang dapat meningkatkan kualitas minyak dan mengurangi pembentukan lilin (Abnisa and Alaba, 2021).

Dengan tingkat daur ulang yang rendah dan peningkatan produksi plastik secara eksponensial, ada peningkatan pemborosan bahan plastik, dengan demikian diperlukan teknologi baru untuk pengolahan limbah plastik. Saat ini di Eropa, hanya sekitar 10% sampah plastik yang didaur ulang, sebagian besar dengan daur ulang mekanis. Metode daur ulang kimia seperti pirolisis dapat secara signifikan meningkatkan kapasitas daur ulang, karena dapat memanfaatkan campuran limbah plastik tidak seperti daur ulang mekanis. Ini juga dapat digunakan untuk mengolah limbah dari banyak material baru, seperti komposit, dan jenis baru lain hingga bisa mengurangi waktu dan biaya pemilahan sampah. Pirolisis menawarkan alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan pembakaran dan penimbunan yang tidak efisien. Saat ini, tantangan utama untuk pirolisis sampah plastik adalah tidak tersedianya dan kualitas bahan baku yang tidak konsisten, pemilahan yang tidak efisien dan mahal, pasar yang tidak ada karena Kurangnya produk standar, dan peraturan yang tidak jelas tentang pengelolaan sampah plastik. Solusi yang mungkin dapat mencakup kerja sama yang erat antara penyedia bahan baku dan konverter untuk mengamankan kuantitas dan kualitas bahan baku yang stabil. Klasifikasi cairan pirolisis sebagai produk dan bukan limbah diperlukan, dan registrasi REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) harus dilakukan untuk menstandarisasi minyak cair sebagai produk. Selain itu, keberlanjutannya harus dijaga (Qureshi et al., 2020).

Sampah plastik bukan masalah utama, masalahnya adalah cara kita menanganinya. Jadi tanggung jawab ada pada kita untuk menjadi pintar dalam menangani plastik; sebagai polusi, atau sebagai sumber daya yang ekonomis (Tulashie, Boadu and Dapaah, 2019).

Kalargaris, dkk. (2017), telah memproduksi minyak dari plastik melalui proses pirolisis cepat menggunakan bahan baku yang terdiri dari berbagai jenis plastik. Minyak dianalisis dan ditemukan bahwa sifat-sifatnya mirip dengan bahan bakar diesel. Minyak pirolisis plastik diuji pada mesin diesel injeksi langsung empat silinder yang dijalankan dengan berbagai campuran minyak pirolisis plastik dan solar dari 0% hingga 100% pada beban mesin yang berbeda dari 25% hingga 100%. Karakteristik pembakaran mesin, kinerja dan emisi gas buang dianalisis dan dibandingkan dengan operasi bahan bakar diesel. Hasil penelitian penggunaan minyak MPP mampu menjalankan mesin,

pada beban tinggi performanya mirip dengan diesel sementara pada beban yang lebih rendah, periode tunda pengapian yang lebih lama menyebabkan mesin kurang stabil. Efisiensi termal menggunakan MPP pada beban penuh sedikit lebih rendah daripada diesel, tetapi emisi NOX jauh lebih tinggi (Kalargaris, Tian and Gu, 2017a). Penelitian yang dilakukan oleh Wiriyaumpaiwong dan Jamradloedluk (2017) menggunakan pirolisis cepat sampah plastik, pada suhu 500-800°C, menghasilkan produk utama berupa cairan berwarna coklat tua (Wiriyaumpaiwong and Jamradloedluk, 2017).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kalargaris, dkk. (2018), pengaruh suhu pirolisis pada pirolisis polipropilena diselidiki, dan minyak yang dihasilkan pada suhu 700°C (PP700) dan 900°C (PP900) digunakan untuk bahan bakar mesin diesel empat silinder. Pembakaran mesin, kinerja, dan karakteristik emisi dianalisis dan dibandingkan dengan penggunaan solar. Hasilnya menunjukkan bahwa baik PP700 maupun PP900 memungkinkan pengoperasian mesin yang stabil, dengan kinerja PP900 sedikit lebih baik dalam hal efisiensi dan emisi. Namun, PP700 dan PP900 ditemukan memiliki periode penundaan pengapian yang lebih lama, periode pembakaran yang lebih lama, efisiensi termal rem yang lebih rendah, emisi NOX, UHC dan CO yang lebih tinggi, dan emisi CO₂ yang lebih rendah dibandingkan dengan operasi diesel. Meskipun demikian, penambahan sejumlah kecil solar meningkatkan kinerja keseluruhan campuran minyak, menghasilkan hasil yang sebanding dengan solar khususnya dalam kasus PP900 (Kalargaris, Tian and Gu, 2018).

Pada tahun sebelumnya Kalargaris, dkk. (2017) juga telah melakukan penelitian di mana dalam penelitian ini, minyak pirolisis diproduksi dari polietilen (LDPE700), plastik yang paling umum digunakan, dan etilena-vinil asetat (EVA900) masing-masing pada suhu pirolisis 700°C dan 900°C. Minyak kemudian diuji dalam mesin diesel empat silinder, dan kinerja, karakteristik pembakaran dan emisi dianalisis dibandingkan dengan solar. Ditemukan bahwa mesin dapat beroperasi pada kedua jenis minyak tanpa penambahan solar. LDPE700 menunjukkan karakteristik pembakaran dan efisiensi termal yang hampir sama dengan solar, dengan emisi NOX, CO dan CO₂ yang lebih rendah tetapi hidrokarbon yang tidak terbakar (UHC) lebih tinggi. Sebaliknya, EVA900 menghadirkan periode tunda pengapian yang lebih lama, efisiensi yang lebih rendah (1,5-2%), emisi NOX dan UHC yang lebih tinggi serta CO dan CO₂ yang lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan solar. Penambahan solar ke EVA900 tidak secara signifikan

meningkatkan kinerja mesin secara keseluruhan (Kalargaris, Tian and Gu, 2017c).

Pirolisis plastik 8 kg yang dilakukan oleh Venkatesan, dkk. (2018) menghasilkan 675 ml minyak pirolitik. Sifat fisika-kimia minyak plastik ditemukan berada dalam standar ASTM dengan viskositas kinematik dan residu karbon yang lebih tinggi. Pencampuran solar-MPP dilakukan pada perbandingan volume 15% (solar 85% dan minyak plastik 15%) dan 30% (solar 70% dan minyak plastik 30%). Analisis pembakaran dan uji Performa dilakukan pada kondisi tanpa beban dan beban penuh pada mesin silinder tunggal untuk memahami kelayakan penggunaan minyak plastik sebagai bahan bakar pengganti solar komersial. Pada kondisi beban penuh, tekanan di dalam silinder, laju kenaikan tekanan, laju pelepasan panas dan tekanan puncak lebih tinggi untuk MPP 30% daripada 100% diesel. Efisiensi termal untuk campuran MPP ditemukan sedikit lebih tinggi daripada solar dengan peningkatan yang signifikan dalam konsumsi bahan bakar. Karakteristik pembakaran dan kinerja mesin dipengaruhi secara signifikan oleh sifat fisika-kimia MPP (Venkatesan et al., 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Kareddula dan Puli, (2018) bertujuan untuk memanfaatkan limbah plastik sebagai bahan bakar untuk mesin berupa Minyak Pirolisis Plastik (MPP). Percobaan dilakukan dengan MPP pada mesin bensin multi silinder Maruti 800 untuk mengevaluasi kinerja dan karakteristik emisi. Bensin dicampur dengan 15% MPP dan dengan dan tanpa aditif etanol pada 5%. Performa dan hasil emisi campuran minyak plastik dibandingkan dengan campuran bahan bakar bensin dan etanol murni. Hasil eksperimen menjelaskan, bahwa efisiensi termal 15% MPP lebih rendah daripada bensin murni sementara emisi NOx meningkat secara substansial. Oleh karena itu, ditambahkan etanol sebagai aditif untuk mengontrol emisi NOx, performa mesin meningkat dibandingkan bensin murni dan 15% MPP. Emisi seperti CO, NOx dikontrol secara signifikan (Kareddula and Puli, 2018a).

Kalargaris, Tian and Gu, (2017) telah menyelidiki efek jangka panjang dari minyak pirolisis plastik (MPP) pada mesin diesel ketika digunakan sebagai bahan bakar utama. Hasilnya menunjukkan bahwa MPP adalah bahan bakar yang menjanjikan; namun, hasil menyarankan bahwa penambahan solar diperlukan untuk mendapatkan performa mesin yang dapat diterima. Dalam pekerjaan ini, campuran 75% MPP dan 25% diesel digunakan dalam mesin untuk uji durability. Mesin gagal setelah 36 jam pada campuran MPP yakni piston retak (Kalargaris, Tian and Gu, 2017d).

Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Bridjesh, Periyasamy dan Geetha (2019) merupakan upaya substitusi solar dengan *Waste Plastic Oil* (WPO) sebagai bahan bakar pada mesin diesel. Meningkatkan sifat fisika-kimia WPO atau modifikasi perangkat keras pada mesin tidak dapat meningkatkan kinerja. Namun, sifat fisika-kimia WPO ditingkatkan dengan menggunakan aditif komposit, yang merupakan campuran lesitin kedelai dan di-tert-butyl peroksida dan untuk meningkatkan gerakan udara di dalam silinder; selanjutnya untuk meningkatkan pusaran dan turbulensi, ruang bakar tipe terbuka hemispherical standar dimodifikasi menjadi ruang bakar toroidal dengan alur spherical. Hasil efek gabungan dari penambahan aditif komposit dan modifikasi ruang bakar menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik dan emisi yang diperoleh dari mesin diesel saat ini dengan mencocokkan geometri ruang bakar dan sifat fisika-kimia secara hati-hati. bahan bakar (Bridjesh, Periyasamy and Geetha, 2019).

Fokus utama dari penelitian yang dilakukan oleh Mariappan, dkk (2021) adalah untuk secara efektif mengekstrak energi yang tersedia dari limbah plastik dan memberikan kemungkinan penggantian bahan bakar solar secara maksimal. Setelah optimalisasi waktu reaksi, suhu reaksi, dan persentase katalis dihitung dengan cermat, limbah plastik low density polietilen (LDPE) diubah menjadi bahan bakar melalui proses pirolisis katalitik. Minyak plastik kemudian digunakan untuk mengoperasikan mesin diesel injeksi langsung common rail satu silinder. Parameter operasi seperti rasio kompresi, waktu injeksi dan tekanan injeksi mesin uji dioptimalkan dengan metode Taguchi. Performa mesin uji, pembakaran, dan nilai emisi pada tekanan injeksi 800 bar dengan waktu injeksi lanjutan (27° sebelum TMA) dianalisis untuk nilai tekanan efektif rata-rata. Jelas bahwa peningkatan konsentrasi minyak plastik memengaruhi proses pembakaran, dan penurunan yang signifikan dalam faktor kinerja, terutama penambahan di atas 40%. Metanol dan dietil eter (DEE) ditambahkan ke campuran P40 pada rasio yang berbeda untuk melawan reduksi. Penambahan ini menunjukkan peningkatan efisiensi termal yang signifikan yaitu 31,25% dan mengurangi tingkat hidrokarbon, nitrogen oksida, karbon monoksida menjadi 2,3, 20,28, 34,61 g/jam dan asap hingga 44% pada kondisi beban penuh. Hasil penelitian membuktikan bahwa solar dapat digantikan sebagian dengan MPP hingga maksimal 40%, dan dampak buruk penggunaan minyak plastik dapat dihilangkan dengan penggunaan bahan bakar metanol dan aditif dietil eter (Mariappan, Panithasan and Venkadesan, 2021).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Oni, dkk. (2021), karakteristik bahan bakar yang diperoleh dari limbah ban/plastik ditentukan dan dibandingkan dengan bahan bakar solar. MPP diperoleh dari polietilen tereftalat, polipropilen, High density polietilen, polistirena, Low density polietilen, dan poli (vinil klorida), selanjutnya dicampur masing-masing dengan minyak pirolisis ban Dunlop bekas, dengan perbandingan yang berbeda., untuk digunakan sebagai bahan bakar pengganti pada motor bakar. Performa mesin (Model Kirloskar, TAF 1) dipelajari berdasarkan pembakaran, efisiensi termal rem (BTE) dan karakteristik emisi ketika dijalankan. Hasil pengujian menunjukkan mesin memberikan kinerja yang lebih tinggi dalam hal BTE untuk E (33,9%) dan F (36,9%) sedangkan yang lain memberikan kinerja yang lebih rendah A-(31,9%), B (30%), C (29,7%), D (32,4%) dibandingkan dengan solar. Campuran Polystyrene/ban pyrolyzed memberikan BTE tertinggi 36,9%, dengan emisi rendah (Oni, Sanni and Olabode, 2021). Empat bahan bakar diuji dalam penelitian Ağbulut, dkk. (2021) yakni (1) 100% solar, (2) 20% limbah minyak pirolisis ban + 80% solar, (3) 10% minyak pirolisis dan 80% solar yang mengandung 10% biodiesel limbah, dan terakhir, (4) 10 % minyak pirolisis ban dan 80% solar mengandung 10% oli limbah. Pengujian dilakukan pada putaran mesin konstan 2400 rpm, dan beban mesin bervariasi dari 3 hingga 12 Nm dengan interval 3 Nm. Dalam hasil, diketahui bahwa penggunaan campuran minyak pirolisis limbah ban-bahan bakar diesel mengurangi efisiensi termal hingga 9,13% untuk campuran minyak pirolisis limbah ban-bahan bakar diesel, namun pengurangan ini ditarik kembali sebesar 7,51%, dan 3,82% dengan penambahan limbah biodiesel, dan minyak fusel, masing-masing dibandingkan dengan bahan bakar diesel.

Di sisi lain, campuran minyak pirolisis limbah ban-solar meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik rem sebesar 21,78%, namun peningkatan ini masing-masing ditarik kembali sebesar 8,89%, dan 12,57% untuk biodiesel limbah, dan minyak fusel. Peningkatan karbon monoksida untuk bahan bakar solar pirolisis limbah ban adalah 7,09% dibandingkan dengan bahan bakar solar. Namun, dengan penambahan biofuel, karbon monoksida turun sebesar 7,69% untuk biodiesel limbah, dan 19,23% untuk minyak fusel karena kandungan oksigen yang tinggi dari limbah biofuel. Selain itu, campuran bahan bakar minyak-solar pirolisis limbah ban meningkatkan nitrogen oksida sebesar 7,09%, tetapi peningkatan ini sebesar 4,64% dengan penambahan limbah biodiesel. Di sisi lain, penambahan minyak fusel mengubah tren peningkatan nitrogen oksida menjadi pengurangan 3,09% karena kadar air minyak fusel. Akibatnya, penelitian ini membuktikan bahwa limbah biofuel

mampu meningkatkan pembakaran yang buruk, emisi, dan karakteristik kinerja minyak pirolisis limbah ban biner campuran diesel dengan doping limbah biofuel, dan menyarankan campuran terner daripada minyak pirolisis limbah ban. hanya untuk mesin diesel. Selain itu, diketahui bahwa pembakaran produk limbah adalah alat yang sangat efektif untuk pengelolaan limbah dan alternatif untuk bahan bakar fosil (Ağbulut, Yeşilyurt and Sarıdemir, 2021).

Dalam studi yang dilakukan oleh Mangesh, dkk. (2020) menyelidiki pembakaran, kinerja, dan emisi minyak pirolisis polipropilen terhidrogenasi (HPPO) yang dicampur dengan solar. *Polypropylene* (PP) diubah menjadi minyak pirolisis menggunakan ZSM-5 sebagai katalis. Hidrogenasi *Polypropylene Pyrolysis Oil* (PPO) dilakukan pada tekanan 70 bar, dan suhu reaksi dipertahankan pada 350°C. HPPO yang dihasilkan memiliki sifat fisikokimia yang sesuai dengan standar EN590 (standar bahan bakar diesel Eropa). Studi GC-MS dari MPP dan HPPO menunjukkan efektivitas hidrogenasi untuk konversi lengkap alkena menjadi alkana. HPPO dicampur dengan solar dengan perbandingan 10 wt.%, 20 wt.%, 30 wt.%, dan 40 wt.%. Hasil kinerja mesin diesel untuk bahan bakar campuran menunjukkan pembakaran, kinerja, dan emisi setara dengan bahan bakar diesel murni untuk rasio pencampuran hingga 20 wt.%. Sifat fisika-kimia HPPO sesuai dengan standar EN590 untuk bahan bakar diesel. Pembakaran HPPO di mesin diesel dapat memberikan pilihan untuk pembuangan PSW yang lebih ramah lingkungan (Mangesh, Padmanabhan, Tamizhdurai, Narayanan, et al., 2020).

Sebuah pabrik pirolisis plastik skala lab telah dibangun oleh Singh, dkk. (2020) dan plastik dengan ukuran partikel $3 \pm 1,5$ cm² digunakan sebagai bahan baku. Sampel diuji di pabrik pirolisis pada suhu sekitar $500 \pm 30^\circ\text{C}$ dengan dan tanpa katalis. Rasio penambahan katalis dari 1:10 diterapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pirolisis plastik (botol) tanpa katalis memiliki rendemen fraksi cair tertinggi dengan rendemen rata-rata 24% sedangkan pirolisis dengan katalis memiliki rendemen lebih rendah (16-22%). Kantong plastik dengan katalis zeolit menghasilkan fraksi cair sebesar 22% dengan laju konversi 47%. Dimasukkannya katalis telah menurunkan rendemen tetapi telah menghasilkan minyak dengan kualitas lebih baik dibandingkan dengan sampel tanpa katalis. Kajian karakteristik mesin menunjukkan bahwa bahan bakar campuran D80PO20 (diesel 80:20: minyak pirolitik plastik) menunjukkan tekanan silinder yang sama dengan solar. Efisiensi termal yang lebih tinggi dan konsumsi energi spesifik yang lebih rendah juga diamati dari pengujian mesin menggunakan bahan bakar campuran. Bahan bakar campuran memiliki emisi

hidrokarbon yang lebih rendah sementara NO berkurang masing-masing sebesar 19% dan 26% dibandingkan dengan diesel murni (Singh, Verma and Singh, 2020).

Das, Hansdah dan Panda, (2021) telah menguji tiga bahan bakar dengan minyak pirolisis plastik (WPO) yang sama dan konsentrasi aditif bahan bakar yang berbeda (terdiri dari 80% Diesel+20%WPO, 60% Diesel + 20%WPO+20% Etanol dan 80%Diesel +20% WPO+100 ppm nano graphene) disiapkan untuk uji mesin. Penambahan etanol dalam campuran bahan bakar diesel campuran WPO memberikan kontribusi peningkatan efisiensi termal, penurunan konsumsi bahan bakar spesifik, suhu gas buang yang lebih tinggi dan efisiensi exergetic yang lebih rendah dibandingkan dengan diesel. Nano graphene yang ditambahkan ke diesel campuran WPO meningkatkan energinya bersama dengan nilai efisiensi eksergi dibandingkan dengan campuran bahan bakar lainnya di bawah kondisi beban operasi yang lebih tinggi. Eksergi bahan bakar untuk bahan bakar ini meningkat sebesar 18,57% dibandingkan dengan solar pada beban tertinggi. Namun, eksergi pemusnahan dan eksergi buang menurun masing-masing sebesar 34,97% dan 14,03% dibandingkan dengan solar pada beban tertinggi. Selain itu, efisiensi exergetic ditingkatkan sebesar 18,9% dari diesel pada kondisi beban maksimum (Das, Hansdah and Panda, 2021).

Pada penelitian Singh, dkk. (2020) dilakukan pirolisis nonkatalitik limbah plastik campuran pada suhu 450°C untuk mendapatkan minyak pirolitik bermutu tinggi yang memiliki komposisi yang mirip dengan bahan bakar minyak bumi seperti bensin dan solar. Sifat fisik MPP dianalisis, dan analisis senyawa dilakukan dengan GC-MS. Selanjutnya FTIR MPP dan solar dianalisis dan dibandingkan. Lima rasio yang berbeda dari 10, 20, 30, 40 dan 50% MPP dengan solar dalam campuran digunakan sebagai bahan bakar dalam mesin diesel untuk menentukan kinerja dan karakteristik mesin. Kehadiran MPP yang lebih tinggi dalam campuran meningkatkan efisiensi termal (BTE) dan mengurangi konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dengan peningkatan beban. Kehadiran MPP menghasilkan pelepasan panas yang tinggi dan pengapian yang tertunda sehingga menghasilkan tekanan di dalam silinder yang tinggi. Selanjutnya jumlah senyawa teroksigenasi yang tinggi dalam MPP membantu mengurangi emisi dari pembakaran. Pemanfaatan MPP dengan solar hingga 50% dalam campuran dapat digunakan pada mesin diesel dengan sedikit peningkatan emisi CO pada beban yang lebih tinggi (Singh et al., 2020). Minyak yang diperoleh dari pirolisis sampah plastik dapat

digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk mesin diesel tanpa melakukan modifikasi pada mesin. WPPO (Waste Plastic pyrolysis Oil) yang dicampur dengan DEE (dietil eter) 5% dan 10% digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin DI berpendingin air silinder tunggal dan ditemukan karakteristik kinerja, emisi, dan pembakarannya. Hasil percobaan menunjukkan penurunan kadar asap dengan minyak pirolisis limbah plastik baseline. BTE (efisiensi termal rem) meningkat jika dibandingkan dengan minyak pirolisis plastik murni dan solar. Polutan seperti CO (karbon monoksida) dan NO_x (nitrous oxide) berkurang dalam campuran. Diamati bahwa penambahan oksigenat telah meningkatkan proses pembakaran dan mengurangi emisi. Penyelidikan mengungkapkan bahwa pencampuran DEE dengan minyak plastik meningkatkan angka Cetana yang lebih tinggi dari solar (Devaraj, Robinson and Ganapathi, 2015).

Penelitian kinerja dan emisi dari mesin diesel empat langkah DI silinder tunggal oleh Das, dkk. (2020) menggunakan Minyak pirolisis plastik (WPO) yang berasal dari pirolisis limbah plastik menggunakan Zeolit-A sebagai katalis. Telah dilakukan pengujian beban mesin dengan menggunakan WPO dan selanjutnya WPO sebesar 10%, 20%, dan 30% dalam proporsi volume dicampur dengan solar sebagai bahan bakar. Performa mesin uji dalam hal efisiensi termal rem ditemukan sedikit lebih tinggi dan konsumsi bahan bakar spesifik rem secara komparatif paling rendah untuk campuran 20% WPO-solar daripada solar murni. Emisi NO_x dan HC ditemukan lebih rendah di bawah kondisi beban rendah dan menjadi lebih tinggi dengan meningkatkan beban dibandingkan dengan solar. Eksergi bahan bakar meningkat secara signifikan setelah pencampuran WPO dengan solar murni, tetapi efisiensi eksergetik dari bahan bakar campuran mengikuti tren sebaliknya. Namun, peningkatan beban mesin meningkatkan efisiensi exergetic. Bahan bakar campuran 20% WPO-diesel ditemukan cocok untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk mesin diesel (Das et al., 2020).

Kumar, dkk. (2013) telah menguji kinerja dan analisis emisi campuran minyak pirolisis limbah plastik yang diperoleh dengan pirolisis katalitik limbah polietilen densitas tinggi dengan diesel pada motor diesel dengan beban yang bervariasi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa efisiensi termal rem pada semua kondisi beban lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar diesel, suhu gas buang meningkat dengan peningkatan beban mesin. BSFC meningkat dengan meningkatnya rasio campuran WPO dan menurun dengan meningkatnya beban mesin. Efisiensi mekanis meningkat dengan

meningkatkan daya rem untuk semua campuran bahan bakar. Emisi NO_x dan emisi CO meningkat dengan meningkatnya persentase limbah oli plastik dalam campuran, emisi NO_x menurun sedangkan emisi CO meningkat dengan meningkatnya beban mesin. Emisi hidrokarbon yang tidak terbakar berkurang dengan meningkatnya beban mesin dan meningkat dengan meningkatnya persentase limbah oli plastik dalam campuran. Emisi karbon dioksida pada bahan bakar campuran lebih rendah daripada diesel untuk hampir semua beban dan semua campuran (Kumar et al., 2013).

Penelitian yang dilakukan oleh Mangesh, dkk. (2020) membandingkan sifat minyak pirolisis yang berasal dari HDPE (High-density polyethylene), LDPE (Low-density polyethylene), PP (Polypropylene) dan styrene setelah digunakan untuk kesesuaiannya sebagai bahan bakar mesin diesel. Ditemukan bahwa sifat fisika-kimia minyak pirolisis polipropilen (PPO) ditemukan lebih unggul daripada minyak pirolisis HDPE, LDPE, dan stirena. GC-MS (Gas chromatography-mass spectrometry) dan FT-IR (Fourier transform-infrared spectroscopy) diambil untuk minyak pirolisis HDPE, LDPE, PP, dan stirena dan dibandingkan dengan solar. MPP menunjukkan senyawa rantai bilangan karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan ketiga sampah plastik lainnya. MPP dipilih untuk uji kinerja dan emisi mesin diesel. MPP dicampur dengan perbandingan 5%, 10% dan 15% dengan solar. Analisis pembakaran menunjukkan peningkatan tekanan silinder dibandingkan dengan nilai diesel. Tingkat pelepasan panas (HRR) jauh lebih tinggi daripada diesel. Baik tekanan silinder dan nilai HRR untuk MPP meningkat seiring dengan meningkatnya rasio campuran. Hasil emisi menunjukkan peningkatan emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC) dan oksida Nitrogen (NO_x). (Mangesh, Padmanabhan, Tamizhdurai and Ramesh, 2020).

Hürdoğan, dkk. (2017) melaporkan studi tentang kinerja dan karakteristik emisi dari mesin diesel empat langkah, empat silinder, yang dijalankan dengan berbagai campuran minyak pirolisis limbah ban Waste Tire Pyrolysis Oil (WTPO) dengan bahan bakar diesel. Sifat bahan bakar, kinerja mesin, dan emisi gas buang WTPO dan campurannya dianalisis dan dibandingkan dengan bahan bakar diesel minyak bumi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa campuran WTPO-diesel menunjukkan kinerja yang serupa dengan bahan bakar diesel dalam hal torsi dan output daya dari mesin uji. Ditemukan bahwa campuran minyak pirolisis limbah ban WTPO10 dapat digunakan secara efisien pada mesin diesel tanpa modifikasi mesin (Hürdoğan et al., 2017).

Hasil penelitian Rajesh dan Rajesh, (2021) menunjukkan bahwa mesin tri-charged dapat berjalan menggunakan minyak pirolisis limbah plastik yang beroperasi pada kapasitas beban penuh, menghadirkan kinerja yang baik dibandingkan dengan mesin diesel konvensional. Performa mesin terbaik ditemukan pada MPP-20 dalam kombinasi dengan boosting tri-charged. Namun, lebih banyak persentase pencampuran cenderung meningkatkan emisi HC dan CO, dengan penalti efisiensi bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi tri-charged adalah teknologi yang menjanjikan dan minyak pirolisis merupakan bahan bakar alternatif untuk aplikasi mesin tertentu pada kondisi operasi tertentu (Rajesh and Rajesh, 2021).

Penyelidikan eksperimental telah dilakukan oleh Kaimal dan Vijayabalan, (2015) untuk menilai efek penggunaan Plastic Oil (PO) dalam mesin diesel DI. Minyak plastik disintesis dari sampah plastik, dikumpulkan dari TPA kota, dengan proses pirolisis. PO25 (minyak plastik 25% dan volume diesel 75%), campuran PO 50 dan PO75 dibuat menggunakan minyak plastik dan bahan bakar diesel referensi. Dalam penelitian ini karakteristik pembakaran dari mesin diesel kecepatan konstan dipelajari di pada kondisi pembebanan bervariasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal dari semua campuran dan minyak plastik lebih rendah dari solar pada semua kondisi pembebanan. Pada beban penuh, tekanan silinder puncak, pelepasan panas, durasi pembakaran dan penundaan penyalaan oli plastik dan campurannya lebih tinggi daripada solar. Tekanan puncak mesin pada penggunaan PO murni meningkat sekitar 6% tetapi menunjukkan efisiensi termal yang buruk. Berdasarkan hasil pengujian dapat diketahui bahwa karakteristik pembakaran sangat dipengaruhi oleh sifat fisik bahan bakar (Kaimal and Vijayabalan, 2015). Kumar, dkk. (2020) mengekstraksi limbah padat, minyak cair dan gas hidrokarbon yang mudah terbakar, HDPE dipirolisis total pada 330-490°C selama 2-3 jam. Perbandingan sifat bahan bakar untuk spesifikasi bahan bakar yang berbeda telah menunjukkan bahwa bahan bakar hasil pirolisis memenuhi semua kriteria. Karakteristik bahan bakar yang mudah terbakar meliputi viskositas kinematik (40 bar C) sebesar 1,98 cSt, panjang 0,75 gm/cc, kandungan sulfur 0,25 (wt%), dan residu karbon 0,5% dan nilai kalor yang tinggi merupakan perbaikan substansial dalam diesel konvensional (Kumar, Radjarejesri and Jawahar, 2020).

Percobaan yang dilakukan oleh Kareddula dan Puli, (2018) menggunakan MPP sebagai bahan bakar pada mesin bensin multi silinder Maruti 800 untuk mengevaluasi kinerja dan karakteristik emisi. Bensin dicampur dengan 15%

MPP dan dengan dan tanpa aditif etanol pada 5%. Performa dan hasil emisi campuran minyak plastik dibandingkan dengan campuran bahan bakar bensin dan etanol murni. Hasil eksperimen menjelaskan, bahwa efisiensi termal rem 15MPP lebih rendah daripada bensin murni sementara emisi NO_x meningkat secara substansial. Oleh karena itu, ditambahkan etanol sebagai aditif untuk mengontrol emisi NO_x, performa mesin meningkat dibandingkan bensin murni dan 15 MPP. Emisi seperti CO, NO_x dikontrol secara signifikan (Kareddula and Puli, 2018b).

Studi yang dilakukan Song, dkk. (2021), mengungkapkan pengaruh penuaan termal pada komponen bahan bakar minyak pirolisis dari limbah plastik khas, termasuk polietilen (PE), polipropilen (PP), dan polivinil klorida (PVC). Sampel plastik terus dipanaskan dalam oven penuaan pada 100 °C untuk mensimulasikan penuaan termal. Komposisi volatil pirolisis dari sampel plastik segar dan sampel plastik tua dipelajari secara komparatif dengan gas kromatografi pirolisis/spektrometri massa (Py-GC/MS) pada 500 °C. Hasil analisis komposisi volatil menunjukkan bahwa penuaan termal mengubah komposisi minyak pirolisis, dan pengaruhnya sangat tergantung pada jenis plastik. Untuk PE dan PP, yang mengalami pemotongan acak setelah perlakuan penuaan termal, pengaruh penuaan termal pada fraksi minyak berat lebih jelas daripada pada fraksi minyak ringan dan minyak diesel. Untuk sampel PVC, proses penuaan termal menyebabkan cacat struktural dan mengubah warna PVC menjadi kuning muda. Setelah penuaan termal 128 jam, tingkat penurunan berat badan maksimum menurun sebesar 35,8%, dan fraksi komponen C₅-C₉ dan aromatik pertama kali meningkat dan kemudian menurun. Nilai maksimum adalah $80,21 \pm 1,62\%$ dan $73,69 \pm 0,73\%$, dan nilai minimum masing-masing adalah $65,58 \pm 2,63\%$ dan $63,98 \pm 0,39\%$ (Song, Sun and Huang, 2021). Penelitian eksperimental oleh Bridjesh, dkk. (2018) merupakan upaya untuk menggantikan solar setidaknya 50% dengan minyak limbah (WPO) minyak bersama 2-metoksi etil asetat (MEA) dan dietil eter (DEE) sebagai aditif. Bahan bakar uji yang dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah WPO, 50D50W (50%Diesel + 50%WPO), 50D40W10MEA (50%Diesel + 40%WPO + 10%MEA) dan 50D40W10DEE (50%Diesel + 40%WPO + 10%DEE). Hasil pengujian dibandingkan dengan diesel. Peningkatan efisiensi termal rem dan pengurangan konsumsi bahan bakar spesifik rem terlihat pada komposisi 50D40W10MEA, serta pengurangan emisi hidro karbon, karbon monoksida, dan asap. 50D40W10DEE menunjukkan pengurangan emisi NO_x sedangkan 50D40W10MEA hampir tidak berdampak (Bridjesh et al., 2018).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kalargaris, dkk. (2017) minyak pirolisis plastik diproduksi melalui proses pirolisis cepat menggunakan bahan baku yang terdiri dari berbagai jenis plastik. Minyak dianalisis dan ditemukan bahwa sifat-sifatnya mirip dengan bahan bakar diesel. Minyak pirolisis plastik diuji pada mesin diesel injeksi langsung empat silinder yang berjalan pada berbagai campuran minyak pirolisis plastik dan bahan bakar diesel dari 0% hingga 100% pada beban mesin yang berbeda dari 25% hingga 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin mampu berjalan menggunakan minyak pirolisis plastik pada beban tinggi yang menghadirkan kinerja yang mirip dengan diesel sementara pada beban yang lebih rendah, periode tunda pengapian yang lebih lama menyebabkan masalah stabilitas. Efisiensi termal rem untuk minyak pirolisis plastik pada beban penuh sedikit lebih rendah daripada diesel, tetapi emisi NOX jauh lebih tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa minyak pirolisis plastik merupakan bahan bakar alternatif yang menjanjikan untuk aplikasi mesin tertentu pada kondisi operasi tertentu (Kalargaris, Tian and Gu, 2017b).

Studi yang dilakukan Damodharan, dkk. (2017) menunjukkan ekstraksi dan karakterisasi limbah minyak plastik (WPO) yang diperoleh dengan pirolisis dalam reaktor batch skala laboratorium, kemudian diteliti juga efek penambahan komponen teroksigenasi terbarukan dalam bentuk n-butanol (B). Tiga campuran dengan Diesel (D), D50-WPO40-B10, D50-WPO30-B20 dan D50-WCO20-B30 disiapkan untuk memanfaatkan komponen daur ulang (WPO hingga 40%) dan komponen terbarukan (n-butanol hingga 30 %). Performa dan emisi mesin diesel DI ketika diisi bahan bakar dengan campuran ini kemudian dianalisis dibandingkan dengan WPO dan operasi diesel murni. Hasil menunjukkan bahwa penambahan n-butanol menghasilkan emisi asap yang lebih rendah dan emisi HC yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan solar. Penambahan 10% n-butanol untuk campuran WPO/D mengurangi emisi NOx dengan baik jika dibandingkan dengan WPO dan diesel. Efisiensi termal rem (BTE) mesin meningkat dengan meningkatnya fraksi n-butanol dalam campuran bila dibandingkan dengan WPO. Konsumsi bahan bakar campuran ternary ditemukan lebih baik daripada WPO. Campuran D50-WPO40-B10 menghadirkan emisi NOx dan asap yang lebih sedikit dan peningkatan kinerja mesin jika dibandingkan dengan diesel. Studi mengungkapkan bahwa n-butanol bisa menjadi aditif yang layak untuk mesin diesel yang dioperasikan dengan WPO yang diekstraksi dari limbah plastik campuran (Damodharan et al., 2017).

Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Ayodhya, dkk. (2018) menunjukkan sedikit penurunan performa mesin saat beroperasi dengan menggunakan campuran minyak pirolisis plastik, terutama secara keseluruhan karena viskositasnya yang lebih tinggi dan nilai kalor yang lebih rendah. Peningkatan marginal dalam pembuangan emisi yang diatur seperti HC, CO dan jelaga terlihat baik untuk campuran plastik. Percobaan dilakukan untuk lima kondisi pembebanan berbeda yang bervariasi dari 0% hingga 80% dengan langkah masing-masing 20% dan menemukan bahwa campuran limbah plastik-diesel dapat berhasil digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada kendaraan diesel tanpa modifikasi pada mesin (Ayodhya et al., 2018).

Pirolisis sampah plastik campuran dilakukan oleh Pal, dkk. (2019) pada suhu 400C-550C dalam reaktor fixed bed. Sifat fisika kimia seperti densitas, nilai kalor, viskositas, titik awan, titik tuang, titik nyala bahan bakar plastik dan campurannya dengan solar (PF10,PF20,PF30) dianalisis menggunakan metode standar dan ditemukan di bawah standar ASTM. Untuk melihat pengaruh waktu injeksi terhadap kinerja dan emisi, mesin diesel satu silinder dijalankan dengan campuran bahan bakar plastik pada dua sudut yang berbeda (10° retard dan 8° advance sebelum TMA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi lanjut BTE, CO, UHC, CO₂ dan asap meningkat sedangkan BSFC dan NO_x menurun dengan meningkatnya beban. (pal et al., 2019).

Minyak yang dihasilkan dari pirolisis plastik dianalisis oleh Kalargaris, dkk. (2017) dan ditemukan memiliki sifat yang mirip dengan bahan bakar diesel. Minyak pirolisis plastik kemudian diuji dalam mesin diesel injeksi langsung empat silinder, dan karakteristik pembakaran, kinerja dan emisinya dianalisis dan dibandingkan dengan diesel mineral. Mesin ditemukan bekerja lebih baik pada beban yang lebih tinggi. Temperatur pirolisis memiliki pengaruh yang signifikan, karena minyak yang diproduksi pada temperatur yang lebih rendah menghasilkan efisiensi termal rem yang lebih tinggi dan periode tunda penyalan yang lebih pendek pada semua beban. Minyak ini juga menghasilkan emisi NO_x, UHC, CO dan CO₂ yang lebih rendah daripada minyak yang diproduksi pada suhu yang lebih tinggi, namun emisi solar lebih rendah (Kalargaris, Tian and Gu, 2017f). Penelitian tentang efek penggunaan jangka panjang dari minyak pirolisis plastik (MPP) pada mesin diesel telah dilakukan oleh Kalargaris, dkk. (2017). Meski pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa MPP adalah bahan bakar yang menjanjikan; namun, hasil menyarankan bahwa penambahan solar diperlukan untuk mendapatkan performa mesin yang dapat diterima. Dalam pekerjaan ini, campuran 75%

MPP dan 25% diesel digunakan dalam mesin untuk uji umur panjang. Mesin gagal setelah 36 jam pada campuran MPP ketika piston retak. Karakteristik pembakaran, kinerja, dan emisi mesin dipantau selama uji umur panjang yang mengungkapkan bahwa kinerja mesin menurun secara dramatis pada jam-jam terakhir pengoperasian. Selain itu, analisis suhu gas buang selama momen kegagalan menunjukkan bahwa alasan yang mendasari piston retak adalah kegagalan injektor. Setelah mesin dibuka dan bagian-bagian mesin diselidiki menunjukkan keausan yang berlebihan. Minyak pelumas dianalisis dan dikonfirmasi keausan meningkat karena kontaminasi tinggi. Akhirnya, endapan dari kepala piston dikumpulkan dan dianalisis untuk mengungkapkan bahwa pembakaran tidak sempurna telah terjadi (Kalargaris, Tian and Gu, 2017e).

Jha, dkk. (2021) mengumpulkan sampah plastik dari sampah kota kemudian di sortir berdasarkan jenisnya seperti (LDPE, HDPE, PVC, dll.) dan dicacah menjadi ukuran yang hampir seragam. Katalis ditambahkan dalam plastik modern dan dipanaskan 320-600°C dalam tekanan tinggi pada reaktor mini prototipe untuk proses pirolisis. Sifat fisika-kimia produk diuji dan hasilnya dibandingkan dengan minyak bumi. Ditemukan beberapa beberapa sifat fisika-kimia yang hampir sama dan biaya pengolahan sangat murah dibandingkan dengan produk minyak bumi yang sebenarnya (Jha and Kannan, 2021).

Miandad, dkk. (2017) menguji pengaruh berbagai jenis sampah plastik seperti *Polystyrene* (PS), *Polyethylene* (PE), *Polypropylene* (PP) dan *Polyethylene Terephthalate* (PET) terhadap rendemen dan kualitas minyak cair yang dihasilkan dari proses pirolisis. Sebuah reaktor pirolisis skala pilot kecil digunakan untuk tujuan ini, dan dioperasikan pada suhu optimum dan waktu retensi masing-masing 450°C dan 75 menit. Limbah plastik PS menunjukkan produksi minyak cair paling banyak (80,8%) dengan produksi gas paling sedikit (13%) dan arang (6,2%) dibandingkan dengan jenis plastik lainnya. Minyak cair dari semua jenis plastik sebagian besar mengandung senyawa aromatik dengan beberapa alkana dan alkena.

Tabel 1.2: Hasil MPP dari pirolisis plastik menurut beberapa referensi

Plastik	Pirolisis	Temperatur (°C)	Rendemen (wt%)	Lainnya	Referensi
PS PP LDPE HDPE	Fixed bed	50-600	53,4 20 25,1 16	wax	(Mondal, 2023)

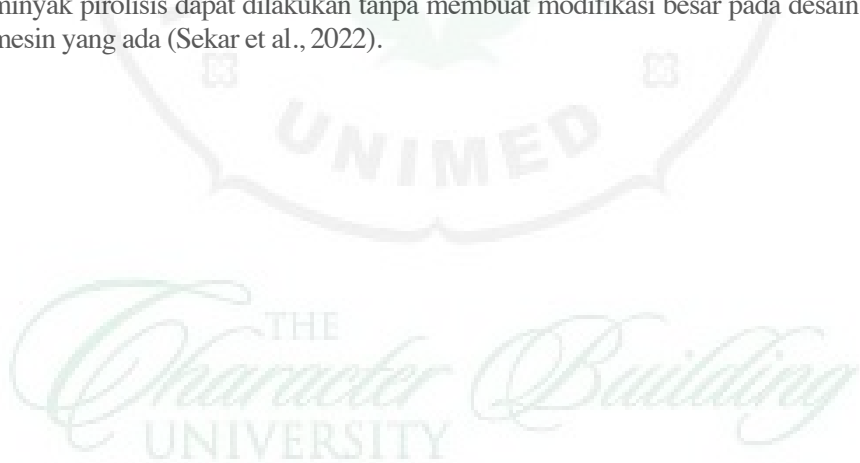
Plastik	Pirolisis	Temperatur (°C)	Rendemen (wt%)	Lainnya	Referensi
HDPE	Slow	300-400	80,88	Nitrogen	(Ahmad <i>et al.</i> , 2015)
HDPE	Fast	550	84,7	-	(Marcilla, Beltrán and Navarro, 2009)
HDPE	Fast	650	68,5	-	(Mastral <i>et al.</i> , 2001)
LDPE	Slow	<200	18	-	(Mastral <i>et al.</i> , 2001)
LDPE	Slow	300-450	86,5	135 min	(Ademiluyi and Akpan, 2007)
LDPE	Fast	500	95	20 min	(Bagri and Williams, 2002)
PVC	Slow	220-520	0,45-12,79	10 °C/min	(Bagri and Williams, 2002)
PET	Slow	400-500	26-28	10 °C/min	(Çit <i>et al.</i> , 2010)
PS	Slow	360-460	91,65	Nickel/Silica catalyst	(Maryudi, Salamah and Aktawan, 2018)
Mixed plastic	Fast	730	48,4	-	(Kaminsky, Schlesselman and Simon, 1996)
PE	Flash	800	13,6	-	(del Remedio Hernández, García and Marcilla, 2007)
PE	Flash	800	6,8	HZSM-5 catalyst	(del Remedio Hernández, García and Marcilla, 2007)
HDPE	Fast	640-850	68,53	3-4 g/min	(Mastral <i>et al.</i> ,

Plastik	Pirolisis	Temperatur (°C)	Rendemen (wt%)	Lainnya	Referensi
					2003)
LDPE	Flash	780-825	5,0-8,0	0,3-0,6 s	(Milne, Behie and Berruti, 1999)
LDPE	Slow	450	3,2	10 °C/min	(Chaala, Darmstadt and Roy, 1997)
PP	Slow	430	91,5	> 20 min	(Pinto <i>et al.</i> , 1999)
HDPE	Flash	500-900	14,7		(Artetxe <i>et al.</i> , 2012)
PE	Slow	450-515	37,1 – 38,3	FCC catalyst	(Artetxe <i>et al.</i> , 2012)

Minyak cair hasil pirolisis PS mengandung stirena (48,3%), etilbenzena (21,2%) dan toluena (25,6%). Minyak cair pirolisis ditemukan memiliki rentang viskositas dinamis (1,77-1,90 mPa•s), viskositas kinematik (1,92–2,09 cSt), densitas (0,91-0,92 g/cm³), titik tuang (-11--60°C), titik beku (-15--65 °C), titik nyala (28.1-30.2°C) dan nilai kalor tinggi (HHV) (41,4-41,8 MJ/kg) mirip dengan solar konvensional, sehingga berpotensi sebagai energi alternatif sumber pembangkit listrik. Pemutakhiran minyak cair menggunakan metode pasca-perawatan yang berbeda seperti penyulingan, pemurnian dan pencampuran dengan diesel konvensional diperlukan untuk membuatnya cocok sebagai bahan bakar transportasi karena adanya senyawa aromatik yang tinggi. Perolehan kembali senyawa aromatik khususnya stirena dari minyak pirolisis dapat menjadi sumber potensial bahan kimia prekursor dalam industri untuk polimerisasi monomer stirena (R Miandad *et al.*, 2017).

Pirolisis yang dilakukan oleh Tulashie, dkk. (2019) dalam reaktor *fixed bed* pada suhu 350°C dengan aliran gas nitrogen 200 ml/menit selama 2 jam, waktu perengkahan 40 menit. Produk kasar yang dihasilkan dianalisis dengan berbagai metode analisis seperti FT-IR, GC-MS, dan Kinematic Viscosity. Hasil analisis spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FT-IR) menunjukkan bahwa bahan bakar minyak yang dihasilkan terdiri dari 21 gugus fungsi yang merupakan campuran dari gugus senyawa alifatik dan aromatik; senyawa alifatik adalah yang paling banyak. Juga menurut hasil GC-MS yang diperoleh, bahan bakar minyak mengandung zat yang berada dalam kisaran bahan bakar diesel (C12-C24), dengan alkohol behenic sebagai senyawa berpuncak tertinggi. Bahan bakar minyak mentah memiliki viskositas

kinematik $1.036 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$, yang menurun dengan meningkatnya suhu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan bakar minyak mentah yang diperoleh memiliki kemungkinan untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk berbagai keperluan di masa depan. Dalam hal ini, pirolisis sampah plastik campuran yang diteliti menyajikan cara yang efisien, bersih, dan efektif untuk menghilangkan sampah plastik dari lingkungan. Sampah plastik bukan masalah utama, cara kita menanganinya juga diperhitungkan. Jadi tanggung jawab ada pada kita untuk menjadi pintar dalam menangani plastik; sebagai polusi, atau sebagai sumber daya yang ekonomis (Tulashie, Boadu and Dapaah, 2019). Di antara kemajuan, tantangan, dan hambatan dalam produksi minyak pirolisis dari limbah plastik, proses termal dan katalitik adalah metode potensial untuk menghasilkan minyak. Sejak produksi plastik global meningkat selama bertahun-tahun, akumulasi sampah plastik meningkat. Dengan demikian, mengubah sampah plastik menjadi energi yang bermanfaat sangat penting untuk menghindari masalah lingkungan. Selain itu, penggunaan minyak pirolisis dapat dilakukan tanpa membuat modifikasi besar pada desain mesin yang ada (Sekar et al., 2022).





Bab 2

Bahan Baku Biodiesel

lemak hewani, minyak nabati dan minyak mikroba. Pemilihan bahan baku merupakan langkah kunci dalam produksi biodiesel, yang memengaruhi berbagai faktor, termasuk biaya, rendemen, komposisi, dan kemurnian biodiesel yang dihasilkan. Bahan baku dapat diseleksi berdasarkan ketersediaan dan jenis sumbernya (dapat dimakan, tidak dapat dimakan, atau limbah) (Ambat, Srivastava and Sillanpää, 2018).

2.1 Minyak Nabati dapat Dimakan (Edibel Vegetable Oil)

Biodiesel generasi pertama dihasilkan dari bahan baku yang dapat dimakan, contoh bahan baku yang dapat dimakan adalah minyak lobak, minyak kedelai, minyak kelapa, minyak jagung, minyak sawit, minyak mustard, minyak zaitun, minyak beras, dll. Penggunaan bahan baku yang dapat dimakan untuk produksi biodiesel cukup populer di awal era biodiesel. Ketersediaan tanaman dan prosedur konversi yang relatif mudah adalah keuntungan utama dari bahan baku ini. Namun disisi lain risiko keterbatasan pasokan makanan adalah kerugian utama dalam penggunaan bahan baku ini yang juga bisa meningkatkan harga produk makanan. Kemampuan beradaptasi dengan

kondisi lingkungan, biaya tinggi, dan luas areal budidaya yang terbatas juga menjadi kendala untuk produksi biodiesel dari bahan baku yang dapat dimakan (D. Singh, Sharma, S. L. Soni, et al., 2020).

2.2 Minyak Nabati Tidak Dapat Dimakan (Non Edibel Oil)

Biodiesel generasi kedua dihasilkan dari bahan baku yang tidak dapat dimakan, contoh bahan baku yang tidak dapat dimakan adalah minyak Mimba, minyak jarak, minyak Nagchampa, minyak Karanja, minyak *Calophyllum inophyllum*, minyak biji karet, minyak *Mahua indica* dll (D. Singh, Sharma, S. L. Soni, et al., 2020). Pemanfaatan non-edible oil sebagai bahan baku akan meminimalkan biaya produksi biodiesel karena sumber bahan baku yang lebih murah. Umumnya, biaya penanaman untuk tanaman minyak non-pangan jauh lebih murah daripada tanaman pangan. Hal ini karena budidaya tanaman pangan membutuhkan nutrisi tanah yang tinggi, sistem irigasi yang baik, dan perawatan intensif untuk menjaga nutrisi dan kelembaban tanah. (Abdul Hakim Shaah et al., 2021). Produksi biodiesel dari bahan baku yang tidak dapat dimakan, seharusnya lebih diutamakan agar tidak menyebabkan kenaikan harga minyak nabati dan mengganggu keseimbangan pasokan makanan (Yaşar, 2020a).

2.3 Minyak Limbah atau Minyak Bekas

Minyak limbah atau minyak bekas atas disebut juga minyak jelantah WCO (Waste Cooking Oil) juga bisa menjadi bahan baku biodiesel. Biasanya diperoleh dari restoran atau sisa rumah tangga. Limbah minyak dapat dikumpulkan dari sektor rumah tangga dan industri di mana semua jenis limbah lipid diproduksi dan harus dibuang. WCO dikumpulkan dari produsen makanan dan industri penggorengan seperti pabrik pengolahan kentang di pabrik makanan ringan, perusahaan makanan cepat saji, restoran, industri katering dan dari semua rumah, di mana penggorengan digunakan untuk persiapan makanan. Sebagai contoh, restoran, dan hotel di AS saja

menghasilkan lebih dari 11 miliar liter WCO, setiap tahun, yang sebagian besar dibuang (Hajjari et al., 2017).

2.4 Lemak Hewani

Produksi biodiesel dari limbah lemak hewan memiliki potensi besar karena bahan baku ini tidak bersaing dengan industri makanan dan mengarah pada pengurangan limbah secara global (Sander et al., 2018). Lemak hewani umumnya terbentuk dari campuran trigliserida TAG, protein, air, dan beragam mineral. Mayoritas limbah lemak berasal dari pengolahan limbah perkotaan, industri makanan pertanian (pengawetan, pengalengan, rumah potong, perusahaan susu, dan lain-lain, serta limbah perangkap lemak restoran (Ndiaye et al., 2020).

2.5 Micro Algae

Alga adalah tanaman air bersel satu, dengan kemungkinan untuk menghasilkan sejumlah besar lipid yang cocok untuk produksi biodiesel (D. Singh, Sharma, S L Soni, et al., 2020). Biodiesel yang berasal dari mikroalga telah dianggap sebagai pengganti yang kuat untuk diesel konvensional terutama karena kandungan lipidnya yang tinggi dan berkelanjutan. Ada beragam spesies mikroalga dengan kandungan lipid yang bervariasi yang dapat tumbuh subur di lingkungan yang berbeda. Ada berbagai faktor yang memengaruhi perbanyakan sel mikroalga selain teknik budidaya. Biomassa utama mikroalga yang dapat dikonversi menjadi biodiesel adalah lipid, kandungan lipidnya dapat lebih dioptimalkan dengan menginduksi stres nutrisi dan lingkungan pada mikroalga. Mengoptimalkan produksi lipid dapat menurunkan biaya produksi. Sel-sel mikroalga harus diproses dan lipid yang diekstraksi harus ditransesterifikasi menjadi biodiesel (Chhandama et al., 2021). Lipid yang terakumulasi pada alga selama kekurangan nitrogen mengandung asam lemak jenuh yang lebih tinggi yang dapat membuat biodiesel dengan sifat bahan bakar yang lebih baik dan stabilitas oksidatif yang lebih tinggi (Srinuanpan et al., 2018). Namun Penggunaan lipid mikroalga dalam produksi komersial biodiesel masih belum ekonomis dan terhambat

oleh berbagai hambatan, termasuk pemanenan biomassa mikroalga (Cui et al., 2020).



Bab 3

Biji Karet (*Hevea brasiliensis*) Sebagai Bahan Baku Biodiesel

3.1 Potensi Biji Karet Sebagai Bahan Baku Biodiesel

Dengan tumbuhnya kesadaran dan kepekaan terhadap energi hijau, ini menjadi peluang yang baik untuk mempromosikan pohon karet sebagai sumber daya alternatif untuk pembangunan berkelanjutan dan produksi yang lebih bersih. Dalam beberapa dekade terakhir, fungsi pohon karet hanya untuk diambil getahnya saja. Produk sampingan pohon karet yang paling terabaikan namun melimpah adalah bijinya (Bhattacharjee et al., 2021), (Melvin Jose et al., 2011).

Minyak biji karet merupakan sumber potensial untuk produksi biodiesel (Sabarish, Sebastian and Muraleedharan, 2016). *Hevea brasiliensis*, umumnya dikenal sebagai biji karet, adalah salah satu bahan baku yang non-edibel dengan biaya rendah, yang ditemukan berlimpah di Amazon. Biji Karet memiliki kandungan minyak yang tinggi (hingga 89,4%) dan sekitar 80,5% minyaknya berupa asam lemak tak jenuh (unsaturated fatty acids) (Arumugam, Thulasidharan and Jegadeesan, 2018). Indonesia memiliki areal

penanaman karet terluas di dunia (Azizan et al., 2021). Menurut data Direktorat Jenderal Perkebunan Indonesia pada tahun 2021 luas perkebunan karet Indonesia mencapai lebih dari 3,6 juta hektar (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2021).

Tabel 3.1: Potensi Minyak Nabati dan Biodiesel dari Biji Karet (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2021), (Le et al., 2018), (Ahmad et al., 2014).

Wilayah	Luas (Hektar)	Produksi biji (ton/thn)	Minyak nabati (ton/thn)	Biodiesel (ton/thn)
Asia tenggara	7,5 juta	11,6 juta	5,8 juta	5,2 juta
Indonesia	3,6 juta	5,5 juta	2,75 juta	2,4 juta
Sub-sahara Afrika	717 ribu	107 ribu	17 ribu	16 ribu

Di negara-negara Asia Tenggara, di mana 77% dari total karet, alam dunia diproduksi, biji pohon karet (*Hevea brasiliensis*) saat ini dibuang sebagai limbah biomassa. Berdasarkan luas areal budidaya perkebunan karet di wilayah ini yakni 7,5 juta hektar, dari tabel 3.1, diperkirakan menghasilkan biji karet lebih dari 11,6 juta ton/tahun (Le et al., 2018). Di negara-negara Sub-saharan Africa/SSA diperkirakan memiliki 717.750ha pohon karet yang setara dengan 251 juta pohon yang dapat menghasilkan setiap tahun, sekitar 107.662 ton benih karet, 17.947,339 ton minyak biji karet dan setara dengan 16.691,025 ton biodiesel (Onoji et al., 2016)

Karena kernel biji mengandung 40-50% minyak, minyak biji karet merupakan bahan baku potensial untuk produksi bahan bakar biodiesel yang berkelanjutan. Pemanfaatan Rubber seed oil (RSO) sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel juga dapat menurunkan harga biodiesel karena pengurangan biaya bahan baku, di mana biaya bahan baku lebih dari 80% dari total biaya produksi (Le et al., 2018). Minyak biji karet (RSO) telah mendapat banyak perhatian akhir-akhir ini karena belum dimanfaatkan secara khusus dan tersedia secara melimpah di sebagian besar negara Asia (Gurdeep Singh et al., 2021). Di antara minyak nabati lainnya, minyak biji karet (RSO) telah muncul sebagai bahan baku produksi biodiesel dan berdasarkan beberapa penelitian memiliki sifat yang sebanding dengan solar fosil (Samuel et al., 2019a). Minyak biji karet mentah dapat dimurnikan dengan degumming dan proses bleaching menunjukkan penurunan bilangan peroksida dari minyak, parameter yang paling berpengaruh dalam pemurnian adalah dosis bleaching earth, kemudian waktu reaksi dan dosis asam fosfat, proses ini bisa mengurangi peroksida yang ada pada minyak dan dapat meningkatkan stabilitas oksidasi (Gurdeep Singh et al., 2017). Minyak biji karet (RSO) telah diselidiki sebagai

sumber potensial untuk produksi biodiesel di Bangladesh. Minyak biji karet telah diekstraksi dari biji karet yang dikumpulkan dari kebun setempat. Metode yang berbeda telah diterapkan untuk ekstraksi minyak, seperti tekan mekanis dengan dan tanpa pelarut dan perkolasi dingin. Kandungan minyak maksimum 49% telah ditemukan dengan pengepresan mekanis dengan penambahan pelarut secara berkala (Morshed *et al.*, 2011). Negara produsen utama benih Karet adalah Brasil dan beberapa negara produsen lainnya adalah Indonesia, Malaysia, Thailand dan India. Kernel biji karet memiliki 40-50% minyak coklat (berdasarkan berat) dan bijinya memiliki kandungan minyak 50-60%.

Tabel 3.2: Sifat fisika-kimia minyak biji karet dari berbagai referensi

Density (g cm ⁻³)	Viscosity (cSt)	Moisture content (wt%)	Acid value (mg KOH per g)	Iodine Value (gr I ₂ /100 gr)	FFA value (%)	Flash Point (°C)	Cloud Point (°C)	Pour point (°C)	Referensi
0,894	7,54	0,013	10,60	-	5,25	-	-	-	(Roschat <i>et al.</i> , 2017)
-	-	-	18,19	142,20	9,648	-	-	-	(Godfrey <i>et al.</i> , 2019)
0,839	42,91	-	70	118,3		278	16	12	(Ameen <i>et al.</i> , 2019)
0,91	13,13	0,27	24	113		273	3	2	(Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S. Bhalerao, <i>et al.</i> , 2021)
0,886- 0,910	40,18- 66,20	-	18,20- 83,76	118,8- 137,02	-	198- 240,3	-	-	(Saeed <i>et al.</i> , 2021)
0,91	40,86	0,30	83,76	118,8	41,64	-	-	-	(H. K. A. P. G. Singh, Yusup and Wai, 2016)
0,869	34	0,23	13,2	72	-	-	-	-	(Jisieike and Betiku, 2020)
0,88	33	0,93		132,6	45	-	-	-	(Morshed <i>et al.</i> , 2011)
0,885	38,9	-	0,42	-	-	-	-	-	(Sabarish, Sebastian and Muraleedharan, 2016)
0,91	40,86	0,37	83,76	118,8	41	-	-	-	(H. K. A. G. Singh, Yusup and Wai, 2016)

3.2 Sifat Fisika Kimia Minyak Nabati Biji Karet

Sifat fisika kimia minyak biji karet (RSO) dari berbagai referensi disajikan pada tabel 3.2. Densitas, viskositas, dan nilai kalor minyak biji karet masing-masing adalah 917 kg/m³ (pada 15°C), 42,54 mm/s (pada 40°C), dan 38,64 MJ/kg. Minyak biji karet memiliki kandungan asam lemak tak jenuh yang tinggi, seperti asam linolenat (16,3%), asam linoleat (39,6%), dan asam oleat (24,6%) (D. Singh, Sharma, S. L. Soni, et al., 2020). Dari sifat fisika-kimia minyak biji karet menunjukkan bahwa minyak tersebut dapat dianggap sebagai bahan baku potensial untuk produksi biodiesel (Reshad, Tiwari and Goud, 2015). Sifat bahan bakar *Rubber Seed Ethyl Esther* (RSOEE) yang dihasilkan dalam reaktor kavitasi hidrodinamik sesuai dengan penelitian sebelumnya dan memenuhi standar biodiesel, kecuali stabilitas oksidasi. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, dimasukkannya antioksidan dapat lebih meningkatkan OS ke batas yang dapat diterima (> 6 jam) (Samuel et al., 2019a). Konversi metil ester maksimum (biodiesel) dari Minyak Biji Karet adalah 96,8% pada variabel reaksi rasio alkohol 6:1 terhadap minyak, konsentrasi katalis 1%, suhu reaksi 55°C dan waktu reaksi 67,5 menit. Semua sifat biodiesel berada dalam kisaran standar termasuk viskositas, titik nyala, nilai yodium, kandungan ester dan nilai kalor (Ahmad et al., 2014).

Penelitian tentang pemanfaatan Biji Karet menjadi biodiesel telah banyak dilakukan. Penelitian yang telah dilakukan oleh Gimbun, dkk. (2013) menunjukkan bahwa produksi biodiesel dari Biji Karet dengan metode ekstraksi menggunakan microwave dapat mengurangi waktu ekstraksi menjadi 4 menit, sedangkan jika menggunakan metode konvensional membutuhkan waktu 6 jam, penggunaan katalis batu kapur dapat mengonversi FFA menjadi biodiesel sampai 96,9%, biodiesel yang di hasilkan memenuhi kualifikasi yang di tetapkan pada ASTM D6751 (Gimbun et al., 2013).

Biodiesel dari minyak biji yang diproduksi menggunakan metanol NaOH/NaPAA sebagai katalis telah di uji sifat fisika-kimianya oleh Yang, dkk. (2011), hasilnya menunjukkan stabilitas oksidasi pada 50°C selama 6,5 jam, memenuhi spesifikasi ASTM D6751 dan DIN V51606, GB/T20828-2007, yang menunjukkan bahwa biofuel tersebut dapat memberikan tingkat stabilitas yang sesuai terhadap oksidasi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa biodiesel yang diperoleh dari transesterifikasi minyak biji karet dengan

metanol menggunakan NaOH/NaPAA sebagai katalis, memenuhi semua sifat bahan bakar biodiesel dan dapat menjadi alternatif yang kompetitif untuk menggantikan bahan bakar diesel konvensional (Yang et al., 2011).

Prosedur esterifikasi dua langkah mengubah minyak biji karet menjadi metil esternya. Viskositas minyak biodiesel lebih dekat dengan solar dan nilai kalor sekitar 14% lebih rendah dari solar (Ramadhas, Jayaraj and Muraleedharan, 2005).

Improvisasi produksi biodiesel dengan menggunakan katalis heterogen dan telah dilakukan oleh Dhawane, dkk. (2017) yang bertujuan untuk mengoptimalkan proses produksi biodiesel dan mengidentifikasi parameter signifikan yang mempengaruhi hasil biodiesel. Biodiesel disintesis dari minyak biji karet (RSO) menggunakan katalis yang diolah sendiri dengan katalis besi (Fe/C). Kondisi optimasi yang diperoleh dengan memaksimalkan rendemen RSME (Rubber seed oil methyl ester) sebesar 97,5% adalah pada penggunaan katalis 4,5 wt%, Metanol/Oil (M/O) 9:1, temperatur 60°C dan kecepatan agitasi 1250 RPM. Sifat fisika-kimia RSME yang dihasilkan pada kondisi optimal ditemukan berada dalam batas yang ditentukan yang disarankan oleh ASTM. Penggunaan kembali katalis Fe/C juga dipelajari untuk memeriksa aktivitasnya dan terbukti masih efektif setelah tiga siklus dengan aktivitas katalistik yang cukup besar. Oleh karena itu, penelitian mengungkapkan RSO bisa menjadi bahan baku yang efektif untuk produksi biodiesel menggunakan katalis Fe/C baru untuk menghasilkan RSME hemat energi dan hemat biaya menuju produksi energi berkelanjutan (Dhawane et al., 2017).

Di India telah dilakukan 29 set percobaan oleh Chhabra, dkk. (2021) untuk menjelaskan detail proses optimasi yield biodiesel dari Biji Karet menggunakan teknik desain Box Behnken. Hasil penelitian menunjukkan bahwa yield biodiesel sebesar 98,71% diperoleh pada rasio molar metanol/minyak 12:1, jumlah katalis 0,6 wt% pada suhu 30°C dalam waktu 75,31 menit (Chhabra et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Dhawane, Kumar dan Halder, (2018) mengungkapkan bahwa enzim lipase yang didukung karbon dari bahan lokal efektif digunakan dalam proses metanolisis minyak biji karet menjadi biodiesel. Studi ini juga menunjukkan bahwa pendekatan taguchi efektif dalam mengidentifikasi parameter signifikan yang mempengaruhi proses imobilisasi dan mencapai kondisi optimal untuk sintesis katalis yang hemat biaya sehingga

pada akhirnya meminimalkan biaya proses sintesis biodiesel (Dhawane, Kumar and Halder, 2018).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ahmad, dkk. (2014) minyak biji karet non-edible (RSO) dengan kandungan asam lemak bebas (FFA) tinggi 45% digunakan untuk produksi biodiesel. Prosesnya terdiri dari dua langkah. Tahap pertama adalah esterifikasi asam untuk menurunkan nilai FFA dan tahap kedua adalah transesterifikasi basa. Metodologi permukaan respons (RSM) digunakan untuk optimasi parametrik dari dua tahap proses yaitu esterifikasi asam dan transesterifikasi basa. Rendemen biodiesel dianalisis menggunakan kromatografi gas. Spektrum FTIR (Fourier Transform Infra-Red) juga ditentukan untuk mengkonfirmasi konversi asam lemak menjadi metil ester. Sifat bahan bakar dianalisis menurut ASTM D6751 dan EN14214 dan dibandingkan dengan temuan peneliti sebelumnya. Semua sifat yang dianalisis memenuhi kriteria standar biodiesel (Ahmad et al., 2014).

Stabilitas termal biodiesel yang diperoleh dari minyak biji karet telah dievaluasi oleh Roschat, dkk. (2017), dengan menggunakan analisis termogravimetri dan dibandingkan dengan bahan bakar bensin-solar, ditemukan bahwa biodiesel yang diperoleh dari minyak biji karet memenuhi standar EN 14214 untuk bahan bakar bio-auto. Komponen utama biodiesel termasuk metil ester asam lemak rantai panjang, di antaranya kandungan asam lemak tak jenuh lebih dari setengahnya. Semakin besar tingkat ketidakjenuhan dalam alkil ester, semakin rentan terhadap oksidasi. Apalagi dalam proses penyimpanan dan transportasi yang sebenarnya, karena ketidakstabilan peroksida (Ni et al., 2020). Dilihat dari komposisi asam lemak dan sifat fisika-kimia minyak, RSO cocok untuk menggantikan bahan baku yang dapat dimakan (edibel) untuk membuat produksi biodiesel berkelanjutan (Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S. Bhalarao, et al., 2021). Minyak biji karet, yang berasal dari biji pohon karet, telah terbukti sebagai pilihan yang layak untuk produksi biodiesel (Zhu et al., 2014).

Ekstraksi biodiesel dari biji karet adalah pilihan yang layak yang menuntut perhatian penelitian untuk mengoptimalkan parameter proses, proses esterifikasi dua tahap yang menggunakan asam dan basa sebagai katalis telah dilakukan. Bahan bakar diuji sifat-sifatnya seperti viskositas, nilai kalor dan residu karbon menggunakan prosedur uji standar dan ternyata hasilnya analog dengan diesel, sehingga disimpulkan bahwa biodiesel dari biji karet memungkinkan digunakan pada mesin diesel tanpa modifikasi apa pun (Melvin Jose et al., 2011), namun periode induksi biodiesel minyak biji karet

murni tanpa antioksidan tambahan ditemukan hanya 0,81 jam yang jauh di bawah Standar Eropa untuk stabilitas oksidasi biodiesel (8 jam) (Ni et al., 2020). Oksidasi biodiesel mengubah sifat kimia dan fisik dari sedimen dan polimer rantai panjang. Stabilitas oksidasi biodiesel dipengaruhi oleh persentase asam lemak yang tinggi. Perlu banyak penelitian untuk menemukan biodiesel dengan stabilitas oksidasi yang tinggi (Kumar, Yadav and Dwivedi, 2018).

Tabel 3.3: Perbandingan propeties biodiesel biji karet, biodiesel standar dan solar

Referensi												
	(Paul, Borugadda, Resha, Machhindra S. Bhalerao, et al., 2021)	(Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S. Bhalerao, et al., 2021), (Bharti and Singh, 2020)	(Uzoh et al., 2021)	(Aisien and Aisien, 2023)	(Rosch et al., 2017)	(Dhawane et al., 2017)	(Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S. Bhalerao, et al., 2021)	(Onoji et al., 2022)	(Vishal et al., 2020)	(Lüneburger et al., 2022)	(Kumar et al., 2021)	(Falowo, Oloko-Oba and Betiku, 2019)
Metode Produksi (proses)	Diesel Murni	Spesifikasi ASTM Biodiesel	Optimasi multi-tujuan (MOO)	katalis cangkang bekicot yang diaktifkan asam (AASS).	katalis heterogen	katalis karbon yang didoping besi dengan pendekatan Taguchi	Konvensional	katalis heterogen yang disintesis dari limbah cangkang biji karet	Esterifikasi asam	Konvensional	metanol yang dikatalisis oleh natrium hidroksida	campuran minyak biji karet nimba
Nilai kalor MJ/kg	45–46	37,27	40	38,74	40	45,1	39,53	40,67	38,7	-	38,83	39,66
Densitas (kg m ³)		820 - 900	847	852	880	870	860	876	864	879,9	882	897
Viskositas Kinematik (cSt)	1,9–4,1	1,9-6,0	2,05	4,24	4,84	4,85	3,81	4,32	4,3	6,7	4,7	5,94
Angka Setana	40 (menit)	47 (menit)	35,11	52,5	-	51	49,9	57	-	-	52	56,53
Nilai asam (mg KOH/g)	0,35	0,5 (maks.)	0,64	0,12	0,35	0,1	0,4	0,56	-	0,28	-	0,41
Stabilitas Oksidasi (jam)		3,0	-	-	9,82	-	-	7,8	-	5,72	-	-
Nilai yodium (g 12/100 g)		120 (maks.)	87,98	131,2	-	-	114	85,34	-	-	-	68,33
Titik nyala (°C)		130	217	136	184	155	131	158	148	60	157	134
Titik awan (°C)	-15–5	-3 sampai 12	2	9	-	-7	2,5	-8	3,4	-	-	15
Titik tuang (°C)	-20	-15 hingga 10	-8	7,2	-	-10	-3	4,8	-2	-	-	-6

Pada tabel 3.2 terlihat bahwa sebagian besar sifat fisika-kimia BBK yaitu nilai kalor, densitas, bilangan setana, kadar asam, bilangan iod, flash pion, titik tuang dan titik awan memenuhi standar ASTM. Namun viskositas kinematik BBK dari seluruh referensi pada tabel 3.2 belum memenuhi standar ASTM, beberapa peneliti juga tidak menampilkan nilai kestabilan oksidasi, kemungkinan nilai kestabilan oksidasi yang tidak ditampilkan tidak memenuhi standar ASTM. Maka dari tabel 3.2 dapat disimpulkan bahwa BBK layak dipertimbangkan sebagai bahan pengganti solar, namun diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai konversi RSO menjadi BBK terutama untuk menurunkan viskositas dan meningkatkan stabilitas oksidasi, karena viskositas bahan bakar dapat mempengaruhi performa mesin diesel. Semakin tinggi

viskositas bahan bakar maka semakin sulit bahan bakar tersebut mengalir dan terdispersi dalam ruang bakar (Doppalapudi, Azad and Khan, 2021).

Faktanya, stabilitas oksidasi sebagian besar biodiesel relatif buruk dan sulit untuk memenuhi standar Nasional. Oleh karena itu, penting dan krusial untuk mengoptimalkan stabilitas oksidasi biodiesel. Saat ini, metode yang paling populer dan banyak digunakan untuk meningkatkan kinerja antioksidan termasuk penambahan agen antioksidan ke dalam biodiesel (Ni et al., 2020).



Bab 4

Sifat Fisika-kimia Bahan Bakar Cair Jenis Diesel

4.1 Viskositas Kinematik (Kinematic Viscosity)

Viskositas adalah sifat transpor fluida yang berfungsi sebagai data kuantitatif untuk merancang perpindahan massa, perpindahan panas dan mekanisme aliran fluida (Alam, Ashokkumar and Mohammed Siddiq, 2018). Viskositas Kinematik adalah perbandingan antara viskositas dinamik dengan kerapatan fluida (Kiernan, Foster and Harden, 1978). Viskositas kinematik adalah salah satu sifat bahan bakar yang ditentukan dalam standar biodiesel, pada suhu 40°C. Viskositas tinggi minyak nabati atau lemak yang digunakan sebagai bahan bakar diesel menyebabkan masalah operasional seperti atomisasi yang buruk pada saat injeksi ke dalam ruang bakar dan menghasilkan deposit pada mesin (Knothe and Steidley, 2007). Atomisasi bahan bakar, injeksi ke dalam ruang bakar, dimensi tetesan, dan pembentukan gas pembakaran, endapan emisi mesin, dan kualitas pelumasan semuanya di bawah pengaruh viskositas. Atomisasi bahan bakar dengan viskositas tinggi tidak menguntungkan, karena menghasilkan tetesan yang lebih besar pada tahap injeksi yang mengakibatkan penurunan sudut semprotan dan peningkatan penetrasi ujung semprotan, ini

menyebabkan pembakaran bahan bakar yang buruk di mesin diesel. Konsekuensinya adalah pembentukan endapan mesin serta peningkatan emisi asap dari knalpot (Yahya and Aghel, 2021).

4.2 Densitas (Density)

Densitas atau massa jenis atau kerapatan adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda (Komala Sari, 2021). Densitas merupakan sifat bahan bakar yang sangat penting karena memengaruhi proses produksi, transportasi, dan distribusi serta semua proses yang terjadi di mesin pembakaran internal. Mengetahui densitas bahan bakar diperlukan untuk: merancang fasilitas produksi dan manufaktur untuk bahan bakar – reaktor, tangki, unit distilasi; menemukan massa dan volume mengalir melalui fasilitas tersebut; menetapkan ukuran pompa transfer, transfer dan katup pengaman yang sesuai, dll. Kepadatan, bersama dengan tekanan uap, difusivitas uap, tegangan permukaan, dan viskositas dinamis cairan, memengaruhi struktur semprotan bahan bakar, karakteristik pembakaran dan emisi, pembentukan endapan mesin, dan perilaku mesin dalam kondisi cuaca dingin (Barabás, 2013). Densitas sangat dipengaruhi oleh kondisi penyimpanan, komposisi asam lemak, dan kandungan air. Ini secara langsung memengaruhi kinerja mesin dan sifat biodiesel lainnya. Densitas biodiesel biasanya lebih besar dari pada petrodiesel. Oleh karena itu, sangat penting untuk menjaga densitas bahan bakar dalam batas yang direkomendasikan. Densitas bahan bakar adalah properti standar yang harus diukur secara berkala dan itu tergantung pada berat molekul (Sarin et al., 2020)

4.3 Bilangan Asam (acid value)/Total Acid Number (TAN)

Bilangan Asam atau Total Acid Number (TAN) atau Acid Value merupakan parameter dalam karakteristik bahan bakar yang merupakan gabungan antara asam-asam lemah maupun asam kuat yang terdapat dalam bahan bakar. Bilangan asam yang tinggi akan memengaruhi tingkat keasaman dan korosivitas bahan bakar. Hal ini dapat berpengaruh terhadap material yang

bersinggungan langsung dengan bahan bakar tersebut misalnya perpipaan, tangki, gasket, pompa, nozel, maupun ruang bakar (Dewi, 2019).

4.4 Stabilitas Oksidasi (Oxidation Stability)

Stabilitas Oksidasi (Oxidation stability) adalah salah satu sifat terpenting dari alkil ester asam lemak (bahan bakar biodiesel) karena berpengaruh terhadap stabilitas biodiesel pada masa penyimpanan yang lama. Degradasi oleh oksidasi menghasilkan produk yang dapat membahayakan sifat bahan bakar, merusak kualitas bahan bakar, dan kinerja mesin (Pullen and Saeed, 2012), (Varghese, Saeed and Rutt, 2021). Salah satu kendala teknis dalam penggunaan biodiesel adalah stabilitas oksidasi terhadap paparan oksigen di udara. Faktor-faktor yang memengaruhi stabilitas oksidasi tidak hanya komposisi bahan bakar, tetapi juga suhu, keberadaan cahaya, ruang penyimpanan, dan adanya bahan asing seperti antioksidan, logam, dan lainnya (Knothe and Steidley, 2018). Oleh karena itu, stabilitas oksidasi tetap menjadi sifat utama untuk meningkatkan kompatibilitas biodiesel, stabilitas oksidasi dapat ditingkatkan antioksidan yang sesuai, baik alami maupun sintesis, untuk secara optimal dapat menahan reaksi berantai sehingga mengurangi kulminasi radikal bebas (Jemima Romola et al., 2021).

4.5 Cloud Point, Pour Point dan Flash Point.

Cloud Point (CP) adalah suhu terendah di mana pembentukan kristal dalam biodiesel dapat diamati sebagai suspensi keruh (Gouveia et al., 2017). *Cloud Point* juga bisa diartikan sebagai suhu di mana lilin (parafin) mulai terpisah ketika minyak didinginkan ke suhu rendah, dan ini berfungsi sebagai indikator penting dalam aplikasi otomotif (Loganathan, 2011). Salah satu kelemahan utama biodiesel adalah sifat aliran dinginnya yang buruk. Saat suhu menurun, biodiesel dalam tangki penyimpanan bahan bakar atau sistem mesin yang tidak aktif dapat mengalami transisi fase dan membentuk gumpalan kristal yang

menyebabkan masalah. Suhu di mana transisi fase seperti itu umumnya terjadi pada Cloud Point (Dunn, 2021). Pour Point didefinisikan sebagai suhu terendah di mana fluida dapat dituangkan. Ini adalah salah satu sifat yang menentukan fluiditas minyak pada suhu rendah (Fundamentals, 2013). Pour Point minyak adalah sifat yang sangat penting, karena pada suhu ini minyak kehilangan karakteristik alirannya, yaitu titik terendah di mana ia menjadi terlalu kental dan kehilangan aliran (Critchley, 2019). Flash point didefinisikan sebagai suhu di mana uap yang dilepaskan dari bahan bakar cukup untuk dapat terbakar bila bercampur dengan udara pada tekanan tertentu (Lakzian and Liaw, 2021). Flash point atau biasa disebut titik nyala, merupakan kriteria penting bahan bakar karena berkaitan dengan kondisi penyimpanan dan transportasi yang aman dan memengaruhi suhu operasi proses. Misalnya untuk memastikan pengoperasian pesawat yang aman, titik nyala minimum dipersyaratkan untuk berbagai jenis bahan bakar (Huo, Lu and Wang, 2022).

4.6 Nilai Kalor (Calorific Value)

Nilai kalor didefinisikan sebagai jumlah kalori yang dihasilkan ketika jumlah satuan zat teroksidasi sempurna dan ditentukan dengan menggunakan kalorimeter bom (Coal, 2004). Nilai kalori adalah parameter kunci untuk mengevaluasi kualitas bahan bakar (ÖzyüğÜran and Yaman, 2017). Nilai kalori merupakan properti penting dalam pemilihan bahan bakar. Ini adalah salah satu sifat terpenting untuk mengkarakterisasi bahan bakar (Kaisan et al., 2020). Nilai kalor biodiesel ditemukan hampir 90% dari bahan bakar diesel (Thangarasu and Anand, 2019).

4.7 Angka Cetana (Cetane Number)

Angka cetana (CN) adalah properti penting yang menunjukkan kualitas pengapian bahan bakar dan terutama minyak diesel. Angka cetana (CN) mencirikan kemampuan penyalaan sendiri dari bahan bakar. Dalam mesin diesel, bahan bakar disuntikkan di bawah tekanan tinggi ke udara terkompresi dan penyalaan terjadi secara spontan setelah waktu yang sangat singkat (1 ms). Proses ini disukai dengan meningkatkan rasio kompresi yang dapat bervariasi antara 15 dan 22, tetapi juga perlu bahwa struktur kimia bahan bakar harus

sesuai dengan penyalan otomatis. Kualitas ini dinyatakan oleh CN (Barra et al., 2020). CN terkait dengan perbedaan waktu yang dibutuhkan untuk menginjeksikan bahan bakar dan saat mulai terbakar, yang disebut ignition delay (IGD) (Luning Prak et al., 2021). Angka setana (CN), ditentukan oleh tes standar (mesin diesel) ASTM D613, adalah ukuran kualitas penyalan bahan bakar diesel dalam mesin penyalan kompresi. Bahan bakar dengan angka setana yang lebih tinggi memiliki periode tunda pengapian yang lebih pendek dan memulai pembakaran segera setelah disuntikkan ke dalam ruang (Piloto-Rodríguez et al., 2013)

4.8 Bilangan Yodium (Iodine Value)

Bilangan Yodium (Iodine Value) menunjukkan derajat ketidakjenuhan minyak triasilgliserol juga didefinisikan sebagai jumlah yodium (dalam gram) yang ditambahkan ke 100 gram minyak. Jelas, kandungan yodium dapat dengan mudah dihitung dengan menganalisis komposisi asam lemak (He and Liu, 2019). Nilai yodium dapat digunakan untuk mengukur derajat ketidakjenuhan minyak dan lemak. Hasilnya biasanya dinyatakan sebagai jumlah gram yodium yang diserap oleh 100 gram minyak atau lemak. Parameter ini sangat penting dalam industri kelapa sawit, digunakan untuk mengikuti proses fraksinasi (da Silva Oliveira, Neves and Ballus, 2019). Bilangan yodium berbanding lurus dengan jumlah ikatan tak jenuh tunggal dan ganda dalam asam lemak penyusunnya (Tiefenbacher, 2017).



Bab 5

Hasil Pengujian Sifat Fisika Kimia dan Performa Mesin Diesel

5.1 Perubahan Sifat Fisika kimia Biodiesel Biji Karet

Biodiesel biji karet dan minyak pirolisis plastik dicampur pada perbandingan persen volume (%v/v) 90:10, 80:20, 70:30 dan 60:40. Setiap campuran ini kemudian diuji sifat fisika kimianya dan diamati perubahannya pada bahan bakar campuran. Hasil pemeriksaan sifat fisika kimia campuran biodiesel biji karet dan minyak pirolisis plastik ditampilkan pada tabel 5.1.

5.1.1 Nilai Kalor

Nilai kalor yang lebih tinggi merupakan salah satu kriteria terpenting untuk bahan baku sebagai biofuel [41]. Tabel 5.1 menunjukkan bahwa nilai kalor minyak pirolisis plastik (46,55 J/g) jauh lebih tinggi dibandingkan biodiesel biji karet (39,95 J/g) dan sedikit lebih tinggi dibandingkan bahan bakar solar (46,22 J/g). Meskipun nilai kalor biodiesel biji karet berada pada standar

ASTM (37,27 J/g), (Bharti and Singh, 2020; Sia et al., 2020), namun nilai tersebut masih jauh di bawah nilai kalor bahan bakar solar (46,22J/g). Setelah biodiesel biji karet dicampur dengan minyak pirolisis plastik, nilai kalor bahan bakar campuran meningkat seiring dengan meningkatnya persentase minyak pirolisis plastik dalam bahan bakar campuran.

Tabel 5.1: Sifat fisika-kimia biodiesel biji karet, minyak pirolisis plastik dan campurannya

Sifat fisika-kimia	Metode pengujian	% biodiesel biji karet+%minyak pirolisis plastik(v/v)						Biodiesel ASTM [43], (Bharti and Singh, 2020; Sia et al., 2020)	Diesel [42], (Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S. Bhalariao, et al., 2021)
		100%biodiesel biji karet	100% minyak pirolisis plastik	90+10	80+20	70+30	60+40		
Nilai kalor (J/g)	ASTM D-4809-06	39,95	46,55	40,86	41,11	41,93	42,35	37,270	46,22
Indeks Cetana	ASTM D-976/D-2699	56,9	53,8	57,1	56,8	56,2	55,9	≥47	53,1
Viskositas kinematik (mm ² /s) pada 40 °C	ASTM D-445	4,9	2,98	4,72	4,44	4,42	4,24	1,9 hingga 6	3,25
Densitas (kg/m ³) pada 40 °C	ASTM D-2638-10	887	814	884	882	872	869	860 hingga 900	831
Bilangan asam (mg KOH/g minyak)	ASTM D-664	0,53	0,31	0,4	0,39	0,39	0,39	0,5	0,35

Pada campuran 60% biodiesel biji karet dan 40% PPO, nilai kalor bahan bakar campuran menjadi 42,35 J/g, nilai ini lebih tinggi dari capaian: (Aisien and Aisien, 2023) (Aisien and Aisien, 2023) yang menggunakan katalis cangkang bekicot yakni 38,37 J/g, (Roschat et al., 2017) (Roschat et al., 2017) menggunakan katalis heterogen yakni 40 J/g, (Onoji et al., 2022) (Onoji et al., 2022) yang menggunakan katalis heterogen yang disintesis dari limbah cangkang biji karet yakni 40,67 J/g, (Kumar et al., 2021) (Kumar et al., 2021) yang menggunakan katalis natrium hidroksida, yakni 38,83 J/g, (Falowo, Oloko-Oba and Betiku, 2019) (Falowo, Oloko-Oba and Betiku, 2019) menggunakan campuran minyak biji karet nimba 39,66 J/g, namun masih lebih rendah dari (Dhawane et al., 2017) (Dhawane et al., 2017) yang menggunakan katalis karbon yang didoping Fe dengan pendekatan Taguchi yakni 45,1 J/g.

Pada komposisi 60% Biodiesel Biji Karet+ 40% minyak pirolisis plastik nilai kalor minyak campuran adalah 42,35 J/g, nilai ini mendekati nilai kalor solar 46,22 J/g. Dengan kata lain dapat disimpulkan bahwa penambahan minyak

pirolisis plastik pada Biodiesel Biji Karet dapat meningkatkan nilai kalor Biodiesel Biji Karet.

5.1.2 Nilai Setana

Nilai setana digunakan untuk menilai kecenderungan bahan bakar untuk menyala secara spontan. Angka setana merupakan ukuran seberapa mudah bahan bakar diesel terbakar pada suhu rendah. Hal utama yang memengaruhi bilangan setana suatu bahan bakar adalah bilangan karbonnya, struktur kimianya, dan jumlah ester induk yang dimilikinya. Angka setana sebagian besar ditentukan oleh komposisi asam lemak biodiesel. Berbeda dengan nilai kalor, pada tabel 5.1 terlihat Indeks Cetana minyak pirolisis plastik (53,8) sedikit lebih rendah dibandingkan dengan indeks Cetana Biodiesel Biji Karet (56,9), namun masih lebih tinggi dari indeks setana Solar (53,1), secara keseluruhan penambahan minyak pirolisis plastik pada Biodiesel Biji Karet sedikit menurunkan nilai indeks Cetana, namun temuan yang sangat menarik adalah pada campuran 90:10 indeks setana meningkat menjadi 57,1. Penurunan indeks setana akibat penambahan minyak pirolisis plastik tidak terlalu signifikan, nilai terendah terdapat pada campuran 60:40 (55,9) yang masih jauh di atas standar minimal ASTM untuk biodiesel (47) dan petroleum solar (53,1). Hasil ini juga lebih tinggi dari hasil penelitian (Uzoh et al., 2021) yang menggunakan metode RSM untuk Optimasi produksi dan sifat fisika kimia biodiesel biji karet yakni sebesar 47 (Uzoh et al., 2021), juga lebih tinggi dari hasil penelitian (Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S Bhalerao, et al., 2021) yakni sebesar 49 (Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S Bhalerao, et al., 2021) (Paul, Borugadda, Reshad, Machhindra S Bhalerao, et al., 2021).

5.1.3 Viskositas

Viskositas biodiesel berhubungan dengan kemampuan mengalirnya. Pada tabel 5.1, terlihat bahwa viskositas kinematik minyak pirolisis plastik (2,98 mm²/s) lebih rendah dibandingkan viskositas kinematik biodiesel biji karet (4,9 mm²/s) dan petroleum diesel (3,25 mm²/s). Artinya penambahan minyak pirolisis plastik pada biodiesel biji karet dapat menurunkan viskositas biodiesel biji karet. Penurunan viskositas ini adalah hal baik, karena viskositas kinematik bahan bakar sangat memengaruhi unjuk kerja mesin diesel, berkaitan dengan kemampuan bahan bakar mengalir pada saluran sistem bahan bakar terutama pada lubang injektor [46]. Viskositas oli yang tinggi menyulitkan aliran pada saluran sistem bahan bakar, sehingga akan menurunkan performa mesin

terutama pada kecepatan tinggi, sedangkan viskositas yang rendah akan memudahkan aliran pada saluran sistem bahan bakar sehingga akan menunjang kinerja mesin. Namun viskositas yang terlalu rendah juga akan menurunkan sifat pelumasnya, dapat mempercepat keausan komponen mesin dan meningkatkan suhu operasi mesin. Pada tabel 5.1 dapat dilihat viskositas paling rendah (4.24 mm/s) dimiliki oleh campuran 60% biodiesel biji karet+ 40% minyak pirolisis plastik. Hasil ini lebih tinggi dari hasil penelitian (Sugebo et al., 2021) (Sugebo et al., 2021) yang mengevaluasi sifat kimia fisika biodiesel biji karet dengan optimasi produksi, yakni sebesar 2,81 mm/s, dan juga lebih tinggi hasil penelitian (Uzoh et al., 2021) (Uzoh et al., 2021) yang bervariasi dari 1.67-3.71 mm²/s, Namun hasil ini masih dalam range ASTM yakni 1,9-6 mm/s. Densitas

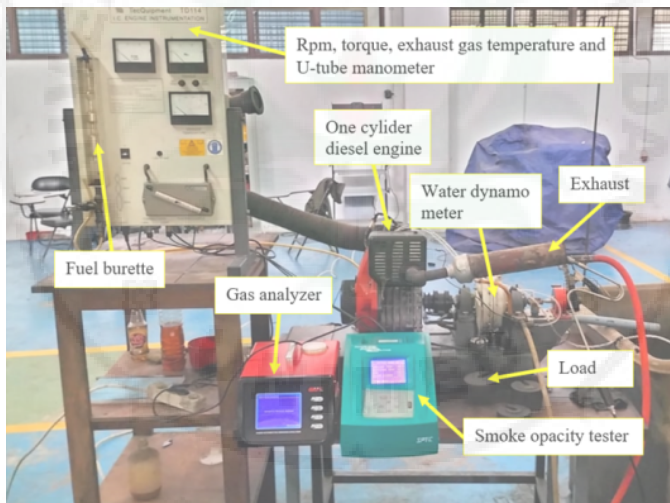
Densitas merupakan gambaran kerapatan molekul bahan bakar, tabel 5.1 menunjukkan bahwa densitas biodiesel biji karet (887 kg/m³) lebih besar dibandingkan densitas solar (831 kg/m³) dan minyak pirolisis plastik (814 kg/m³). Penambahan minyak pirolisis plastik pada biodiesel biji karet menurunkan densitas, densitas campuran menurun dari 884 pada penambahan 10% PPO ke 869 pada penambahan 40% PPO. Hasil ini lebih kecil dari hasil penelitian (Sugebo et al., 2021) (Sugebo et al., 2021) yakni sebesar 910 kg/m³, dan masuk dalam range hasil penelitian (Uzoh et al., 2021) (Uzoh et al., 2021) yakni dari 809-903 kg/m³. Densitas berkaitan dengan kemampuan bahan bakar untuk bercampur dengan udara, semakin kecil densitas maka semakin mudah suatu bahan bakar untuk bercampur dengan udara. Pencampuran bahan bakar dan udara yang cepat dan homogen diperlukan untuk pembakaran sempurna di dalam silinder.

5.1.4 Stabilitas Oksidasi

Stabilitas oksidasi biodiesel biji karet (1,2 jam) lebih tinggi dibandingkan dengan minyak pirolisis plastik (0,98 jam), stabilitas oksidasi campuran 60% biodiesel biji karet 40%PPO adalah 0,88 jam, hasil ini lebih kecil dari hasil penelitian Tarigan et al., (2022) yakni 4.6–5.0 jam (Tarigan et al., 2022) dan hasil penelitian (Samuel et al., 2019b) yakni 3,5 jam (Samuel et al., 2019). Penambahan minyak pirolisis plastik pada biodiesel biji karet juga menurunkan stabilitas oksidasi biodiesel biji karet, hal ini tentunya kurang baik, karena diperlukan stabilitas oksidasi yang lebih tinggi agar bahan bakar tidak teroksidasi dengan sendirinya jika terkena udara [50].

5.2 Pengujian pada Mesin Diesel

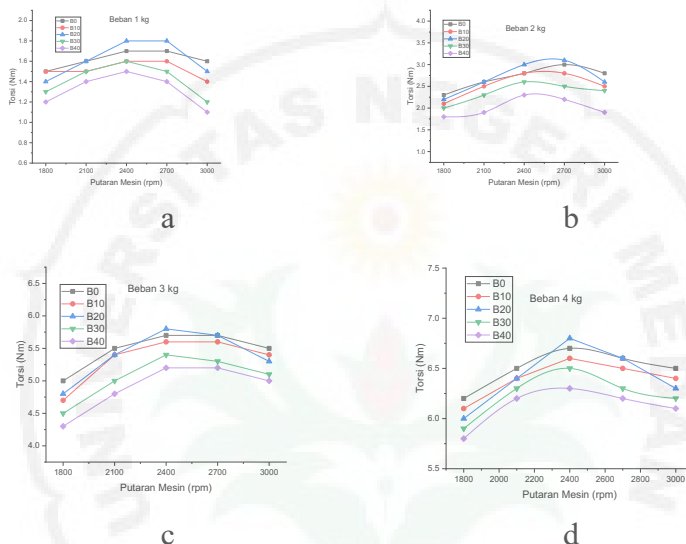
Dari hasil pemeriksaan sifat fisika-kimia campuran biodiesel biji karet-minyak pirolisis plastik, ditentukan campuran 60% biodiesel biji karet+ 40% minyak pirolisis plastik (% vol.) Untuk dijadikan sebagai campuran solar pada pengujian kinerja mesin diesel. Selanjutnya bahan bakar campuran ini yang dianggap sebagai biodiesel dan disebut dengan inisial B0, B10, B20, B30 dan B40.



Gambar 5.1: Instalasi Pengujian Performansi Mesin

5.2.1 Torsi

Gambar 5.2 menunjukkan torsi mesin untuk semua sampel bahan bakar dengan variasi putaran mesin dan beban. Semua bahan bakar yang diuji menunjukkan peningkatan nilai torsi diamati dari kecepatan rendah ke kecepatan sedang, dan kemudian menurun pada kecepatan tinggi. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Karami dkk. (Karami et al., 2019) yang menemukan bahwa torsi naik dari putaran mesin 1000 sampai dengan 1800 rpm, kemudian torsi turun dari putaran 2000 sampai 2800 rpm.



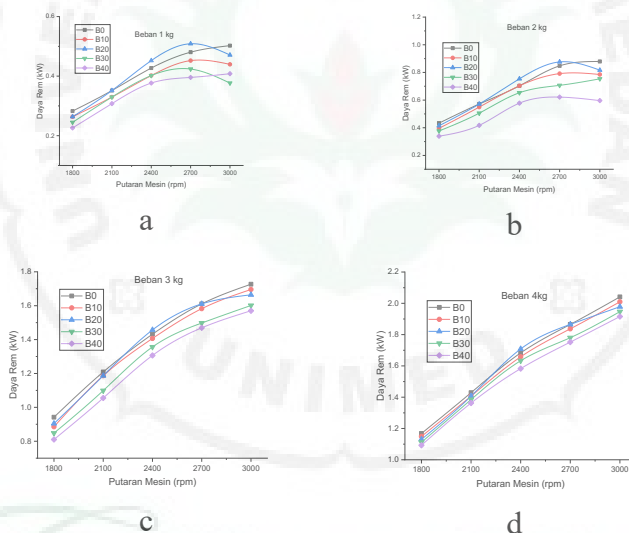
Gambar 5.2: Torsi mesin pada load yang berbeda; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

Rata-rata nilai torsi bahan bakar campuran lebih rendah dari solar, kecuali pada B20 pada putaran 2400 rpm dan 2700 rpm. Hal ini bisa saja disebabkan densitas B20 yang lebih rendah sehingga lebih mudah tercampur sempurna dengan Oksigen dan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, sesuai dengan hasil penelitian Gad dkk. (Gad et al., 2021) dan Afzal dkk. (Afzal et al., 2023), yang menyatakan bahan bakar dengan densitas yang lebih besar akan menghasilkan pola semprotan yang lebih sempit sehingga menyulitkan untuk tercampur sempurna dengan udara. Oleh karena itu, tekanan rata-rata di dalam silinder mesin akan semakin tinggi, sehingga mengakibatkan peningkatan gaya pada piston dan Torsi pada poros.

5.2.2 Daya Rem/Break power (BP)

Brake power adalah daya yang diberikan poros engkol. Pada gambar 5.3 terlihat bahwa secara umum brake power meningkat seiring peningkatan kecepatan mesin, hal ini sejalan dengan hasil penelitian banyak peneliti, di antaranya Razaq dkk. (Razaq et al., 2020) dan Mohammed (Razaq et al., 2020). Secara keseluruhan Brake power solar (B0) masih lebih tinggi dari campuran bahan bakar lainnya. Hal ini disebabkan nilai kalor B0 lebih tinggi

dari nilai kalor bahan bakar campuran lainnya (B0, B10, B20, B30 dan B40). Brake power B10 dan B20 mendekati B0 (petroleum diesel), bahkan pada kecepatan mesin 2100 rpm sampai 2700 rpm, brake power B20 lebih tinggi dari B0, hal ini sejalan dengan nilai Torsi pada gambar 4.8, namun pada kecepatan mesin 300 rpm, brake power B20 menurun dibawah B0. Artinya penambahan bahan bakar campuran biodiesel biji karet dan minyak pirolisis plastik disarankan sampai 20% saja, karena penambahan diatas 20% menyebabkan brake power menurun.

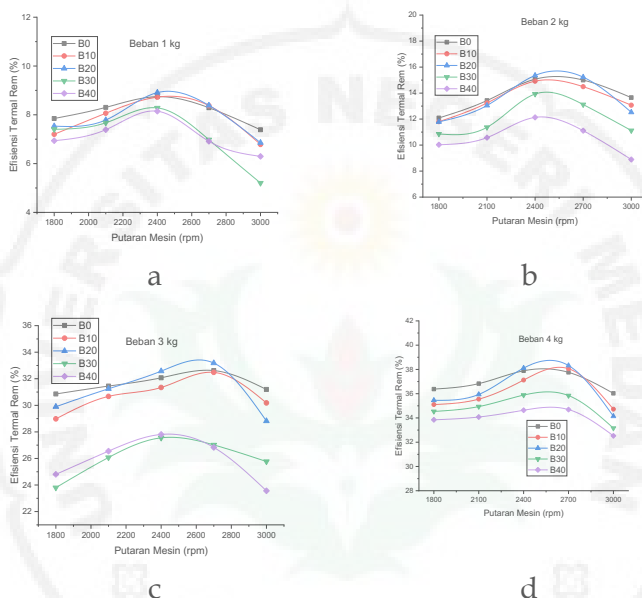


Gambar 5.3: Brake power mesin disel pada load yang berbeda; a. 1kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

Peningkatan brake power pada B10 bisa saja disebabkan penambahan biodiesel yang cetane numbrnya lebih tinggi, namun pada B30 dan B40 menurun karena kandungan biodiesel biji karet-minyak pirolisis plastik juga meningkat, yang menyebabkan penurunan nilai kalor bahan bakar campuran.

5.2.3 Efisiensi Termal Rem/Brake Thermal Efficiency (BTE)

Pada semua variasi load, secara keseluruhan BTE solar tetap lebih tinggi dibanding B10, B20, B30 dan B40, meskipun pada putaran 2400-2700 rpm terkadang BTE B10 dan B20 bersinggungan atau bahkan lebih tinggi dari B0, seperti terlihat pada gambar 5.4 c dan d.



Gambar 5.4: Efisiensi termal pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

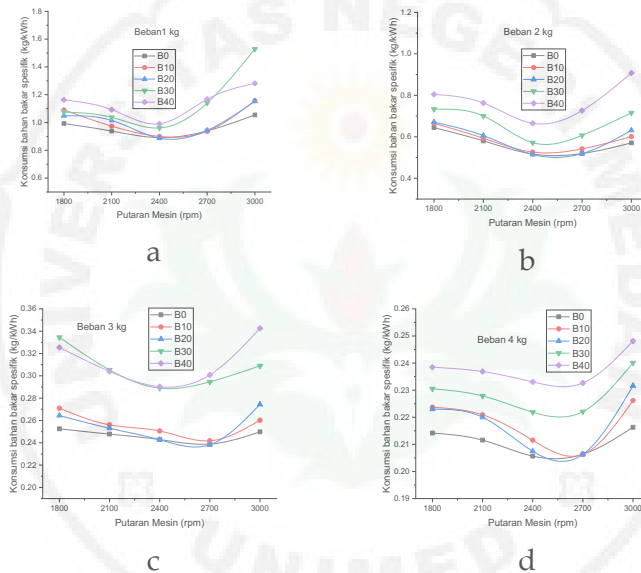
Gejala ini sejalan dengan tren BSFC pada gambar 5.5 BTE meningkat seiring penambahan kecepatan mesin dari kecepatan mesin rendah sampai sedang, namun pada kecepatan mesin tinggi atau mendekati kecepatan mesin maksimum (2800–3000 rpm) BTE kembali turun.

5.2.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik/Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

Gambar 5.5 menunjukkan BSFC untuk setiap campuran bahan bakar menurun sampai putaran sedang (2700 rpm) namun meningkat kembali pada putaran 3000 rpm.

BSFC terendah adalah pada B0, hal ini bisa saja disebabkan nilai kalor diesel yang lebih tinggi dari campuran bahan bakar lainnya, namun adakalanya pada kecepatan mesin 2400 sampai dengan 2700 rpm, BSFC B0 bersinggungan dengan BSFC B10 dan B20, bisa saja karena perbedaan nilai kalor yang tidak terlalu signifikan. Namun BSFC pada campuran bahan bakar B30 dan B40 lebih besar dari B0, B10 dan B20, hal ini menunjukkan penambahan campuran

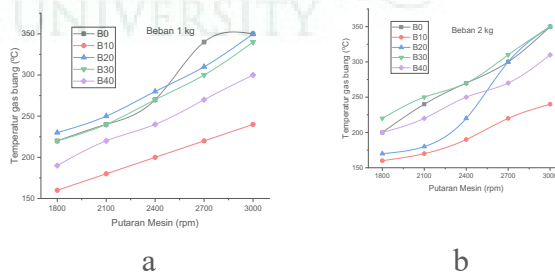
biodiesel biji karet+ minyak pirolisis plastik diatas 20% pada solar meningkatkan BSFC secara signifikan.

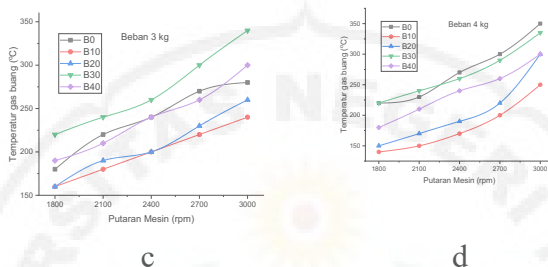


Gambar 5.5: Brake spesifik fuel consumption pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

5.2.5 Temperatur Gas Buang

Pada gambar 5.6 terlihat untuk semua bahan bakar, temperatur gas buang meningkat seiring peningkatan putaran mesin.





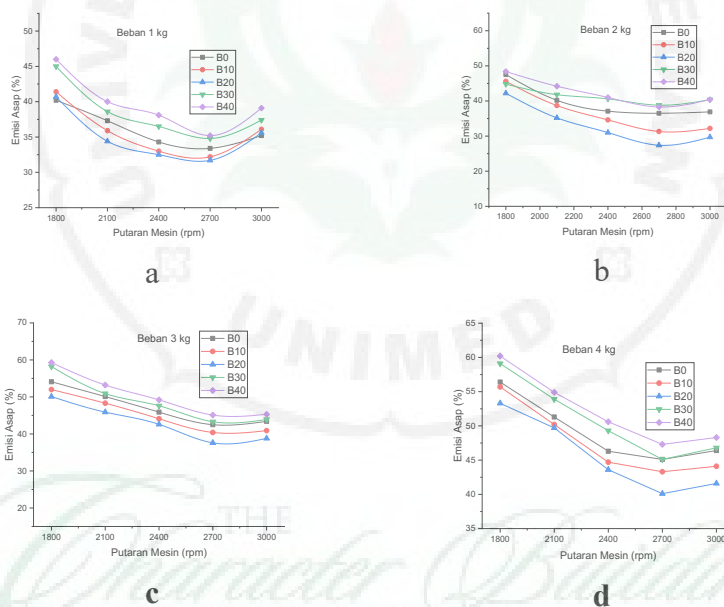
Gambar 5.6: Temperatur gas buang pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

Temperatur gas buang merupakan parameter penting dalam menentukan kinerja pembakaran. Temperatur gas buang yang rendah merupakan tanda bahwa pembakaran bahan bakar di dalam silinder lebih efisien dan menunjukkan performa pembakaran yang lebih baik. Temperatur gas buang yang lebih tinggi adalah indikasi kehilangan panas pada pipa knalpot, juga menunjukkan semakin rendahnya konversi energi panas menjadi kerja (Faisal et al., 2023). Temperatur gas buang meningkat seiring bertambahnya beban dan kecepatan putaran mesin karena semakin banyak bahan bakar yang dibakar untuk menghasilkan jumlah daya yang sama (Geo et al., 2018), (Şanlı and Uludamar, 2020). Dalam kasus minyak pirolisis plastik (gambar 5.6 c), temperatur gas buang lebih tinggi dibandingkan solar senada dengan Singh dkk.(2020) (Singh et al., 2020) serta Kumar dan Sankaranarayanan, 2016 (Kumar and Sankaranarayanan, 2016). Temperatur gas buang minyak pirolisis plastik dan biodiesel yang lebih tinggi dibandingkan solar disebabkan oleh laju pelepasan panas yang lebih tinggi dan pembakaran yang lebih baik yang disebabkan oleh kandungan oksigen dalam bahan bakar (Mani, Nagarajan and Sampath, 2011).

Temperatur gas buang yang lebih rendah menandakan pembakaran yang efektif (efisiensi thermal lebih baik), sifat unggul dari biodiesel seperti memiliki kandungan oksigen dan tidak adanya hidrokarbon aromatik berkontribusi terhadap pembakaran yang efektif. Selain itu, volatilitas biodiesel yang lebih rendah karena viskositas yang tinggi memengaruhi atomisasi bahan bakar di ruang bakar sehingga menyebabkan pembakaran lebih lambat dan suhu gas buang menjadi rendah (Mani, Nagarajan and Sampath, 2011).

5.2.6 Emisi Asap/Opacity

Asap terjadi karena ketidaksempurnaan pembakaran di dalam ruang bakar, karbon (C) yang tidak terbakar akan terdeteksi sebagai asap, asap jika bisa terbentuk karena kekurangan oksigen pada campuran bahan bakar, sehingga karbon (C) tidak dapat bereaksi dengan oksigen (O_2) untuk membentuk CO_2 atau CO. Terlihat pada gambar 5.7, pada tiap-tiap variasi beban, opacity menurun seiring peningkatan kecepatan mesin, namun ketika kecepatan mesin mendekati maksimum (3000 rpm) opacity meningkat kembali.

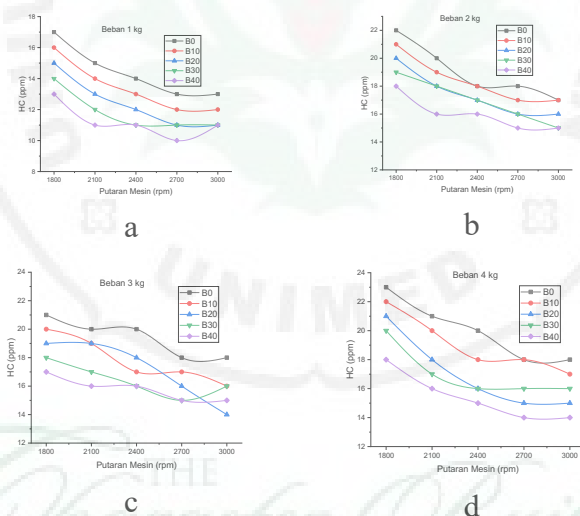


Gambar 5.7: Emisi Opacity pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

Hal ini sejalan dengan temuan Asokan dkk. (2021) yang menjelaskan bahwa, pada suhu reaksi yang lebih tinggi, kecepatan nyala api dan turbulensi yang lebih baik menyebabkan jelaga teroksidasi dan laju oksidasi meningkat (Asokan et al., 2021). Selain itu, waktu tinggal yang cukup dan pembakaran bahan bakar yang sempurna menyebabkan berkurangnya emisi asap. Menurut Efendi dkk. (2021) peningkatan putaran mesin memengaruhi turbulensi aliran udara masuk, selanjutnya meningkatkan atomisasi bahan bakar di dalam silinder, dan menghasilkan campuran yang lebih homogen. Dengan demikian,

pembakaran menghasilkan opasitas asap yang lebih rendah (Effendy et al., 2021).

Opacity B10 dan B20 lebih rendah dari B0, hal ini bisa saja disebabkan porsi biodiesel biji karet yang mengandung oksigen membantu menyempurnakan pembakaran sebagaimana di jelaskan (Sekar et al., 2021) bahwa untuk mengurangi smoke dengan meningkatkan jumlah oksigen dan mengurangi karbon, namun Opacity B30 dan B40 lebih tinggi bisa jadi karena porsi minyak pirolisis plastik yang semakin tinggi menyebabkan pembakaran kurang sempurna, karen minyak pirolisis plastik sebenarnya adalah hidro karbon dan tergolong petroleum.



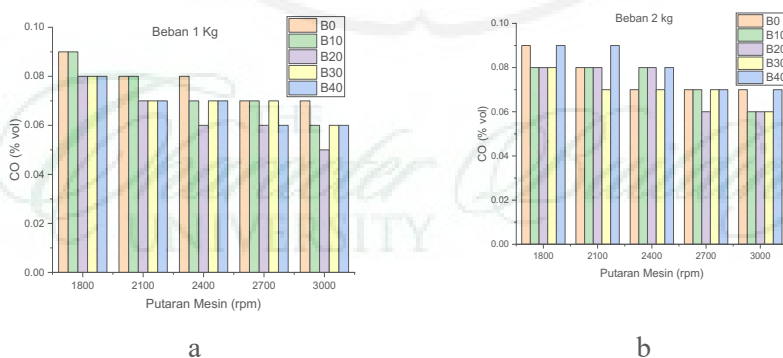
Gambar 5.8: Emisi HC pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

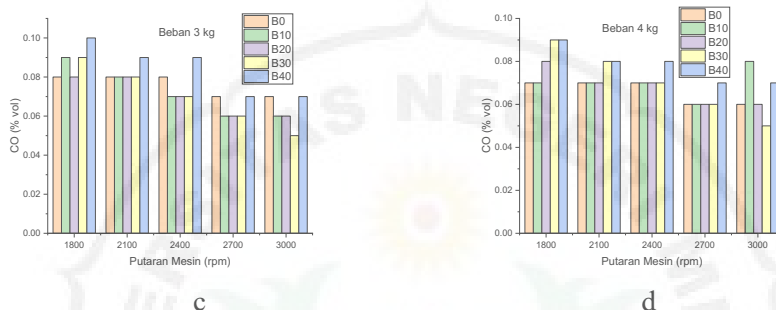
5.2.7 Emisi Hidrokarbon (HC)

Emisi HC menunjukkan sisa bahan bakar yang tidak terbakar di dalam silinder lalu keluar bersama gas buang. Pada gambar 5.8 terlihat, pada seluruh campuran bahan bakar, HC menurun seiring peningkatan kecepatan mesin. Konsentrasi HC pada B0 lebih tinggi dari semua bahan bakar lainnya. Hal ini bisa saja karena B0 adalah murni hidro karbon, sehingga semua sisa bahan bakar B0 yang tidak terbakar akan terdeteksi sebagai HC, sedangkan pada B10, B20, B30 dan B40, kandungan biodiesel yang non-hidro karbon berperan mengurangi konsentrasi HC pada sisa pembakaran.

5.2.8 Emisi CO

Gambar 5.9 menunjukkan pengaruh emisi CO dengan kecepatan putaran mesin untuk bahan bakar yang diuji. Emisi CO disebabkan oleh pembakaran parsial dan oksidasi parsial atom karbon dalam bahan bakar (Selvan et al., 2022). Jumlah emisi CO bervariasi sesuai dengan rasio bahan bakar-udara di dalam silinder mesin. Emisi CO menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan mesin, hal ini sejalan dengan penelitian Gong dkk. (Gong et al., 2019). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.15, karena rasio udara-bahan bakar yang tinggi dan suhu yang tinggi pada kecepatan mesin yang lebih tinggi, laju konversi CO menjadi CO_2 meningkat, sehingga mengurangi emisi CO dan meningkatkan emisi CO_2 sebagai mana terlihat pada gambar 5.9 seluruh sampel bahan bakar yang diuji B40 menunjukkan peningkatan emisi CO jika dibandingkan dengan solar (B0) kecuali pada beban rendah. Hal ini bisa saja disebabkan viskositasnya yang lebih tinggi, viskositas bahan bakar yang lebih tinggi menyebabkan kurangnya pencampuran bahan bakar-udara, terutama pada kecepatan yang lebih rendah, dan emisi CO meningkat selama pencampuran bahan bakar-udara yang buruk, yang mengakibatkan pembakaran tidak sempurna. Minyak pirolisis plastik dalam campuran kuaterner mengandung senyawa teroksigenasi dalam jumlah besar, yang akan menyebabkan peningkatan emisi CO.



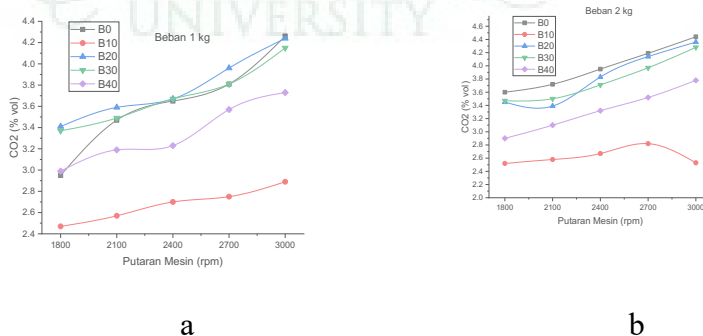


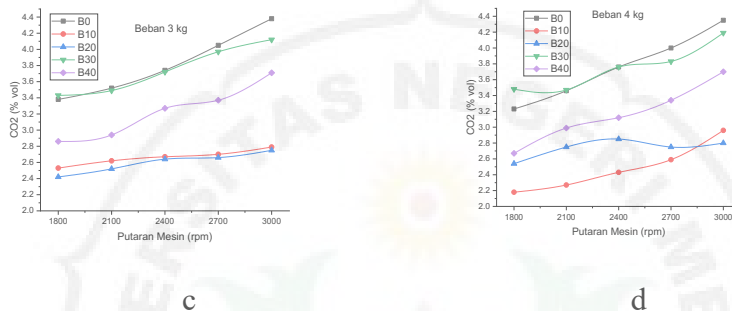
Gambar 5.9: Emisi CO pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian Singh dkk. (Singh et al., 2020), Das dkk. (Das et al., 2020) dan Mangesh dkk. (Mangesh et al., 2020) yang melaporkan peningkatan emisi CO ketika minyak pirolisis plastik ditambahkan ke solar. Sedangkan emisi CO B10, B20 dan B30 pada RPM tertentu berada dibawah emisi CO solar, hal ini bisa saja disebabkan kandungan bio diesel yang kaya oksigen yang ada pada campuran bahan bakar dapat mengimbangi dampak buruk minyak pirolisis plastik, sesuai dengan pendapat Palani dkk., Elsharkawy dkk., Huang dkk. Bahwa penambahan bio diesel ke solar dapat mengurangi emisi CO (Elsharkawy et al., 2020; Huang et al., 2020; Palani et al., 2022) sedangkan Ruhul dkk. Mengamati dampak buruk yang sama ketika biodiesel jarak pagar dicampur dengan solar (Ruhul et al., 2016).

5.2.9 Emisi CO₂

Oksidasi sempurna bahan bakar menyebabkan pelepasan panas yang tinggi dan pembentukan CO₂ yang tinggi (Ruhul et al., 2016).





Gambar 5.10: Emisi CO₂ pada load bervariasi; a. 1 kg, b. 2 kg, c. 3 kg, d. 4 kg.

Namun sudut pandang lingkungan hidup, emisi CO₂ yang meningkatkan efek rumah kaca harus dikurangi (Singh et al., 2020). Gambar 5.10 (a) dan (b) menunjukkan emisi CO₂ dari seluruh bahan bakar yang diuji. Untuk seluruh bahan bakar, CO₂ meningkat seiring peningkatan putaran mesin, hal ini sejalan dengan hasil penelitian Awang dkk. (Awang et al., 2021). Gambar 4.16 (a) menunjukkan rata-rata emisi CO₂ bahan bakar campuran berada di bawah emisi CO₂ solar. Hal ini juga bisa disebabkan kandungan karbon pada solar lebih tinggi dari bahan bakar yang mengandung biodiesel (Mangesh et al., 2020). Dan juga tingginya senyawa terokseginasi pada minyak pirolisis plastik (Afzal et al., 2023). Peningkatan emisi CO₂ seiring peningkatan putaran mesin ini sejalan dengan penurunan CO pada gambar 5.9, artinya semakin tinggi putaran mesin banyak bahan bakar yang terbakar sempurna yang mengakibatkan peningkatan CO₂ dan penurunan CO.



Daftar Pustaka

- Abdul Hakim Shaah, M. et al. (2021) "A review on non-edible oil as a potential feedstock for biodiesel: physicochemical properties and production technologies," *RSC Advances*, 11(40), hal. 25018–25037. doi: 10.1039/d1ra04311k.
- Abnisa, F. dan Alaba, P. A. (2021) "Recovery of liquid fuel from fossil-based solid wastes via pyrolysis technique: a review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, hal. 106593. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106593>.
- Ademiluyi, T. dan Akpan, C. (2007) "Preliminary evaluation of fuel oil produced from pyrolysis of low density polyethylene water-sachet wastes," *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 11(3).
- Afzal, A. et al. (2023) "Characterization of biodiesel based on plastic pyrolysis oil (PPO) and coconut oil: Performance and emission analysis using RSM-ANN approach," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Elsevier Ltd, 56(March 2022), hal. 103046. doi: 10.1016/j.seta.2023.103046.
- Ağbulut, Ü., Yeşilyurt, M. K. dan Sarıdemir, S. (2021) "Wastes to energy: Improving the poor properties of waste tire pyrolysis oil with waste cooking oil methyl ester and waste fusel alcohol – A detailed assessment on the combustion, emission, and performance characteristics of a CI engine," *Energy*, 222, hal. 119942. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119942>.
- Ahmad, I. et al. (2015) "Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products," *International Journal of Green Energy*. Taylor & Francis, 12(7), hal. 663–671. doi: 10.1080/15435075.2014.880146.

- Ahmad, J. et al. (2014) "Study of fuel properties of rubber seed oil based biodiesel," *Energy Conversion and Management*, 78, hal. 266–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.056>.
- Ahmad, J. et al. (2023) "A systematic and critical review on effective utilization of artificial intelligence for bio-diesel production techniques," *Fuel*. Elsevier, 338, hal. 127379.
- Aisien, F. A. dan Aisien, E. T. (2023) "Modeling and optimization of transesterification of rubber seed oil using sulfonated CaO derived from giant African land snail (*Achatina fulica*) catalyst by response surface methodology," *Renewable Energy*. Elsevier, 207, hal. 137–146.
- Aisien, F. A. dan Aisien, E. T. (2023) "Modeling and optimization of transesterification of rubber seed oil using sulfonated CaO derived from giant African land snail (*Achatina fulica*) catalyst by response surface methodology," *Renewable Energy*. Elsevier, 207, hal. 137–146.
- Alam, M. S., Ashokkumar, B. dan Mohammed Siddiq, A. (2018) The density, dynamic viscosity and kinematic viscosity of protic polar solvents (pure and mixed systems) studies: A theoretical insight of thermophysical properties, *Journal of Molecular Liquids*. Elsevier B.V. doi: [10.1016/j.molliq.2017.12.089](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.12.089).
- Ambat, I., Srivastava, V. dan Sillanpää, M. (2018) "Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 90(February 2017), hal. 356–369. doi: [10.1016/j.rser.2018.03.069](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.069).
- Ameen, M. et al. (2019) "Catalytic hydrodeoxygenation of rubber seed oil over sonochemically synthesized Ni-Mo/ γ -Al₂O₃ catalyst for green diesel production," *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier, 51(October 2018), hal. 90–102. doi: [10.1016/j.ultsonch.2018.10.011](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.011).
- Artetxe, M. et al. (2012) "Production of light olefins from polyethylene in a two-step process: pyrolysis in a conical spouted bed and downstream high-temperature thermal cracking," *Industrial & engineering chemistry research*. ACS Publications, 51(43), hal. 13915–13923.
- Arumugam, A., Thulasidharan, D. dan Jegadeesan, G. B. (2018) "Process optimization of biodiesel production from *Hevea brasiliensis* oil using lipase immobilized on spherical silica aerogel," *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 116, hal. 755–761. doi: [10.1016/j.renene.2017.10.021](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.021).

- Asokan, M. A. et al. (2021) "Emission and performance behavior of safflower oil biodiesel/diesel blends in DI diesel engine," *Materials Today: Proceedings*, 46, hal. 8266–8270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.248>.
- Awang, M. S. N. et al. (2021) "Effect of Addition of Palm Oil Biodiesel in Waste Plastic Oil on Diesel Engine Performance, Emission, and Lubricity," *ACS Omega*. American Chemical Society, 6(33), hal. 21655–21675. doi: 10.1021/acsomega.1c03073.
- Ayodhya, A. S. et al. (2018) "Effect of exhaust gas recirculation on a CRDI engine fueled with waste plastic oil blend," *Fuel*, 227, hal. 394–400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.128>.
- Azizan, F. A. et al. (2021) "Using multi-temporal satellite data to analyse phenological responses of rubber (*Hevea brasiliensis*) to climatic variations in South Sumatra, Indonesia," *Remote Sensing*, 13(15). doi: 10.3390/rs13152932.
- Bagri, R. dan Williams, P. T. (2002) "Catalytic pyrolysis of polyethylene," *Journal of analytical and applied pyrolysis*. Elsevier, 63(1), hal. 29–41.
- Barabás, I. (2013) "Predicting the temperature dependent density of biodiesel-diesel-bioethanol blends," *Fuel*, 109, hal. 563–574. doi: 10.1016/j.fuel.2013.03.001.
- Barra, I. et al. (2020) "Predicting cetane number in diesel fuels using FTIR spectroscopy and PLS regression," *Vibrational Spectroscopy*. Elsevier B.V., 111(September), hal. 103157. doi: 10.1016/j.vibspec.2020.103157.
- Bharti, R. dan Singh, B. (2020) "Green tea (*Camellia assamica*) extract as an antioxidant additive to enhance the oxidation stability of biodiesel synthesized from waste cooking oil," *Fuel*. Elsevier, 262, hal. 116658.
- Bhattacharjee, A. et al. (2021) "Rubber tree seed utilization for green energy, revenue generation and sustainable development– A comprehensive review," *Industrial Crops and Products*, 174, hal. 114186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114186>.
- Bridjesh, P. et al. (2018) "MEA and DEE as additives on diesel engine using waste plastic oil diesel blends," *Sustainable Environment Research*, 28(3), hal. 142–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.01.001>.

- Bridjesh, P., Periyasamy, P. dan Geetha, N. K. (2019) "Combined effect of composite additive and combustion chamber modification to adapt waste plastic oil as fuel on a diesel engine," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Elsevier B.V., 97, hal. 297–304. doi: 10.1016/j.jtice.2019.02.022.
- Cao, D. N. et al. (2020) "Effects of injection pressure on the NO_x and PM emission control of diesel engine: A review under the aspect of PCCI combustion condition," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Taylor & Francis, hal. 1–18.
- Chaalal, A., Darmstadt, H. dan Roy, C. (1997) "Vacuum pyrolysis of electric cable wastes," *Journal of analytical and applied pyrolysis*. Elsevier, 39(1), hal. 79–96.
- Chhabra, M. et al. (2021) "Production & optimization of biodiesel from rubber oil using BBD technique," *Materials Today: Proceedings*, 38, hal. 69–73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.791>.
- Chhandama, M. V. L. et al. (2021) "Microalgae as a feedstock for the production of biodiesel: A review," *Bioresource Technology Reports*, 15, hal. 100771. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100771>.
- Çit, İ. et al. (2010) "Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET," *Polymer bulletin*. Springer, 64, hal. 817–834.
- Coal, C. (2004) "Methods of Classification and Characterization of Coal," 1, hal. 1–79. doi: 10.1016/s0167-2991(04)80006-5.
- Critchley, L. (2019) *Pour Point Analysis for the Viscosity Measurements of Oils*, Azo Material.
- Cui, N. et al. (2020) "Isolation and identification of a novel strain of *Heveochlorella* sp. and presentation of its capacity as biodiesel feedstock," *Algal Research*, 51, hal. 102029. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102029>.
- da Silva Oliveira, W., Neves, D. A. dan Ballus, C. A. (2019) *Mature chemical analysis methods for food chemical properties evaluation, Evaluation Technologies for Food Quality*. Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-814217-2.00005-6.
- Damodharan, D. et al. (2017) "Extraction and characterization of waste plastic oil (WPO) with the effect of n-butanol addition on the performance and

- emissions of a DI diesel engine fueled with WPO/diesel blends,” *Energy Conversion and Management*, 131, hal. 117–126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.076>.
- Das, A. K. et al. (2020) “Energy, exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend,” *Journal of the Energy Institute*, 93(4), hal. 1624–1633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.01.024>.
- Das, A. K., Hansdah, D. dan Panda, A. K. (2021) “Thermal balancing and exergetic performance evaluation of a compression ignition engine fuelled with waste plastic pyrolytic oil and different fuel additives,” *Energy*, 229, hal. 120629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120629>.
- del Remedio Hernández, M., García, Á. N. dan Marcilla, A. (2007) “Catalytic flash pyrolysis of HDPE in a fluidized bed reactor for recovery of fuel-like hydrocarbons,” *Journal of analytical and applied pyrolysis*. Elsevier, 78(2), hal. 272–281.
- Devaraj, J., Robinson, Y. dan Ganapathi, P. (2015) “Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine,” *Energy*, 85, hal. 304–309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.075>.
- Dewi, M. (2019) *Pentingnya Menguji Total Acid Number untuk mengetahui kualitas bahan bakar*, Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain, BPPT.
- Dhawane, S. H. et al. (2017) “Parametric optimization of biodiesel synthesis from rubber seed oil using iron doped carbon catalyst by Taguchi approach,” *Renewable Energy*, 105, hal. 616–624. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.096>.
- Dhawane, S. H., Kumar, T. dan Halder, G. (2018) “Process optimisation and parametric effects on synthesis of lipase immobilised carbonaceous catalyst for conversion of rubber seed oil to biodiesel,” *Energy Conversion and Management*, 176, hal. 55–68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.019>.

- Direktorat Jenderal Perkebunan (2021) "Luas Areal Kelapa Menurut Provinsi di Indonesia , 2016-2019 Coconut Area by Province in Indonesia , 2016-2019," 2019(1), hal. 2019.
- Doppalapudi, A. T., Azad, A. K. dan Khan, M. M. K. (2021) "Combustion chamber modifications to improve diesel engine performance and reduce emissions: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, hal. 111683. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111683>.
- Dunn, R. O. (2021) "Correlating the cloud point of biodiesel with its fatty acid methyl ester composition: Multiple regression analyses and the weighted saturation factor (wSF)," *Fuel*. Elsevier Ltd, 300(September 2020). doi: [10.1016/j.fuel.2021.120820](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120820).
- Effendy, M. et al. (2021) "Performance and smoke opacity of compression-ignition engine using used-waste oil," *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, hal. 101063. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101063>.
- Elsharkawy, E. A. et al. (2020) "Enhancing the impact of biodiesel blend on combustion, emissions, and performance of DI diesel engine," *Arabian Journal for Science and Engineering*. Springer, 45, hal. 1109–1123.
- Faisal, F. et al. (2023) "Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics," *Science of The Total Environment*, 886, hal. 163756. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163756>.
- Falowo, O. A., Oloko-Oba, M. I. dan Betiku, E. (2019) "Biodiesel production intensification via microwave irradiation-assisted transesterification of oil blend using nanoparticles from elephant-ear tree pod husk as a base heterogeneous catalyst," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. Elsevier, 140, hal. 157–170.
- Fundamentals, S. (2013) *Encyclopedia of Tribology*, Encyclopedia of Tribology. doi: [10.1007/978-0-387-92897-5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5).
- Gad, M. S. et al. (2021) "Effect of oil blends derived from catalytic pyrolysis of waste cooking oil on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics," *Energy*, 223, hal. 120019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120019>.

- Geo, V. E. et al. (2018) "Study of engine performance, emission and combustion characteristics fueled with diesel-like fuel produced from waste engine oil and waste plastics," *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, Springer, 12, hal. 1–9.
- Gimbun, J. et al. (2013) "Biodiesel Production from Rubber Seed Oil using Activated Cement Clinker as Catalyst," *Procedia Engineering*, 53, hal. 13–19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.003>.
- Godfrey, O. O. et al. (2019) "Alkyd resin from rubber seed oil/linseed oil blend: A comparative study of the physiochemical properties," *Heliyon*, 5(5), hal. 0–4. doi: [10.1016/j.heliyon.2019.e01621](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01621).
- Gong, C. et al. (2019) "Influence of ignition timing on combustion and emissions of a spark-ignition methanol engine with added hydrogen under lean-burn conditions," *Fuel*. Elsevier, 235, hal. 227–238.
- Gouveia, L. et al. (2017) *Biodiesel from microalgae, Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products*. Elsevier Ltd. doi: [10.1016/B978-0-08-101023-5.00010-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00010-8).
- Gurdeep Singh, H. K. et al. (2017) "Refining of crude rubber seed oil as a feedstock for biofuel production," *Journal of Environmental Management*, 203, hal. 1011–1016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.021>.
- Gurdeep Singh, H. K. et al. (2021) "Five-lump kinetic approach on biofuel production from refined rubber seed oil over Cu/ZSM-5 catalyst via catalytic cracking reaction," *Renewable Energy*, 171, hal. 1445–1453. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.085>.
- Hajjari, M. et al. (2017) "A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 72(January), hal. 445–464. doi: [10.1016/j.rser.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034).
- He, D. dan Liu, L. (2019) *Analytical aspects of rice bran oil, Rice Bran and Rice Bran Oil: Chemistry, Processing and Utilization*. Elsevier Inc. doi: [10.1016/B978-0-12-812828-2.00007-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812828-2.00007-X).
- Huang, J. et al. (2020) "Effects of methanol blending on combustion characteristics and various emissions of a diesel engine fueled with soybean biodiesel," *Fuel*. Elsevier, 282, hal. 118734.

- Huo, X., Lu, Q. dan Wang, J. (2022) "Liaw-UNIFAC flash point model for alcohols-kerosene/diesel fuel blends using average fuel structure," *Process Safety and Environmental Protection*. Elsevier, 160, hal. 400–410. doi: 10.1016/j.psep.2022.02.027.
- Hürdoğan, E. et al. (2017) "Experimental investigation on performance and emission characteristics of waste tire pyrolysis oil–diesel blends in a diesel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), hal. 23373–23378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.126>.
- Jemima Romola, C. V. et al. (2021) "A comprehensive review of the selection of natural and synthetic antioxidants to enhance the oxidative stability of biodiesel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 145(April), hal. 111109. doi: 10.1016/j.rser.2021.111109.
- Jha, K. K. dan Kannan, T. T. M. (2021) "Alternate fuel preparation in low cost from waste plastic: A review," *Materials Today: Proceedings*, 37, hal. 3656–3657. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.802>.
- Jisieike, C. F. dan Betiku, E. (2020) "Rubber seed oil extraction: Effects of solvent polarity, extraction time and solid-solvent ratio on its yield and quality," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 24, hal. 101522. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101522>.
- K., S. dan Udayakumar, R. (2020) "Comparative evaluation of the performance of rice bran and cotton seed biodiesel blends in VCR diesel engine," *Energy Reports*. Elsevier Ltd, 6, hal. 795–801. doi: 10.1016/j.egyr.2019.12.005.
- Kaimal, V. K. dan Vijayabalan, P. (2015) "A detailed study of combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil and its blends," *Energy Conversion and Management*, 105, hal. 951–956. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.043>.
- Kaisan, M. U. et al. (2020) "Calorific value, flash point and cetane number of biodiesel from cotton, jatropha and neem binary and multi-blends with diesel," *Biofuels*. Taylor & Francis, 11(3), hal. 321–327. doi: 10.1080/17597269.2017.1358944.
- Kalargaris, I., Tian, G. dan Gu, S. (2017a) "Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil," *Fuel Processing Technology*. The Authors Elsevier B.V., 157, hal. 108–115. doi: 10.1016/j.fuproc.2016.11.016.

- Kalargaris, I., Tian, G. dan Gu, S. (2017b) "Experimental evaluation of a diesel engine fuelled by pyrolysis oils produced from low-density polyethylene and ethylene–vinyl acetate plastics," *Fuel Processing Technology*. The Authors, 161, hal. 125–131. doi: 10.1016/j.fuproc.2017.03.014.
- Kalargaris, I., Tian, G. dan Gu, S. (2017c) "Investigation on the long-term effects of plastic pyrolysis oil usage in a diesel engine," *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 142, hal. 49–54. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.009.
- Kalargaris, I., Tian, G. dan Gu, S. (2017d) "The utilisation of oils produced from plastic waste at different pyrolysis temperatures in a DI diesel engine," *Energy*, 131, hal. 179–185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.024>.
- Kalargaris, I., Tian, G. dan Gu, S. (2018) "Experimental characterisation of a diesel engine running on polypropylene oils produced at different pyrolysis temperatures," *Fuel*. Elsevier, 211(July 2017), hal. 797–803. doi: 10.1016/j.fuel.2017.09.101.
- Kaminsky, W., Schlesselmann, B. dan Simon, C. M. (1996) "Thermal degradation of mixed plastic waste to aromatics and gas," *Polymer Degradation and Stability*. Elsevier, 53(2), hal. 189–197.
- Karami, R. et al. (2019) "Performance Analysis of Direct Injection Diesel Engine Fueled with Diesel-Tomato Seed Oil Biodiesel Blending by ANOVA and ANN," *Energies*. doi: 10.3390/en12234421.
- Kareddula, V. K. dan Puli, R. K. (2018) "Influence of plastic oil with ethanol gasoline blending on multi cylinder spark ignition engine," *Alexandria Engineering Journal*. Faculty of Engineering, Alexandria University, 57(4), hal. 2585–2589. doi: 10.1016/j.aej.2017.07.015.
- Kiernan, J. G., Foster, A. D. dan Harden, D. T. (1978) *Gas Turbine Fuels and Fuel Systems.*, Power Engineering (Barrington, Illinois). doi: 10.1016/B978-0-12-410461-7.00007-9.
- Klajn, F. F. et al. (2020) "Comparison of the emissions and performance of ethanol-added diesel–biodiesel blends in a compression ignition engine with those of pure diesel," *Environmental Technology* (United Kingdom). Taylor & Francis, 41(4), hal. 511–520. doi: 10.1080/09593330.2018.1504122.

- Knothe, G. dan Steidley, K. R. (2007) "Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures," *Fuel*, 86(16), hal. 2560–2567. doi: 10.1016/j.fuel.2007.02.006.
- Knothe, G. dan Steidley, K. R. (2018) "The effect of metals and metal oxides on biodiesel oxidative stability from promotion to inhibition," *Fuel Processing Technology*. Elsevier, 177(April), hal. 75–80. doi: 10.1016/j.fuproc.2018.04.009.
- Komala Sari, C. (2021) *Densitas, Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain*.
- Kumar Jha, K. dan Kannan, T. T. M. (2021) "Recycling of plastic waste into fuel by pyrolysis - a review," *Materials Today: Proceedings*, 37, hal. 3718–3720. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.181>.
- Kumar, P. S. dan Sankaranarayanan, G. (2016) "Investigation on environmental factors of waste plastics into oil and its emulsion to control the emission in DI diesel engine," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134, hal. 440–444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.021>.
- Kumar, S. et al. (2013) "Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine," *Energy Conversion and Management*, 74, hal. 323–331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.028>.
- Kumar, S. L., Radjarejsri, S. dan Jawahar, R. R. (2020) "Characterization of waste plastic oil as biodiesel in IC engines," *Materials Today: Proceedings*, 33, hal. 833–838. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.272>.
- Kumar, S. S. et al. (2021) "Combustion, performance, and emission behaviors of biodiesel fueled diesel engine with the impact of alumina nanoparticle as an additive," *Sustainability*. MDPI, 13(21), hal. 12103.
- Kumar, S., Yadav, K. dan Dwivedi, G. (2018) "Impact analysis of Oxidation Stability for Biodiesel & its Blends," *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 3), hal. 19255–19261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.283>.
- Lakzian, K. dan Liaw, H. J. (2021) "Flash point investigation of ternary mixtures of 1-butanol/2-pentanol + acetic acid + ethylbenzene," *Process Safety*

- and Environmental Protection. Institution of Chemical Engineers, 154, hal. 131–141. doi: 10.1016/j.psep.2021.08.013.
- Le, H. N. T. et al. (2018) “Biodiesel Production from Rubber Seed Oil by Transesterification Using a Co-solvent of Fatty Acid Methyl Esters,” Chemical Engineering and Technology, 41(5), hal. 1013–1018. doi: 10.1002/ceat.201700575.
- Loganathan, S. (2011) Biohydro-fined diesel (BHD) and biodiesel (BOD) production process and property review, Institution of Mechanical Engineers - Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport. Woodhead Publishing Limited. doi: 10.1533/9780857095879.2.97.
- Lüneburger, S. et al. (2022) “Biodiesel production from Hevea Brasiliensis seed oil,” Fuel, 324, hal. 124639. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124639>.
- Luning Prak, D. et al. (2021) “Cetane number, derived cetane number, and cetane index: When correlations fail to predict combustibility,” Fuel. Elsevier Ltd, 289(December 2020), hal. 119963. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119963.
- Mahmood, A. et al. (2021) “Bio-diesel production of sunflower through sulphur management in a semi-arid subtropical environment,” Environmental Science and Pollution Research. Springer, hal. 1–11.
- Mangesh, V L, Padmanabhan, S., Tamizhdurai, P. dan Ramesh, A. (2020) “Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel,” Journal of Cleaner Production, 246, hal. 119066. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119066>.
- Mangesh, V L, Padmanabhan, S., Tamizhdurai, P., Narayanan, S., et al. (2020) “Combustion and emission analysis of hydrogenated waste polypropylene pyrolysis oil blended with diesel,” Journal of Hazardous Materials, 386, hal. 121453. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121453>.
- Mangesh, V. L. et al. (2020) “Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel,”

- Journal of Cleaner Production. Elsevier Ltd, 246, hal. 119066. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119066.
- Mangesh, V. L. et al. (2020) "Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel," Journal of Cleaner Production, 246, hal. 119066. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119066>.
- Mani, M., Nagarajan, G. dan Sampath, S. (2011) "Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine," Energy. Elsevier, 36(1), hal. 212–219.
- Maqsood, T. et al. (2021a) "Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 159, hal. 105295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>.
- Marcilla, A., Beltrán, M. I. dan Navarro, R. (2009) "Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions," Applied Catalysis B: Environmental. Elsevier, 86(1–2), hal. 78–86.
- Mariappan, M., Panithasan, M. S. dan Venkadesan, G. (2021) "Pyrolysis plastic oil production and optimisation followed by maximum possible replacement of diesel with bio-oil/methanol blends in a CRDI engine," Journal of Cleaner Production, 312, hal. 127687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127687>.
- Maryudi, Salamah, S. dan Aktawan, A. (2018) "Product distribution of pyrolysis of polystyrene foam waste using catalyst of natural zeolite and nickel/silica," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, hal. 12012.
- Mastral, A. M. et al. (2001) "Assesment of phenanthrene removal from hot gas by porous carbons," Energy & fuels. ACS Publications, 15(1), hal. 1–7.
- Mastral, F. J. et al. (2003) "Fluidized bed thermal degradation products of HDPE in an inert atmosphere and in air–nitrogen mixtures," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Elsevier, 70(1), hal. 1–17.
- Melvin Jose, D. F. et al. (2011) "A multi-variant approach to optimize process parameters for biodiesel extraction from rubber seed oil," Applied

- Energy, 88(6), hal. 2056–2063. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.024>.
- Miandad, R et al. (2017) “Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, hal. 239–252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>.
- Milne, B. J., Behie, L. A. dan Berruti, F. (1999) “Recycling of waste plastics by ultrapyrolysis using an internally circulating fluidized bed reactor,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier, 51(1–2), hal. 157–166.
- Mondal, T. (2023) “Experimental investigation on slow thermal pyrolysis of real-world plastic wastes in a fixed bed reactor to obtain aromatic rich fuel grade liquid oil,” *Journal of Environmental Management*. Elsevier, 344, hal. 118680.
- Monieta, J. dan Kasyk, L. (2021) “Optimization of design and technology of injector nozzles in terms of minimizing energy losses on friction in compression ignition engines,” *Applied Sciences*. MDPI, 11(16), hal. 7341.
- Morshed, M. et al. (2011) “Rubber seed oil as a potential source for biodiesel production in Bangladesh,” *Fuel*, 90(10), hal. 2981–2986. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.020>.
- Ndiaye, M. et al. (2020) “Reuse of waste animal fat in biodiesel: Biorefining heavily-degraded contaminant-rich waste animal fat and formulation as diesel fuel additive,” *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 145, hal. 1073–1079. doi: [10.1016/j.renene.2019.06.030](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.030).
- Ni, Z. et al. (2020) “Antioxidative performance and oil-soluble properties of conventional antioxidants in rubber seed oil biodiesel,” *Renewable Energy*, 145, hal. 93–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.045>.
- Oni, B. A., Sanni, S. E. dan Olabode, O. S. (2021) “Production of fuel-blends from waste tyre and plastic by catalytic and integrated pyrolysis for use in compression ignition (CI) engines,” *Fuel*, 297, hal. 120801. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120801>.
- Onoji, S. E. et al. (2016) “Rubber seed oil: A potential renewable source of biodiesel for sustainable development in sub-Saharan Africa,” *Energy*

- Conversion and Management, 110, hal. 125–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.002>.
- Onoji, S. E. et al. (2022) “Rubber seed (*Hevea brasiliensis*) oil biodiesel emission profiles and engine performance characteristics using a TD202 diesel test engine,” *Biofuels*. Taylor & Francis, 13(4), hal. 423–430.
- Özyüğüran, A. dan Yaman, S. (2017) “Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis,” *Energy Procedia*, 107(September 2016), hal. 130–136. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.149.
- pal, S. et al. (2019) “Effect of injection timing on performance and emission characteristics of single cylinder diesel engine running on blends of diesel and waste plastic fuels,” *Materials Today: Proceedings*, 17, hal. 209–215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.420>.
- Palani, Y. et al. (2022) “Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: A review,” *Environmental Engineering Research*. Korean Society of Environmental Engineers, 27(1).
- Paul, A. K. et al. (2021) “Comparative study of physicochemical and rheological property of waste cooking oil, castor oil, rubber seed oil, their methyl esters and blends with mineral diesel fuel,” *Materials Science for Energy Technologies*. The Authors, 4, hal. 148–155. doi: 10.1016/j.mset.2021.03.004.
- Paul, A. K., Borugadda, V. B., Reshad, A. S., Bhalerao, Machhindra S., et al. (2021) “Comparative study of physicochemical and rheological property of waste cooking oil, castor oil, rubber seed oil, their methyl esters and blends with mineral diesel fuel,” *Materials Science for Energy Technologies*. The Authors, 4, hal. 148–155. doi: 10.1016/j.mset.2021.03.004.
- Paul, A. K., Borugadda, V. B., Reshad, A. S., Bhalerao, Machhindra S, et al. (2021) “Comparative study of physicochemical and rheological property of waste cooking oil, castor oil, rubber seed oil, their methyl esters and blends with mineral diesel fuel,” *Materials Science for Energy Technologies*, 4, hal. 148–155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.03.004>.
- Piloto-Rodríguez, R. et al. (2013) “Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression,” *Energy*

- Conversion and Management, 65, hal. 255–261. doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.023.
- Pinto, F. et al. (1999) “Pyrolysis of plastic wastes. 1. Effect of plastic waste composition on product yield,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier, 51(1–2), hal. 39–55.
- Pullen, J. dan Saeed, K. (2012) “An overview of biodiesel oxidation stability,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 16(8), hal. 5924–5950. doi: 10.1016/j.rser.2012.06.024.
- Qureshi, M. S. et al. (2020) “Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, hal. 104804. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>.
- Rajesh, B. dan Rajesh, K. (2021) “Experimental investigation on single cylinder four stroke tri-charged diesel engine using pyrolysis oil at different proportions,” *Materials Today: Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.078>.
- Ramadhas, A. S., Jayaraj, S. dan Muraleedharan, C. (2005) “Biodiesel production from high FFA rubber seed oil,” *Fuel*, 84(4), hal. 335–340. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.09.016>.
- Razzaq, L. et al. (2020) “Maximising Yield and Engine Efficiency Using Optimised Waste Cooking Oil Biodiesel,” *Energies*. doi: 10.3390/en13225941.
- Reshad, A. S., Tiwari, P. dan Goud, V. V (2015) “Extraction of oil from rubber seeds for biodiesel application: Optimization of parameters,” *Fuel*, 150, hal. 636–644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.058>.
- Roschat, W. et al. (2017) “Rubber seed oil as potential non-edible feedstock for biodiesel production using heterogeneous catalyst in Thailand,” *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 101, hal. 937–944. doi: 10.1016/j.renene.2016.09.057.
- Ruhul, M. A. et al. (2016) “Impact of fatty acid composition and physicochemical properties of *Jatropha* and Alexandrian laurel biodiesel blends: An analysis of performance and emission characteristics,” *Journal of cleaner production*. Elsevier, 133, hal. 1181–1189.

- Sabarish, C. S., Sebastian, J. dan Muraleedharan, C. (2016) "Extraction of Oil from Rubber Seed through Hydraulic Press and Kinetic Study of Acid Esterification of Rubber Seed Oil," *Procedia Technology*, 25, hal. 1006–1013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.200>.
- Saeed, S. M. et al. (2021) "Optimization of rubber seed oil content as bio-oil rejuvenator and total water content for cold recycled asphalt mixtures using response surface methodology," *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier Ltd, 15(March), hal. e00561. doi: [10.1016/j.cscm.2021.e00561](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00561).
- Samuel, O. D. et al. (2019) "Production of fatty acid ethyl esters from rubber seed oil in hydrodynamic cavitation reactor: Study of reaction parameters and some fuel properties," *Industrial Crops and Products*, 141, hal. 111658. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111658>.
- Sander, A. et al. (2018) "The influence of animal fat type and purification conditions on biodiesel quality," *Renewable Energy*, 118, hal. 752–760. doi: [10.1016/j.renene.2017.11.068](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.068).
- Şanlı, B. G. dan Uludamar, E. (2020) "Energy and exergy analysis of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel fuels at various engine speeds," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Taylor & Francis, 42(11), hal. 1299–1313. doi: [10.1080/15567036.2019.1635229](https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1635229).
- Sarin, A. et al. (2020) "Study of kinematic viscosity and density of biodiesels exposed to radiations," *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, 46(xxxx), hal. 5516–5522. doi: [10.1016/j.matpr.2020.09.257](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.257).
- Sekar, M. et al. (2021) "Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor," *Journal of Cleaner Production*, 318, hal. 128551. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128551>.
- Sekar, M. et al. (2022) "Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design," *Journal of Environmental Management*, 302, hal. 114046. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114046>.
- Selvan, B. K. et al. (2022) "Utilization of biodiesel blended fuel in a diesel engine–Combustion engine performance and emission characteristics study," *Fuel*. Elsevier, 311, hal. 122621.

- Sia, C. B. et al. (2020) "Evaluation on biodiesel cold flow properties, oxidative stability and enhancement strategies: A review," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. Elsevier Ltd, 24(July 2019), hal. 101514. doi: 10.1016/j.bcab.2020.101514.
- Singh, D. et al. (2020) "A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel," *Fuel*. Elsevier, 262(October), hal. 116553. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116553.
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S L, et al. (2020) "A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel," *Fuel*, 262, hal. 116553. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116553>.
- Singh, H. K. A. G., Yusup, S. dan Wai, C. K. (2016) "Physicochemical Properties of Crude Rubber Seed Oil for Biogasoline Production," *Procedia Engineering*, 148, hal. 426–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.441>.
- Singh, R. K. et al. (2020) "Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics," *Fuel*, 262, hal. 116539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116539>.
- Singh, T. S., Verma, T. N. dan Singh, H. N. (2020) "A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study," *Fuel*, 277, hal. 118176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118176>.
- Song, J., Sun, K. dan Huang, Q. (2021) "The effect of thermal aging on the composition of pyrolysis oil fuel derived from typical waste plastics," *Fuel Processing Technology*, 218, hal. 106862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106862>.
- Srinuanpan, S. et al. (2018) "Strategies to increase the potential use of oleaginous microalgae as biodiesel feedstocks: Nutrient starvations and cost-effective harvesting process," *Renewable Energy*, 122, hal. 507–516. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.121>.
- Sugebo, B. et al. (2021) "Evaluation and characterization of rubber seed oil for biodiesel production," *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi: 10.1007/s13399-021-01900-4.
- Suzihaque, M. U. H. et al. (2022) "A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from

- waste cooking oil (WCO),” *Materials Today: Proceedings*. Elsevier, 63, hal. S484–S489.
- Tarigan, J. B. et al. (2022) “Waste rubber seeds as a renewable energy source: direct biodiesel production using a controlled crushing device,” *RSC advances*. Royal Society of Chemistry, 12(4), hal. 2094–2101.
- Thangarasu, V. dan Anand, R. (2019) Physicochemical fuel properties and tribological behavior of aegle marmelos correa biodiesel, *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/b978-0-08-102728-8.00011-5.
- Tiefenbacher, K. F. (2017) Technology of Main Ingredients—Sweeteners and Lipids, Wafer and Waffle. doi: 10.1016/b978-0-12-809438-9.00003-x.
- Tulashie, S. K., Boadu, E. K. dan Dapaah, S. (2019) “Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana,” *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, hal. 417–424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.05.002>.
- Uzoh, C. F. et al. (2021) “Optimal route for effective conversion of rubber seed oil to biodiesel with desired key fuel properties,” *Journal of Cleaner ...* Elsevier.
- Varghese, G., Saeed, K. dan Rutt, K. J. (2021) “Determination of the oxidative stability of biodiesel fuels by near-infrared spectroscopy,” *Fuel*. Elsevier Ltd, 290(January), hal. 120015. doi: 10.1016/j.fuel.2020.120015.
- Venkatesan, H. et al. (2018) “Experimental study on combustion and performance characteristics in a DI CI engine fuelled with blends of waste plastic oil,” *Alexandria Engineering Journal*. Faculty of Engineering, Alexandria University, 57(4), hal. 2257–2263. doi: 10.1016/j.aej.2017.09.001.
- Vishal, D. et al. (2020) “Optimization of alkali-catalyzed transesterification of rubber oil for biodiesel production & its impact on engine performance,” *Renewable Energy*, 158, hal. 167–180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.136>.
- Wang, L. et al. (2020) “Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and high concentration phenolic wastewater for production of solid biofuel with increased calorific value,” *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 255, hal. 120317.

- Wiriyaumpaiwong, S. dan Jamradloedluk, J. (2017) "Distillation of Pyrolytic Oil Obtained from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes," *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 138, hal. 111–115. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.071.
- Yahya, S. I. dan Aghel, B. (2021) "Estimation of kinematic viscosity of biodiesel-diesel blends: Comparison among accuracy of intelligent and empirical paradigms," *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 177, hal. 318–326. doi: 10.1016/j.renene.2021.05.092.
- Yang, R. et al. (2011) "Biodiesel production from rubber seed oil using poly (sodium acrylate) supporting NaOH as a water-resistant catalyst," *Bioresource Technology*, 102(3), hal. 2665–2671. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.131>.
- Yaşar, F. (2020) "Comparision of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type," *Fuel*, 264(August 2019). doi: 10.1016/j.fuel.2019.116817.
- Zhu, Y. et al. (2014) "Investigation of rubber seed yield in Xishuangbanna and estimation of rubber seed oil based biodiesel potential in Southeast Asia," *Energy*. Elsevier Ltd, 69, hal. 837–842. doi: 10.1016/j.energy.2014.03.079.



Minyak Pirolisis Plastik Sebagai ADITIF Pada BIODIESEL BIJI KARET

Permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh limbah plastik yang semakin meningkat setiap tahunnya menjadi salah satu pendorong utama penyusunan buku ini. Plastik yang sulit terurai dan menumpuk di lingkungan tidak hanya mencemari tanah dan air, tetapi juga membahayakan kehidupan makhluk hidup. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi dampak negatif limbah plastik melalui teknologi pirolisis menjadi sangat penting. Pirolisis plastik merupakan proses yang mengubah limbah plastik menjadi minyak yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

Di sisi lain, biji karet sebagai bahan baku biodiesel memiliki potensi yang besar dalam pengembangan energi terbarukan. Biji karet yang merupakan hasil samping dari industri karet seringkali tidak dimanfaatkan secara optimal. Dengan mengolah biji karet menjadi biodiesel, kita tidak hanya dapat menghasilkan energi terbarukan yang ramah lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan nilai ekonomi dari komoditas karet.

Buku ini membahas:

Bab 1 Minyak Pirolisis Plastik

Bab 2 Bahan Baku Biodiesel

Bab 3 Biji Karet (*Hevea brasiliensis*) Sebagai Bahan Baku Biodiesel

Bab 4 Sifat Fisika-kimia Bahan Bakar Cair Jenis Diesel

Bab 5 Hasil Pengujian Sifat Fisika Kimia dan Performa Mesin Diesel



YAYASAN KITA MENULIS
press@kitamenulis.id
www.kitamenulis.id

ISBN 978-623-113-405-9

