

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Populasi global yang meningkat menimbulkan kekhawatiran atas konsumsi, terutama dalam kaitannya dengan penggunaan energi dan generasi berikutnya. Kekhawatiran ini telah menjadi titik fokus bagi para peneliti di seluruh dunia. Dalam kerangka khusus ini, menipisnya kebutuhan energi, ditambah dengan efek merugikan limbah minyak terhadap polusi dan lingkungan, telah mendorong para peneliti untuk melakukan lebih banyak penyelidikan dengan tujuan mengembangkan produk yang lebih bersih dan lebih berkelanjutan secara ekologis. Minyak goreng limbah (WCO) mengalami transformasi fisik dan kimia melalui berbagai proses kimia. Perusahaan makanan cepat saji, perusahaan layanan makanan, perusahaan perhotelan, dan perusahaan gula-gula dapat dianggap sebagai kontributor signifikan limbah minyak goreng (Milano et al., 2022).

Masalah pembuangan pelumas komersial yang merugikan lingkungan perlu diperhatikan, sehingga banyak peneliti yang mengeksplorasi bahan baku pelumas berbasis bio yang ramah lingkungan seperti bahan baku nabati non pangan (Mohamed et al., 2022; Perera, Yan, Xu, Yang, & Yan, 2022) seperti minyak jelantah (UCO) (Joshi, Bhandari, Patel, & Karve, 2023; Negi, Singh, Atray, & Singh, 2023), minyak *calophyllum inophyllum* (Zaid, Singh, Kumar, & Gupta, 2020), minyak *jatropha curcas* (Farfan-Cabrera, Gallardo-Hernández, & Pérez-González, 2017), minyak biji karet (Aravind, Joy, & Nair, 2015), dan minyak kapok (Shankar, Manikandan, Raja, Priyadharashini, & Pramanik, 2021). Untuk menghindari krisis minyak mentah yang dapat dikonsumsi di seluruh dunia, yaitu jenis kelapa sawit mentah, akan mengakibatkan kenaikan harga minyak mentah tersebut (Silitonga et al., 2019) Akibatnya, biaya produksi biofuel akan naik empat hingga lima belas kali lipat dari pelumas mineral konvensional (Wang et al., 2014).

Dalam komersialisasi biodiesel dan bio pelumas, permasalahan utamanya adalah harga bahan baku, terutama minyak nabati pangan (Gupta, Zaid, Kumar, & Singh, 2020) Oleh karena itu, pembuatan bio pelumas dari minyak jelantah merupakan pilihan yang hemat biaya dan dapat mengatasi masalah pembuangan minyak jelantah (UCO). Dari tahun 2023 hingga 2030, tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) diproyeksikan sebesar 4,8%, dengan pasar minyak jelantah global diperkirakan akan meningkat dari USD 7,29 miliar pada tahun 2022 menjadi USD 10,61 miliar pada tahun 2030 (imarcgroup, 2024) Pada tahun 2023, produksi minyak sawit Indonesia diperkirakan sekitar 46,98 juta metrik ton, menunjukkan tren kenaikan yang konsisten. Produksi mengalami pertumbuhan yang signifikan sebesar 7,15% dari tahun sebelumnya, disebabkan oleh kondisi cuaca yang menguntungkan dan perluasan area perkebunan. Tingginya potensi minyak sawit di Indonesia menyebabkan banyaknya minyak jelantah yang berpotensi digunakan bahan baku bio pelumas. Mengubah UCO menjadi bio pelumas atau bio-produk lainnya tidak hanya akan menghilangkan dampak negatif UCO terhadap lingkungan, tetapi juga akan mencegah daur ulang UCO ilegal sebagai minyak goreng sawit palsu (Almasi, Ghobadian, Najafi, & Soufi, 2021; Wang et al., 2014). Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa pasokan bahan baku minyak jelantah untuk biopelumas memiliki potensi besar untuk digunakan di beberapa sektor, termasuk sektor biopelumas.

Pelumas bio berasal dari sumber terbarukan, termasuk minyak nabati dan lemak hewani, berfungsi sebagai pelumas alternatif dan pengganti atau tambahan yang unggul untuk pelumas berbasis minyak bumi tradisional (D. Cao et al., 2024; Chowdary, Kotia, Lakshmanan, Elsheikh, & Ali, 2021; Gul et al., 2021; Joshi, Bhandari, Patel, et al., 2023). Pelumas bio berfungsi sebagai alternatif yang sangat baik untuk pelumas berbasis minyak bumi konvensional. Estimasi konsumsi industri pelumas global diproyeksikan mengalami peningkatan yang signifikan, mencapai compound annual growth rate (CAGR) sebesar 3,8%, dari USD 139,44 miliar pada tahun 2023 menjadi USD 180,21 miliar pada tahun 2030. Setiap tahun, 40 juta metrik ton minyak pelumas diproduksi di seluruh dunia, dan sekitar

setengahnya dibuang ke lingkungan dengan dampak lingkungan negatif seperti polusi air, tanah, dan laut (Shankar et al., 2021; Thapar, 2024).

Mengurangi dampak lingkungan dan menemukan sumber daya alternatif untuk memproduksi utilitas, seperti pelumas bio, telah menjadi area fokus yang signifikan bagi banyak peneliti (Aziz, Yunus, Rashid, & Zulkifli, 2016; Hussein, Attia, Fouad, & ElSheltawy, 2021; Milano et al., 2022). Limbah minyak goreng adalah sumber daya yang sangat berharga untuk mensintesis berbagai macam produk di antara bahan berbasis limbah. Saat menggoreng makanan dengan minyak sayur, ada produk sampingan dari limbah minyak goreng yang perlu dimurnikan karena mengandung komponen beracun. Menggunakan kembali limbah minyak goreng ini dapat berkontribusi pada produksi pelumas berbasis bio, menawarkan alternatif berkelanjutan untuk pelumas berbasis mineral dan memberikan solusi yang aman untuk mendaur ulang limbah minyak jelantah (Joshi, Bhanderi, & Patel, 2023; Nogales-Delgado, Encinar, & González, 2023).

Penulis melakukan proses transesterifikasi pada tahap awal penelitian. Transesterifikasi adalah teknik yang sangat efektif untuk menghasilkan biodiesel, dengan metode yang relatif tidak rumit dan waktu reaksi yang lebih singkat. Produksi gliserol dan *fatty acid methyl ester* (FAME) dapat dicapai dengan melakukan reaksi transesterifikasi menggunakan katalis dan alkohol (Silitonga et al., 2013). Untuk mencapai produksi FAME berkualitas tinggi, sangat penting untuk mempertimbangkan berbagai faktor yang dapat memengaruhi proses reaksi transesterifikasi. Faktor-faktor tersebut meliputi pengaruh asam lemak bebas dan tingkat kelembaban, dampak rasio molar alkohol dan katalis, serta pengaruh waktu reaksi, suhu, dan agitasi (Dharma et al., 2016).

Literatur saat ini menerbitkan sejumlah besar penelitian tentang bio-pelumas yang berasal dari minyak jelantah (Hussein et al., 2021). Namun, hanya sejumlah kecil peneliti yang mendedikasikan diri untuk mengoptimalkan parameter proses produksi bio-pelumas. Pengoptimalan ini sangat penting untuk mencapai hasil terbaik untuk bio-pelumas menggunakan Metode Respon Permukaan (RSM). Selain itu, penyelidikan lebih lanjut diperlukan untuk mengkarakterisasi kinerja tribologis biopelumas ini. Melalui proses

transesterifikasi dan *trimethylolpropane ester*, penelitian ini menggunakan limbah minyak goreng dari penggorengan makanan untuk menghasilkan biodiesel dan biopelumas. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan biopelumas dari sumber daya berkelanjutan, seperti limbah organik. Pengaruh parameter penelitian terhadap reaksi trimethylolpropana diselidiki, dan nilai parameter optimal ditentukan. Proses reaksi *ester thrimethylolpropane* menggunakan *trimethylolpropane* (TMP) dan *sodium methoxide* untuk menghasilkan biopelumas.

Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi viskositas dan indeks viskositas, bersamaan dengan analisis yang lebih dalam terhadap karakteristik tribologi serta perbandingan dengan pelumas komersial.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana memproduksi biopelumas dari limbah minyak goreng (*waste cooking oil*) dengan nilai hasil produksi (rendemen) yang tinggi?
2. Bagaimana sifat fisikokimia biopelumas yang dihasilkan dari minyak goreng limbah?
3. Bagaimana perbandingan sifat tribology biopelumas dengan pelumas komersil SAE 15W40?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini bersifat konprehensif yang bermula dari upaya mengurangi biaya produksi dengan menggunakan bahan baku yang lebih murah dan tidak mempengaruhi harga minyak mentah yang dikonsumsi manusia, dan mengurangi harga biopelumas. Secara khusus, tujuannya adalah untuk:

1. Memproduksi biopelumas dari limbah minyak goreng (*waste cooking oil*) dengan nilai hasil produksi (rendemen) yang tinggi
2. Menganalisis sifat fisikokimia biopelumas yang dihasilkan dari minyak goreng limbah

3. Menganalisis perbandingan sifat tribology biopelumas dengan pelumas komersil SAE 15W40

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagi Penulis

Penelitian ini membantu penulis untuk belajar menjadi pemikir, peneliti, dan penemu yang mampu mengembangkan suatu ilmu pengetahuan terkait *Renewable Energy* (energi terbarukan) agar menjadi lebih luas dan bermanfaat bagi khalayak umum.

2. Bagi Masyarakat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat membuka peluang masyarakat untuk hidup sehat dengan tidak menggunakan limbah minyak goreng untuk dikonsumsi serta sebagai informasi energi alternatif bagi masyarakat untuk dapat menemukan solusi dari masalah yang berkaitan terbatasnya sumber energi konvensional.

3. Bagi Pemerintah

Penelitian ini menjadi masukan dan saran bagi pemerintah dalam mengelola suatu potensi untuk melaksanakan program green energi sehingga krisis energi di negara dapat diatasi

4. Bagi Lingkungan

Hasil penelitian ini menjadi solusi terkait pencemaran lingkungan dari limbah minyak goreng yang ada di lingkungan sekitar

1.5. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup penelitian ini adalah

1. Bahan baku yang digunakan adalah minyak goreng limbah (*waste cooking oil*)
2. Waktu yang diperlukan untuk proses esterifikasi dan transesterifikasi adalah 1.5 jam dengan suhu 60 °C dan putaran 800 rpm.

3. Parameter yang dilakukan proses transesterifikasi ke 2 yaitu temperature 125 0C, pada putaran 500 rpm, sodium methoxide 0.75% (b/b), dan TMP 25%(v/v)
4. Uji sifat fisikokimia biopelumas (Viskositas, Nilai Asam, Titik Nyala, Densitas)
5. Sifat tribologi yang diuji yaitu koefisien gesekan dan *wear scar diameter*

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. BAB 1 PENDAHULUAN
Berisikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penelitian
2. BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA
Berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal hal yang berkaitan dengan penelitian
3. BAB 3 METODE PENELITIAN
Berisikan diagram alir penelitian, alat & bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian yang meliputi persiapan uji operasi, pengoperasian rangkaian alat, dan analisa sampel, serta pengolahan data
4. BAB 4 PEMBAHASAN
5. BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biopelumas

Biopelumas adalah pelumas dari bahan baku *biodegradable* dan terbarukan seperti minyak nabati (Soni & Agarwal, 2014). Biopelumas sangat relevan dalam keadaan di mana perlindungan lingkungan, kebocoran, atau kontaminasi menjadi perhatian. Biopelumas digunakan sebagai oli industri, oli otomotif, dan oli khusus (Mobarak *et al.*, 2014). Biopelumas adalah Pelumas berbahan dasar minyak nabati atau lemak hewani dan semakin populer serta diterima karena sifatnya yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari pemanfaatan biopelumas tidak menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan (Prasannakumar, Sankarannair, Bose, Santhakumari, & Jyothi, 2023). Dalam 15 -20 tahun lagi, pangsa pasar pelumas ramah lingkungan akan meningkat menjadi 15% bahkan hingga 30% di beberapa daerah.

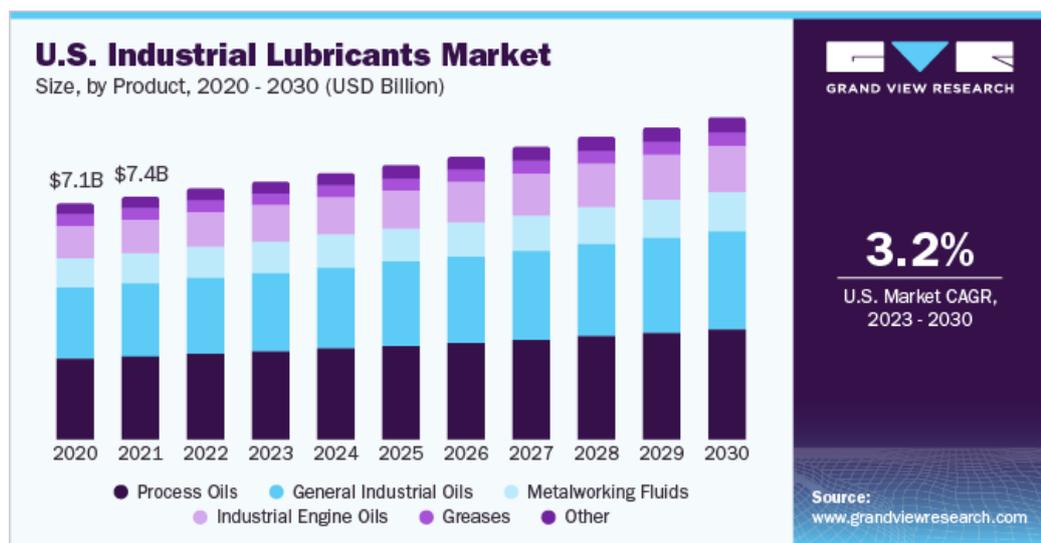
Karena meningkatnya penggunaan biopelumas dalam industri transportasi dan manufaktur, pasar ini diperkirakan akan mengalami pertumbuhan yang signifikan (Panchal, Patel, Chauhan, Thomas, & Patel, 2017). Keuntungan utama biopelumas adalah biodegradabilitas cepat, toksisitas rendah, ramah lingkungan, indeks viskositas lebih tinggi, sifat, dan akibatnya, umur peralatan lebih lama (Otabor, Ifijen, Mohammed, Aigbodion, & Ikhuoria, 2019).

Terdapat lebih dari 350 tanaman penghasil minyak yang diidentifikasi sebagai sumber potensial untuk produksi biopelumas (Syaima *et al.*, 2015). Tanaman penghasil minyak meliputi minyak nabati dan minyak non pangan. Indonesia memiliki potensial sumber daya alam yang besar sehingga banyak para peneliti mengeksplorasi bahan baku pelumas berbasis bio yang ramah lingkungan yaitu bahan baku nabati non pangan (Mohamed *et al.*, 2022; Perera *et al.*, 2022), seperti Minyak goreng limbah (UCO) (Joshi, Bhanderi, Patel, *et al.*, 2023; Negi *et al.*, 2023), *calophyllum inophyllum oil* (Zaid *et al.*, 2020), *jatropha curcas oil* (Farfan-Cabrera *et al.*, 2017; Ude *et al.*, 2023), minyak biji karet

(Aravind et al., 2015). Minyak non-edible dianggap sebagai alternatif potensial pengganti biopelumas karena dapat mengatasi masalah terkait minyak nabati dan harganya lebih terjangkau dibandingkan biji-bijian yang dapat dimakan. Salah satu keuntungan penting penggunaan minyak yang tidak dapat dimakan adalah minyak tersebut tidak menyebabkan persaingan antara makanan manusia/pakan hewan dan penggunaan industri (Joshi, Bhanderi, & Patel, 2023).

2.2. Permintaan Pelumas

Menurut laporan baru yang diterbitkan oleh *Grand View Research*, Ukuran pasar pelumas industri global bernilai USD 53,17 miliar pada tahun 2022 dan diperkirakan akan tumbuh pada tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) sebesar 3,2% dari tahun 2023 hingga 2030. Meningkatnya permintaan bahan kimia ladang minyak karena meningkatnya kegiatan pengeboran dan eksplorasi kemungkinan besar akan berdampak positif pada pasar (Njuguna *et al.*, 2022).



Gambar 2.1 Permintaan Pelumas

Meningkatnya penjualan sepeda motor, tingginya permintaan truk tugas berat dan kendaraan komersial lainnya produksi di sektor otomotif secara global, yang dianggap menguntungkan bagi berkembangnya permintaan pelumas, Kemampuan sektor industri global untuk mengoptimalkan efisiensi mesin

didasarkan pada industri pelumas. Industri otomotif menyumbang lebih dari separuh permintaan pada tahun 2025 (Joshi, Bhanderi, & Patel, 2023).

Dunia sedang bergerak menuju penggunaan biopelumas, khususnya dalam aplikasi otomotif dan industri. Lebih dari 1700 industri manufaktur pelumas berperan penting di seluruh dunia. Permintaan pasar global terhadap pelumas diperkirakan akan meningkat pada tingkat tahunan sebesar 2 % setelahnya (Almasi et al., 2021). Bisnis yang diharapkan seharusnya mencapai USD 166,25 miliar pada tahun 2025 (Kurre & Yadav, 2023). Pangsa pasar biopelumas saat ini sangat rendah yaitu kurang dari 2% dari total produksi pasar pelumas (Garlapati, Mohapatra, Mohanty, & Das, 2021). Setengah dari total produksi pelumas berbahan dasar minyak bumi secara langsung memperburuk kondisi lingkungan dan merupakan skenario yang sangat berbahaya. Oleh karena itu pengembangan dan penggunaan biopelumas telah menjadi bidang yang menarik bagi para peneliti (Reeves, Siddaiah, & Menezes, 2018).

2.3 Sintesis Biopelumas Menggunakan Proses Esterifikasi dan Transesterifikasi

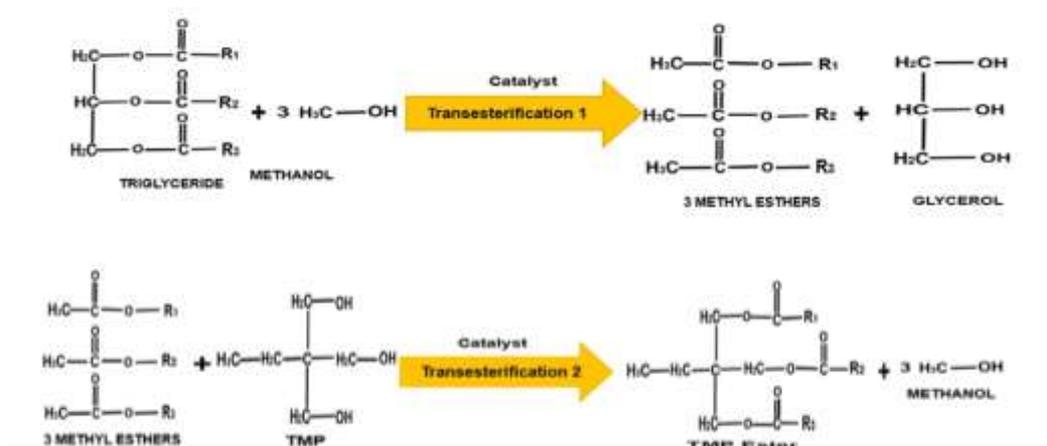
Transesterifikasi/esterifikasi adalah reaksi dengan modifikasi gugus ester triasilgliserida (McNutt, 2016) Reaksi ini dilakukan untuk memperbaiki atom hidrogen yang tidak stabil di dalam posisi seperti yang diselesaikan oleh reaksi transesterifikasi dalam gliserol (Zainal, Zulkifli, Gulzar, & Masjuki, 2018). Reaksi transesterifikasi berlangsung dalam dua tahap. Langkah pertama berkaitan dengan reaksi antara alkohol dan trigliserida untuk mensintesis FAME dan gliserol. Langkah kedua meliputi reaksi antara FAME dan alkohol polihidrat, seperti Trimethylolpropane (TMP), Neopentyl glikol (NPG), Ethylene Glycol (EG) dan Pentaerythritol (PET) (Hussein, Attia, Fouad, & ElSheltawy, 2021).

Di antara alkohol polihidrat yang disebutkan, TMP lebih umum digunakan karena lebih hemat biaya. Produk akhir dari tahap ini adalah metanol dan TMP tryster (TMPTE) (Kamyab *et al.*, 2024). Katalis basa, seperti kalsium oksida (Attia, El-Mekawi, Elardy, & Abdelkader, 2020), natrium dan kalsium metoksida (Attia *et al.*, 2020; Hussein *et al.*, 2021), natrium dan kalium

hidroksida (Kamalakar, Manoj, Prasad, & Karuna, 2015; Muhammad, Usman, & Agada, 2018), dan kalium karbonat (Prasannakumar *et al.*, 2023) pada umumnya digunakan dalam reaksi transesterifikasi. Esterifikasi adalah jenis reaksi lain yang terjadi antara metanol dan asam lemak bebas untuk menghasilkan ester. Dalam reaksi esterifikasi, katalis asam seperti hidrogen klorida (HCl) dan asam sulfat (H₂SO₄) yang umum digunakan (Annisa & Widayat, 2018).

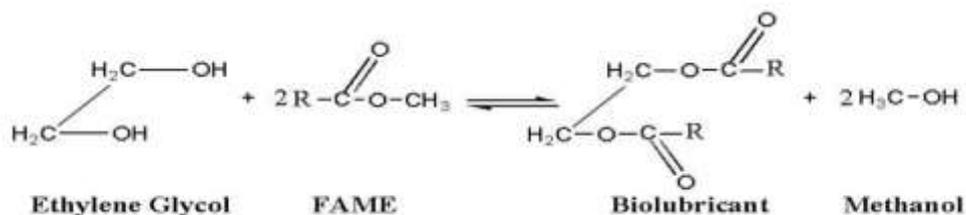
Para peneliti telah melaporkan bahwa modifikasi kimia trigliserida melalui esterifikasi/transesterifikasi lebih murah dibandingkan metode lainnya. Reaksi esterifikasi/ transesterifikasi menghasilkan ketahanan termo-oksidatif yang lebih tinggi, sifat minyak yang lebih baik pada suhu rendah, pelumasan yang lebih baik, dan pengurangan keausan dan COP (Gupta *et al.*, 2020).

Reaksi transesterifikasi/esterifikasi memerlukan bahan baku dengan asam oleat tinggi dan suhu reaksi tinggi (Syahir *et al.*, 2017). Kelebihan utama penggunaan poliol adalah tidak adanya α -hidrogen yang meningkatkan stabilitas termal biopelumas pada suhu tinggi dengan mencegah polimerisasi mandiri membentuk asam lemak bebas (Appiah, Tulashie, Akpari, Rene, & Dodoo, 2022). Gambar 2.2 menunjukkan proses reaksi esterifikasi dan transesterifikasi (yaitu dua tahap) menggunakan alkohol tersier TMP.



Gambar 2. 2 Reaksi esterifikasi dan transesterifikasi (dua tahap) menggunakan poliol TMP

Penelitian lainnya (Hussein *et al.*, 2021) memproduksi biopelumas dari limbah minyak goreng (WCO) atau minyak goreng digunakan untuk sintesis biopelumas melalui reaksi transesterifikasi. Biopelumas (dioleoyl ethylene glycol ester) dibuat dari *fatty acid methyl esters* (FAMES) WCO dengan etilen glikol (EG). Reaksi dilakukan dengan menggunakan katalis heterogen kalsium oksida (CaO). Dioleoyl *ethylene glycol ester* adalah pelumas biodegradable potensial yang dapat digunakan dalam aplikasi pelumas industri. Efek dari perubahan kondisi operasi seperti suhu, rasio molar reaktan, waktu reaksi dan pembebanan katalis dipelajari. Kondisi optimal yang mencapai konversi tertinggi ditemukan 130 °C, 3,5: 1, 1,5 jam dan 1,2% (b / b) dosis katalis. Sifat biopelumas dibandingkan dengan dua biopelumas lainnya dan juga dengan spesifikasi empat pelumas kelas viskositas ISO yang berbeda. Ditemukan bahwa biopelumas yang dihasilkan sesuai dengan tingkat viskositas ISO VG68 dengan penerapan suhu rendah yang lebih baik. Reaksi kimia sintensis biopelumas dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Reaksi kimia sintensis biopelumas

2.4 Jenis katalis

Reaksi transesterifikasi dapat dikatalisis oleh katalis homogen (asam/basa), heterogen, dan enzimatik. Basa homogen mengkatalisis reaksi dengan menghilangkan proton dari alkohol, sehingga meningkatkan reaktivitas. Sebaliknya, asam mengkatalisis reaksi dengan memberikan proton pada gugus karbonil, sehingga meningkatkan reaktivitas (Hotha, Roychowdhury, & Subramanian, 2016). Katalis basa, seperti kalsium oksida (Attia *et al.*, 2020), natrium dan kalsium metoksida (Attia *et al.*, 2020; Hussein *et al.*, 2021), natrium

dan kalium hidroksida (Kamalakar *et al.*, 2015; Muhammad *et al.*, 2018), dan kalium karbonat (Prasannakumar *et al.*, 2023) pada umumnya digunakan dalam reaksi transesterifikasi. Katalis dasar digunakan dalam sintesis biodiesel, sumber lemak dan minyak harus bebas asam lemak atau FFA dapat diabaikan (Hotha *et al.*, 2016).

Kehadiran FFA menyebabkan pembentukan sabun sebagai akibat dari penggunaan katalis basa. Bahan baku berkualitas rendah terdiri dari VO yang tidak dapat dimakan, lemak hewani, minyak jelantah. Katalis asam seperti H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 berfungsi jauh lebih lambat dibandingkan rekan-rekan dasarnya. Oleh karena itu, untuk mensintesis biodiesel dari bahan baku berkualitas rendah, langkah awal yang harus dipertimbangkan adalah mengubah FFA menjadi ester yang dikatalis asam, yang menghasilkan alkil asam lemak. campuran ester dan trigliserida. Kedua, ester yang dihasilkan ini kemudian ditransesterifikasi menggunakan katalis basa dengan metanol/etanol sebagai sumber alkohol.

Namun, proses transesterifikasi dengan katalis asam lambat memerlukan suhu yang lebih tinggi, dan tidak tergantung pada kategori bahan bakunya. Studi esterifikasi dan transesterifikasi dengan katalis asam baru-baru ini menunjukkan konversi yang signifikan (yaitu >91% dan >98%) dan hasil (yaitu >79% dan >80%) masing-masing (Bahadi, Salimon, & Derawi, 2021; Moreira *et al.*, 2020). Dalam kasus reaksi esterifikasi dan transesterifikasi yang dikatalisis secara enzimatik, (Cavalcanti *et al.*, 2018) biopelumas minyak kedelai yang disintesis menggunakan tiga lipase komersial yaitu, polipropilena mikropori dengan alkohol polihidrat yang berbeda (yaitu, neopentil glikol, NPG; trimetilolpropana, TMP; *ethylene glycol*, dan pentaeritritol, PE).

2.5 Bahan Baku Pembuatan Biopelumas

2.5.1 Minyak Goreng Limbah

Bahan baku berasal dari limbah minyak nabati atau umumnya dikenal sebagai minyak goreng sisa. Minyak goreng sisa mudah didapat seperti pemakaian dalam rumah tangga dan restoran serta lebih murah dibanding minyak lainnya (minyak sulingan). Oleh karena itu, dengan menggunakan minyak

tersebut sebagai bahan baku, kita dapat mengurangi biaya pembuatan biodiesel. Keuntungan menggunakan minyak goreng bekas untuk pembuatan biodiesel adalah biaya murah dan mencegah pencemaran lingkungan. Minyak tersebut perlu di-*treat* sebelum dibuang ke lingkungan untuk mencegah polusi. Karena mahalnya biaya pembuangan, banyak orang membuang limbah minyak goreng langsung ke lingkungan terutama di daerah pedesaan. Sehingga, penggunaan minyak goreng bekas sebagai bahan baku merupakan cara efektif untuk mengurangi biaya pembuatan biodiesel (Mohadesi, Aghel, Maleki, & Ansari, 2019). Potensi minyak jelantah (UCO) untuk produksi biodiesel telah diteliti sebelumnya.

Namun, ada keterbatasan dari sudut pandang tribologi ketika menggunakan UCO sebagai bahan bakar mesin karena UCO secara signifikan mengurangi kinerja mesin dan merusak komponen mesin. Akibatnya, dalam dua dekade terakhir, para peneliti telah menunjukkan minat yang besar dalam menemukan cara untuk mengubah UCO menjadi bahan baku oleokimia yang berbiaya rendah. Pendekatan ini bertujuan untuk memitigasi dampak negatif UCO (Aboelazayem & Alayoubi, 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa asam lemak yang ada dalam UCO terutama terdiri dari asam oleat, asam palmitat, asam lemak tak jenuh ganda, dan asam stearat (Liu *et al.*, 2014). Dengan memodifikasi secara kimia asam lemak tak jenuh dalam UCO, dimungkinkan untuk menghasilkan biopelumas yang menunjukkan peningkatan stabilitas termooksidatif dan bekerja dengan baik pada suhu rendah.

Dalam penelitian terbaru, penulis menyelidiki produksi biopelumas ramah lingkungan melalui berbagai modifikasi kimia minyak goreng limbah. Salah satu metodenya adalah transesterifikasi *metil ester* minyak goreng bekas dengan heptanol, 2-etil heksanol, dan neopentil glikol menggunakan seng asetat sebagai katalis. Proses ini menghasilkan produksi biopelumas dengan kemampuan biodegradasi dan kinerja tribologi yang diinginkan (Joshi, Bhandari, Patel, et al., 2023). Dalam studi menarik lainnya, Hidrotalsit (HT) yang mengandung kalium karbonat (K_2CO_3) digunakan sebagai katalis heterogen untuk mengubah metil ester asam lemak UCO menjadi *tryster* asam lemak *trimetilolpropana* (TFATE) untuk digunakan sebagai minyak dasar biopelumas (Sun *et al.*, 2017). Dari

penelitian (Negi *et al.*, 2023), hasil percobaan menunjukkan bahwa perbedaan profil asam lemak dalam UCO-BL mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja tribologi dan reologi minyak olahan.

Koefisien gesekan gemuk berbahan dasar UCO-BL lebih rendah 30,6% dibandingkan gemuk berbahan dasar minyak mineral (MAK150). Permukaan yang dilumasi dengan gemuk berbahan dasar MAK150 menunjukkan tingkat keausan yang lebih rendah namun terdapat goresan yang dalam, sedangkan gemuk berbahan dasar UCO-BL menunjukkan goresan yang halus. Selain itu, solvabilitas UCO-BL yang tinggi menghasilkan jaringan gel yang kuat, menghasilkan viskositas yang lebih tinggi dan nilai tangen rugi-rugi yang lebih rendah pada gemuk yang diolah. Studi ini menunjukkan bahwa biopelumas yang berasal dari minyak jelantah dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan minyak ramah lingkungan. Karakteristik minyak goreng limbah dapat dilihat pada Tabel 2.2. sebagai berikut.

Tabel 2.1 Karakteristik dari Minyak Goreng Limbah (Putra, Nata, & Irawan, 2020)

Karakteristik	Satuan	Nilai
Densitas	g/cm ³	0,91 - 0,924
Viskositas kinematik pada 40 °C	mm ² /s	36,4 – 42
Angka penyabunan	mgKOH/g	188,2 – 207
Angka asam	mgKOH/g	1,32 - 3,6
Nilai kalor	(MJ/kg)	44,44
Bilangan setana	-	32,48
Titik tuang	°C	6
Titik keruh	oC	15
Berat molekul rata-rata	g/mol	585,36 ± 8
Komposisi asam lemak: Asam miristat (C14:0)	%b	0,90
Asam palmitat (C16:0)	%b	20,40
Asam palmitoleat (C16:1)	%b	4,60
Asam stearat (C18:0)	%b	4,80
Asam oleat (C18:1)	%b	52,90
Asam linoleat (C18:2)	%b	13,50
Asam linolenat (C18:3)	%b	0,80
Asam arakid (C20:0)	%b	0,12
Asam eikosenoat (C20:1)	%b	0,84

Asam behenic (C22:0)	%b	0,03
Asam erukik (C22:1)	%b	0,07
Asam tetrakosanoat (C24:0)	%b	0,04

Secara khusus, setiap tahunnya diperkirakan bahwa konsumsi minyak goreng sawit nasional di Indonesia mencapai 16,2 juta kilo liter (KL). Dari angka tersebut rata-rata minyak goreng limbah yang dihasilkan berada pada kisaran 40-60% atau berada di kisaran 6,46 - 9,72 juta KL (ESDM, 2023). Konversi UCO menjadi biopelumas atau bioproduk lainnya tidak hanya akan menghilangkan dampak negatif UCO terhadap lingkungan, namun juga mencegah daur ulang UCO secara tidak sah sebagai minyak goreng sawit palsu (Wang *et al.*, 2014). Minyak goreng limbah sekitar 30 sampai 60% lebih murah dibandingkan minyak nabati yang dapat dimakan seiring dengan meningkatnya konsumsi pangan di seluruh dunia. Penggunaan minyak dengan harga yang murah seperti minyak UCO akan sangat banyak mengurangi biaya produk akhir (Putra *et al.*, 2018).

2.6. Persyaratan Mutu Biopelumas

Persyaratan mutu biopelumas sudah dibakukan dalam Standar ISO dengan menyajikan persyaratan Kualitas biopelumas yang diinginkan. Ada beberapa badan internasional yang mengatur dan menstandarisasi produksi pelumas di seluruh dunia. *American Society for Testing and Materials*, dan beberapa badan Eropa lainnya bertanggung jawab atas kualitas pelumas yang diproduksi. Sifat fisikokimia biopelumas harus serupa dengan pelumas berbahan dasar minyak mineral. Sejumlah pengujian ASTM standar utama terdiri dari D97-12, D445, D2270, D2500, dan D4172, yang masing-masing dapat menentukan sifat penting Pelumas termasuk titik tuang, viskositas, indeks viskositas, titik awan, dan karakteristik anti aus. Sifat fisikokimia Pelumas dapat dilihat pada tabel 2.4 sebagai berikut.

Tabel 2. 2 Standarisasi Pelumas Standar

Jenis pelumas	Viskositas Kinematik		Viskositas indeks (VI)	Titik Nyala (°C)	Titik Tuang (°C)	Stabilitas Oksidasi (menit)	Diameter Bekas Luka Keausan (mm)	Nilai Asam (mg KOH/g)	Referensi
	40 (mm ² /s) °C	100 (mm ² /s) °C							
ISO VG 2	> 1,98	-	>90	70	-40	-	-	-	(Crown, 2023)
ISO VG5	> 4.14	-	-	65	-48	-	-	-	(Crown, 2023)
ISO VG 10	> 9	> 2.6	> 90	177	-39	-	-	-	(Lubrication, 2023; Paar, 2023)
ISO VG 15	> 13.5	> 3.3	> 84	174	-33	-	-	-	(Paar, 2023)
ISO VG 22	> 19.8	> 4.19	> 102	200	-30	-	-	-	(Paar, 2023)
ISO VG 32	> 28.8	> 4.1	> 90	204	-6	-	-	-	(ISO, 2023)
ISO VG 46	> 41.1	> 4.1	> 90	220	-6	-	-	-	(Paar, 2023)
ISO VG 68	> 61.4	> 4.1	> 198	226	-6	-	-	-	(ISO, 2023)
ISO VG 100	> 90,0	> 4.1	> 216	246	-6	1670.26	-	-	(ISO, 2023)
ISO VG 150	> 135	> 14.5	> 96	236	-18	-	-	-	(ISO, 2023)
ISO VG 220	> 198	> 19.4	> 96	238	-18	-	-	-	(ISO, 2023)
ISO VG 320	> 288	> 25.5	> 96	245	-10	-	-	-	(ISO, 2023)
Parafin VG95	95	10	102	-	-	-	-	-	(Pariffin, 2024)
Parafin VG460	461	31	97	-	-	-	-	-	(Pariffin, 2024)
Oli Parafin Gear H1	70	9.2	107	120	-15	-	0.54	-	(Pariffin, 2023)

2.7. Sifat Tribologi

Kinerja tribologi minyak berbasis bio dievaluasi menggunakan beberapa uji tribologi. Tes tribologi yang umum adalah tes empat bola dimana pengujian ini mengevaluasi koefisien gesekan (COF), diameter keausan (WSD) atau volume bekas keausan (WSV), dan kemampuan oli untuk melindungi permukaan logam dari keausan (Malik, Kalam, Mujtaba, & Almomani, 2023). Tes empat bola digunakan untuk mengevaluasi bekas luka dan perilaku tekanan ekstrim pelumas. Sifat fisikokimia biopelumas mempengaruhi karakteristik tribologinya.

(Karmakar, Ghosh, & Sharma, 2017) menyatakan bahwa 1/3 energi bahan bakar dimanfaatkan untuk mengatasi gesekan. Penelitian tersebut mengusulkan agar 18% energi gesekan di sektor otomotif dapat dikurangi dalam 5 hingga 10 tahun ke depan, dan 61% energi gesekan dapat dikurangi dalam 15 hingga 25 tahun ke depan dengan kemajuan tribologi. Sekitar 23% konsumsi energi global mengkompensasi keausan dan kerugian akibat gesekan. Dari 23% energi yang hilang, 20% energi tersebut digunakan untuk mengatasi gesekan dan 3% untuk mengganti bagian-bagian mesin yang aus (Karmakar *et al.*, 2017). Kerugian akibat gesekan dan keausan dapat dikurangi hingga 40% melalui penggunaan pelumas canggih, yang setara dengan penghematan 1 hingga 1,55% dari produk domestik bruto (PDB) negara tersebut (Guo, Adukure, & Iglesias, 2019). Penerapan kemajuan tribologi tidak hanya bertanggung jawab atas manfaat ekonomi tetapi juga bertanggung jawab atas manfaat lingkungan (pengurangan CO₂) (Vigneshwaran *et al.*, 2020). Diperkirakan sekitar 75 hingga 82% kehilangan energi secara keseluruhan pada kendaraan, dan 68 hingga 72% kehilangan energi pada mesin. Namun, sekitar 12 hingga 30% energi bahan bakar dikonsumsi sebagai penggerak kendaraan dan 3% energi yang hilang sebagai energi gesekan (Jason, How, Teoh, & Chuah, 2020). Pelumasan ternyata menjadi parameter terpenting untuk Rantai asam lemak tak jenuh/jenuh dan adanya gugus polar pada biopelumas menjadikan hidrodinamik (Malik *et al.*, 2023).

Untuk mengaplikasikan pelumas berbahan dasar minyak sawit, pelumas tersebut harus memiliki sifat tribologis yang mirip dengan minyak mineral. Namun, karena COF dan WSD bergantung pada suhu, beban, dan kecepatan

pengujian, banyak kasus sulit untuk membuat perbandingan antar pengujian. Oleh karena itu, komposisi kimia pelumas dan kondisi pengujian harus dipertimbangkan untuk setiap aplikasi. Namun demikian, pada kondisi tertentu minyak pelumas berbahan dasar sawit memiliki WSD dan COF yang lebih rendah dibandingkan minyak mineral (Malik *et al.*, 2023).

Oleh karena itu, kondisi pengujian dan komposisi kimia minyak pelumas harus diperhitungkan dalam setiap aplikasi. (Bahari, Lewis, & Slatter, 2018) membandingkan sampel pelumas dengan kedelai dan minyak sawit dan menemukan bahwa minyak sawit menunjukkan COF lebih rendah yaitu 0,105 dibandingkan minyak kedelai (0,112). COF yang lebih kecil dapat disebabkan oleh penyelarasan rantai linier asam lemak jenuh dan pembentukan lapisan pelindung pada permukaan minyak sawit. Namun minyak kedelai mengandung asam lemak tak jenuh yang biasanya mengandung ikatan rangkap yang tidak menutupi permukaan melalui lapisan pelindung dan menyebabkan COF lebih tinggi. Jumlah metil ester minyak sawit dalam minyak pelumas lebih dari 5% menyebabkan korosi dan oksidasi. Penelitian tersebut juga menyatakan bahwa karakteristik biopelumas dipengaruhi secara signifikan oleh kelembaban, oksidasi, dan suhu (Y. Cao, Wang, Fu, You, & He, 2020). Erhan dkk. (2006) mempelajari kinerja tribo ester TMP berbasis minyak sawit pada berbagai rezim pelumasan (batas, hidrodinamik, dan hidrodinamik elastis) pada mesin pengujian empat bola. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kinerja tribologi pada WSD dan COF pada pelumas berbahan dasar ester TMP. Dari penelitian (Gul *et al.*, 2021) sekitar 90%–94% biopelumas minyak biji kapas diperoleh sifat fisiokimia pelumasan dan tribologinya dievaluasi dan ditemukan sebanding dengan pelumas mineral ISO VG-46 dan SAE-40

2.7.1. Evaluasi Gesekan dan Keausan

Koefisien gesekan dihitung dengan mengalikan torsi gesekan rata-rata dan konstanta pegas. Torsi gesekan pada bola bawa h dapat dinyatakan pada persamaan 1 sebagai berikut:

$$T = \frac{\mu \times 3W \times r}{\sqrt{6}} \rightarrow \mu = \frac{T \sqrt{6}}{3W \times r} \quad (1)$$

Dimana,

μ = Koefisien gesek

r = Jarak pusat permukaan kontak bola bawah terhadap sumbu putar yaitu 3,67 mm

T = Torsi gesekan dalam kg-mm

W = Beban yang diterapkan dalam kg

2.7.2. *Flash Temperature Parameter (FTP)*

Parameter suhu nyala (*flash temperature parameter*) dikembangkan dalam hal beban, kecepatan putaran, dan waktu pengoperasian menggunakan permukaan respons dan eksperimen desain. FTP menunjukkan potensi kerusakan lapisan pelumas. Nilai FTP yang tinggi menunjukkan tingginya kinerja pelumas. Untuk kondisi yang ada pada tes empat bola, digunakan rumus sebagai berikut (Persamaan 2):

$$FTP = W/D^{1,4} \quad (2)$$

Dimana,

W = beban dalam kg

D = rata-rata diameter bekas luka pakai dalam mm