



KARAKTERISASI DAN INVESTIGASI TRIBOLOGI BIOPELUMAS CAMPURAN MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM INOPHYLLUM*) DAN MINYAK MIMBA (*AZADIRACHTA INDICA*)

Muhammad Anhar Pulungan^a, Adri Rakha Sebayang^{b*}, M. Ihsan Pinem^b

^aProgram Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

*Corresponding authors at: adrirakhasebayang@students.polmed.ac.id (A.Rakha Sebayang) Tel.: +62821-6101-4566

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 29 April 2025

Direvisi pada 21 Juni 2025

Disetujui pada 9 Juli 2025

Tersedia daring pada 18 Agustus 2025

Kata kunci:

Minyak biji nyamplung, minyak mimba, poliesterifikasi, biopelumas, tribologi

Keywords:

Calophyllum oil, Neem oil, Polyesterification, biolubricants, tribology,

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis, mengkarakterisasi, dan menginvestigasi performa tribologi dari pelumas campuran yang terbuat dari minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) dan minyak mimba (*Azadirachta indica*). Minyak dari kedua tanaman ini diekstraksi dan dicampurkan untuk menghasilkan pelumas yang ramah lingkungan, yang kemudian diuji melalui berbagai metode karakterisasi fisik dan kimia. Karakterisasi meliputi pengukuran viskositas, densitas, bilangan asam, titik nyala, dan indeks viskositas. Formulasi biopelumas yang dihasilkan memiliki nilai indeks viskositas sebesar 201,01, yang menunjukkan kestabilan viskositas yang sangat baik terhadap perubahan suhu. Selain itu, uji tribologi dilakukan untuk mengevaluasi koefisien gesekan, keausan, dan daya tahan pelumas dalam kondisi operasi mesin yang bervariasi. Hasil uji tribologi menunjukkan bahwa formulasi biopelumas memiliki diameter keausan sebesar 0,096 mm, yang mengindikasikan performa perlindungan aus yang sangat baik. Hasil penelitian secara keseluruhan menunjukkan bahwa campuran minyak nyamplung dan minyak mimba memiliki potensi yang baik dalam mengurangi gesekan dan keausan, serta memberikan performa yang stabil pada temperatur tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa minyak mimba dan minyak nyamplung dapat menjadi alternatif pelumas yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk industri, meskipun masih memerlukan modifikasi lebih lanjut untuk meningkatkan kinerjanya.

ABSTRACT

The increasing demand for sustainable and eco-friendly lubricants has propelled research into bio-based alternatives. Neem oil (*Azadirachta indica*) and nyamplung oil (*Calophyllum inophyllum*) are advantageous renewable resources owing to their biodegradability and superior lubricating characteristics. This research was carried out to synthesize, characterize, and investigate the tribological performance of a blended lubricant made from neem and nyamplung oils. The oils from these two plants were extracted and blended to produce an environmentally friendly lubricant, which was then tested through various physical and chemical characterization methods. The characterization included measuring the viscosity, density, acid number, flash point, and viscosity index. The resulting biolubricant formulation had a viscosity index of 201.01, indicating excellent viscosity stability against changes in temperature. In addition, tribological tests were conducted to evaluate the coefficient of friction, wear, and durability of the lubricant under various engine operating conditions. The tribological test results showed that the biolubricant formulation had a wear diameter of 0.096 mm, indicating excellent wear protection performance. The overall results of the study indicated that the mixture of neem and nyamplung oils had good potential in reducing friction and wear, and provided stable performance at high temperatures. This study shows that neem and nyamplung oils can be sustainable and environmentally friendly alternative lubricants for industry, although further modification is still needed to improve its performance.

1. PENGANTAR

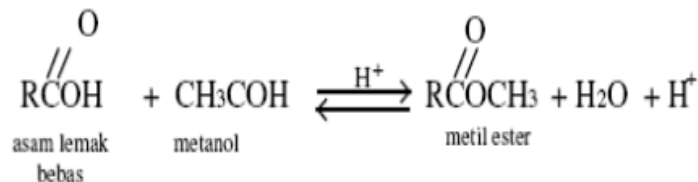
Biopelumas adalah pelumas yang ramah lingkungan, mudah terurai secara hayati (*biodegradable*), dan tidak beracun (*nontoxic*) bagi manusia serta lingkungan. Pelumas ini dikembangkan dari bahan dasar yang dapat diperbarui, seperti lemak hewani, minyak nabati, atau ester sintetis. Minyak nabati, misalnya, memiliki sifat *biodegradable* dan *nontoxic*, menjadikannya alternatif yang menarik dibandingkan pelumas berbasis minyak bumi (Azzahra, 2024). Penggunaan biopelumas bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan yang ditimbulkan oleh pelumas konvensional. Selain itu, biopelumas dapat menyamai karakteristik dan menggantikan fungsi pelumas berbasis petroleum (Fuadi & Rahmadiawan, 2023). Bahan dasar untuk produksi biopelumas beragam, termasuk minyak nabati seperti minyak kelapa, minyak biji jarak, dan minyak jelantah. Minyak-minyak ini dapat dimodifikasi secara kimia untuk menghasilkan senyawa ester yang memiliki sifat pelumasan yang baik (Amril, 2016). Ratusan lebih jenis tanaman dapat digunakan untuk membuat biopelumas, yang terdiri dari minyak nabati dan non-pangan. Indonesia memiliki banyak sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan bahan baku pelumas berbasis bio yang ramah lingkungan. Penggunaan bahan baku nabati non-pangan, seperti minyak goreng limbah (UCO), minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) dan minyak jarak (*Jatropha curcas*), sebagai alternatif untuk pembuatan biopelumas, semakin diminati oleh para peneliti. Minyak *non-edible* dianggap sebagai solusi karena dapat mengatasi kendala yang sering muncul dalam penggunaan minyak nabati, seperti ketersediaan dan biaya yang lebih tinggi karena persaingan dalam industri pangan. Pembuatan biopelumas dapat disintesis melalui dua proses utama, yaitu esterifikasi dan transesterifikasi. Kedua proses ini bertujuan untuk meningkatkan sifat fisik dan kimia minyak nabati atau lemak hewani agar lebih sesuai sebagai pelumas, terutama dalam hal stabilitas termal dan oksidasi. Proses sintesis biopelumas melibatkan reaksi esterifikasi antara asam lemak dari minyak nabati dengan alkohol, menggunakan katalis tertentu untuk mempercepat reaksi yang menghasilkan pelumas dengan viskositas dan stabilitas oksidasi yang sesuai untuk berbagai aplikasi industri (Sudjarwo, Priyantoko, & Karim, 2023).

1.1. Sintesis Biopelumas

Sintesis Biopelumas merupakan proses pembuatan pelumas ramah lingkungan yang berasal dari sumber daya hayati, seperti minyak nabati atau lemak hewani. Proses sintesis biopelumas melibatkan beberapa tahapan utama untuk meningkatkan kualitas dan kestabilannya. Berikut proses dalam sintesis biopelumas (Faqih, 2025).

1.2. Esterifikasi

Esterifikasi adalah reaksi antara asam lemak bebas (*Free Fatty Acid*/FFA) dengan alkohol (biasanya metanol atau etanol) dengan bantuan katalis asam (seperti asam sulfat atau asam p-toluensulfonat) untuk membentuk ester dan air yang ditunjukkan pada Gambar 1 (Aziz, Nurbayti, & Ulum, 2012).

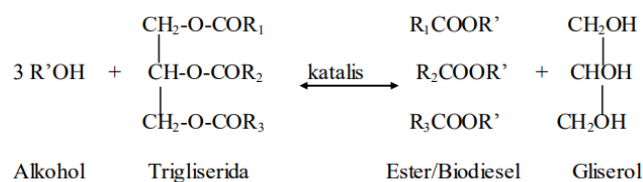


Gambar 1: Esterifikasi

Untuk mengurangi jumlah asam lemak bebas dalam minyak nabati atau lemak hewani sebelum diproses lebih lanjut, proses esterifikasi terdiri dari beberapa langkah penting. Pertama, bahan disiapkan. Ini dilakukan dengan memanaskan minyak dengan kadar FFA tinggi untuk mengurangi viskositasnya dan mempersiapkannya untuk reaksi (Prihanto & Rahayu, 2015). Selanjutnya, katalis asam, seperti asam sulfat (H₂SO₄), ditambahkan untuk mempercepat reaksi esterifikasi. Asam lemak minyak bereaksi dengan alkohol pada tahap reaksi, menghasilkan ester dan air. Setelah reaksi berakhir, tahap terakhir adalah pemurnian produk, di mana campuran yang dihasilkan dicuci dan dimurnikan untuk menghilangkan sisa katalis, air, dan reaktan yang tidak bereaksi. Proses ini menjamin bahwa ester yang dihasilkan memiliki kemurnian tinggi dan siap digunakan dalam tahap produksi berikutnya, seperti proses transesterifikasi untuk membuat biodiesel.

1.3. Transesterifikasi

Transesterifikasi adalah reaksi antara trigliserida dalam minyak nabati atau lemak hewani dengan alkohol rantai pendek (metanol atau etanol) dengan bantuan katalis basa (seperti NaOH atau KOH) untuk membentuk metil ester atau etil ester (biodiesel) dan gliserol sebagai produk sampingan yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Aziz dkk., 2012).

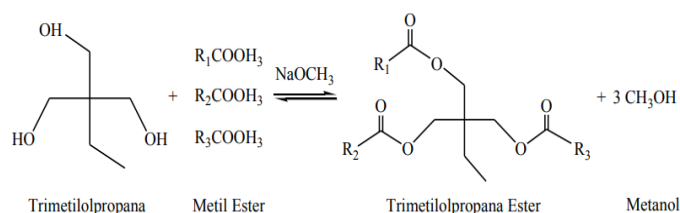


Gambar 2: Transesterifikasi

Transesterifikasi dimulai dengan memanaskan minyak nabati atau lemak hingga temperatur ideal antara 50°C dan 60°C. Setelah itu, alkohol dicampur dengan katalis basa seperti NaOH atau KOH hingga larut sepenuhnya. Selanjutnya, campuran alkohol dan katalis ditambahkan ke dalam minyak, dan pengadukan dilakukan selama beberapa jam untuk memastikan reaksi transesterifikasi berjalan dengan baik. Setelah reaksi selesai, biopelumas dan gliserol dipisahkan menggunakan sentrifugasi atau dekantasi. Pada langkah terakhir, pemurnian biodiesel dilakukan dengan mencuci produk dengan air hangat untuk menghilangkan katalis dan metanol sisa. Esterifikasi dan transesterifikasi merupakan metode utama dalam sintesis biopelumas. Esterifikasi digunakan untuk menurunkan kadar asam lemak bebas dalam minyak mentah sebelum proses transesterifikasi dilakukan. Kombinasi kedua metode ini menghasilkan biopelumas dengan viskositas, stabilitas oksidasi, dan daya tahan yang baik.

1.4. Poliesterifikasi

Poliesterifikasi adalah proses kimia yang meningkatkan sifat fisik dan kimia minyak nabati, seperti viskositas, stabilitas termal, dan ketahanan oksidasi, dengan menggabungkan asam lemak bebas dengan alkohol polifungsional, seperti etilen glikol, untuk membentuk poliester melalui reaksi kondensasi yang melepaskan molekul air. Proses poliesterifikasi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Poliesterifikasi

Reaksi poliesterifikasi yang ditunjukkan dalam Gambar 3 merupakan proses sintesis yang melibatkan trimetilolpropana (TMP) dengan metil ester asam lemak, menghasilkan trimetilolpropana ester sebagai produk utama serta metanol (CH_3OH) sebagai produk samping. Trimetilolpropana, sebagai alkohol polifungsional dengan tiga gugus hidroksil ($-\text{OH}$), bereaksi dengan metil ester asam lemak yang diperoleh dari minyak nabati melalui transesterifikasi. Reaksi ini berlangsung dengan bantuan katalis sodium metoksida (NaOCH_3), yang berperan dalam mempercepat proses esterifikasi/transesterifikasi. Mekanisme reaksi diawali dengan aktivasi gugus hidroksil pada TMP yang kemudian bereaksi dengan metil ester, menggantikan gugus metil ($-\text{CH}_3$) dengan gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$) dari asam lemak, membentuk trimetil propana ester yang memiliki struktur lebih kompleks dan stabil. Produk samping berupa metanol dihasilkan selama reaksi ini berlangsung. Secara fungsional, trimetilolpropana ester memiliki keunggulan dibandingkan metil ester biasa, terutama dalam aplikasinya sebagai biopelumas. Senyawa ini memiliki viskositas lebih tinggi, meningkatkan daya pelumasan dan ketahanan terhadap degradasi termal serta oksidasi, oleh karena itu, reaksi poliesterifikasi ini menjadi langkah penting dalam modifikasi minyak nabati untuk meningkatkan kualitas biopelumas yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Azzahra, 2024).

2. METODE

2.1. Alat dan Bahan

Dalam proses pembuatan biopelumas, berbagai peralatan laboratorium penting digunakan untuk memastikan hasil yang optimal. Alat-alat seperti reaktor kaca berjaket ganda, timbangan analitik, evaporator putar, dan viskometer berperan penting dalam proses reaksi, pengukuran, pemisahan, dan pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 1. Bahan-bahan yang digunakan meliputi minyak nabati sebagai bahan baku utama, katalis untuk mempercepat reaksi, dan pelarut untuk membantu dalam proses pemisahan yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1: Alat Produksi Biopelumas

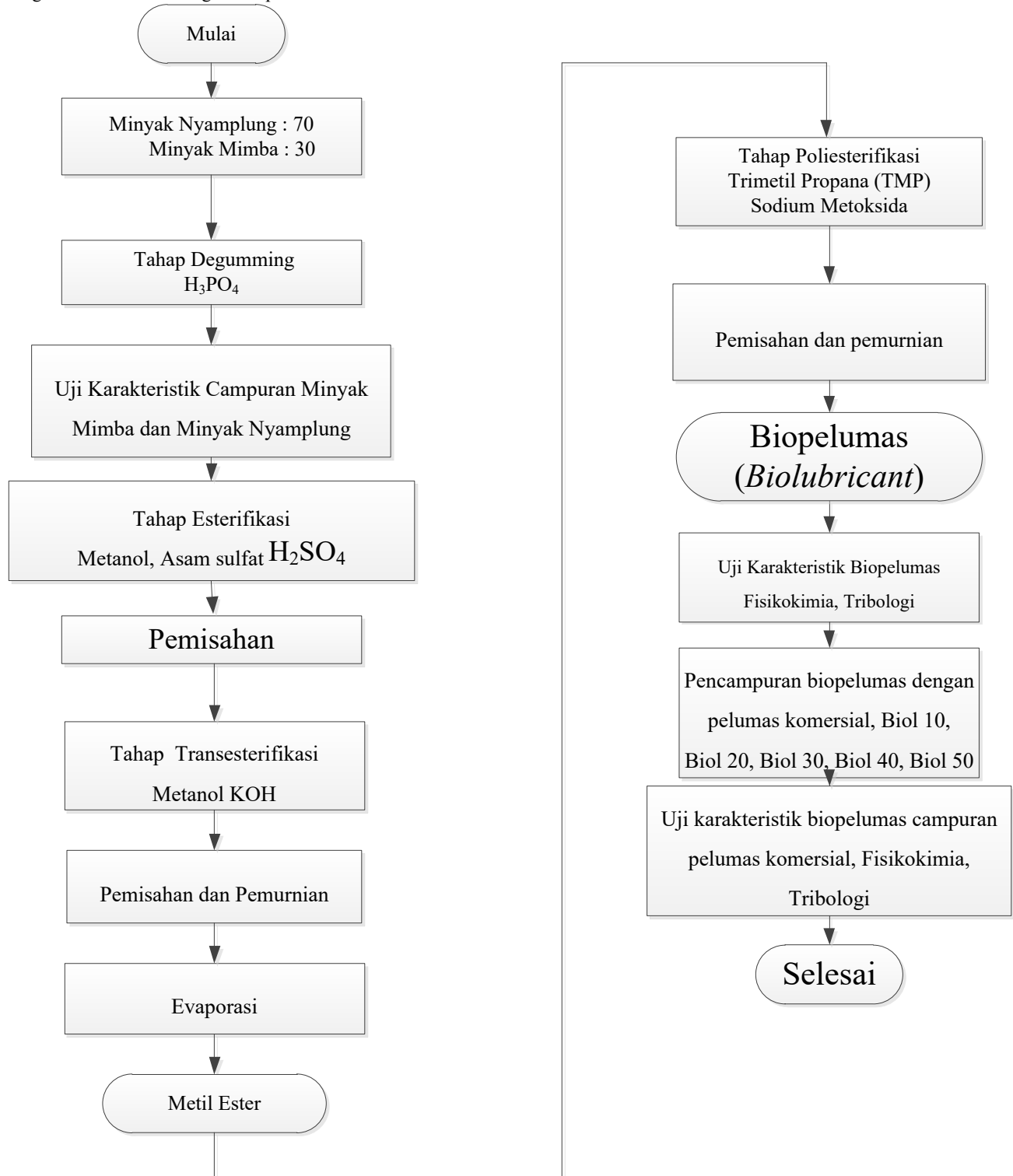
Nama Alat	Fungsi
<i>Double jacketed glass reactor</i>	Pencampuran, reaksi, distilasi, dan filtrasi dalam produksi biopelumas.
Neraca Analitik (<i>Digital Analytical Balance</i>)	Mengukur massa suatu benda dengan akurasi tinggi ($\pm 0,0001$ gram).
Aquastil Water Destilasi	Menyuling air untuk menghasilkan air murni.
<i>Rotary Evaporator</i>	Memisahkan pelarut dari larutan untuk menghasilkan ekstrak yang lebih pekat.
<i>Vacuum Pump</i>	Menguapkan air pada suhu dan tekanan rendah untuk mengurangi kadar air.
Corong Pyrex	Memindahkan/memasukkan cairan ke dalam wadah dengan bukaan kecil.
Gelas Beker (<i>Beaker glass</i>)	Wadah penampung untuk mengaduk, mencampur, dan memanaskan cairan.
Gelas Ukur	Mengukur volume larutan atau cairan dengan tepat.
Corong Pemisah	Memisahkan cairan yang tidak saling bercampur (misalnya, metil ester dan gliserol).
Pompa air	Mensirkulasi air ke kondensor.
<i>Heating mantle with stirrer</i>	Memanaskan cairan dalam labu kaca secara merata dan mengaduknya.
<i>Stabinger Viscometer</i>	Menguji viskositas dan densitas biofuel.
Pensky Martens Flash Point Tester	Menguji titik nyala suatu sampel.
<i>Fourball tester</i>	Mengukur kemampuan pelumas dalam mengurangi gesekan dan keausan.

Tabel 2: Bahan Produksi Biopelumas

Bahan	Justifikasi pemakaian
Minyak mimba	Bahan baku biopelumas
Minyak nyamplung	Bahan baku biopelumas
Asam fosfat (Supelco)	Katalis proses <i>degumming</i>
Asam sulfat (Supelco)	Katalis asam proses esterifikasi
Kalium hidroksida (Supelco)	Katalis basa proses transesterifikasi
Metanol (Supelco)	Pelarut
Trimetil propana (Supelco)	Katalis proses poliesterifikasi
Sodium metoksida (Supelco)	Katalis proses poliesterifikasi
Air suling	Pemurnian

2.2. Pembuatan Biopelumas

Diagram alur pada Gambar 4 menunjukkan proses pembuatan biopelumas dari campuran minyak nyamplung dan minyak mimba melalui serangkaian tahapan kimiawi. Proses dimulai dengan pencampuran minyak, dilanjutkan dengan degumming, esterifikasi, transesterifikasi, dan diakhiri dengan pemurnian metil ester. Biopelumas yang dihasilkan kemudian diuji karakteristiknya dan dicampurkan dengan aditif untuk meningkatkan performa.



Gambar 4: Diagram Alir Produksi Biopelumas dan Pencampuran dengan Pelumas Komersial

2.3. Tahap Degumming

Degumming merupakan tahap awal dalam pemurnian minyak nabati, sebelum digunakan sebagai bahan baku biopelumas. Tujuan utama dari proses ini adalah menghilangkan getah (*gum*), fosfatida, dan zat pengotor (Azmi, 2024). Proses degumming diawali dengan pemanasan minyak hingga temperatur 70°C yang ditunjukkan pada Gambar 6 melalui heating water bath untuk menurunkan viskositas dan mengurangi kandungan air yang berlebihan, sehingga meningkatkan reaktivitas minyak dengan larutan degumming. Selanjutnya, ditambahkan larutan degumming berupa asam fosfat (H_3PO_4) yang ditunjukkan pada Gambar 6 dengan perbandingan 2–5% dari volume minyak untuk menghidrat fosfolipid agar mudah terpisah. Setelah penambahan agen degumming, campuran diaduk selama 15–30 menit pada *double jacketed glass reactor* dengan temperatur konstan agar fosfolipid dan getah dapat menggumpal dan terpisah dari minyak. Pemisahan gum dilakukan melalui proses degumming dengan kecepatan tinggi sekitar 800–1000 rpm yang terdapat pada Gambar 5.

2.4. Tahap Esterifikasi

Proses esterifikasi dalam pembuatan biopelumas dimulai dengan pemanasan awal minyak pada temperatur 70°C untuk menurunkan viskositas dan memudahkan reaksi. Selanjutnya, metanol (CH_3OH) pada Gambar 7 ditambahkan dengan terhadap minyak, diikuti oleh penambahan asam sulfat (H_2SO_4) pada Gambar 8 dengan 2% dari berat minyak sebagai katalis. Campuran ini kemudian diaduk dengan kecepatan 800–900 rpm dan dipertahankan pada temperatur yang sama selama 1 jam 30 menit untuk memungkinkan reaksi antara asam lemak bebas (FFA) dalam minyak dengan metanol, menghasilkan metil ester dan air (H_2O) sebagai produk samping (Christina, Sungadi, Hindarso, & Kurniawan, 2011).



Gambar 5: Proses Degumming



Gambar 6: Asam fosfat

Ketika reaksi esterifikasi selesai, minyak dituangkan ke dalam corong pemisah untuk memisahkan minyak dari metanol dan pengotor lainnya. Setelah proses pemisahan selesai, terdapat dua lapisan berbeda dalam corong pemisah– lapisan atas terdiri dari metanol dan pengotor lainnya sedangkan lapisan bawah terdiri dari metil ester minyak (Annisa, Meidinariasty, & Oktaviani, 2024).



Gambar 7: Metanol



Gambar 8: Asam Sulfat

2.5. Tahap Transesterifikasi

Minyak hasil esterifikasi yang telah mengalami reduksi kandungan asam lemak bebas (FFA) dipanaskan hingga temperatur 70°C untuk menurunkan viskositas dan meningkatkan kelarutan reaktan. Pada saat yang sama, katalis KOH dilarutkan dalam metanol diatas *hot plate* untuk membentuk larutan kalium metoksida (KOCH) dalam reaksi transesterifikasi (Hadrah, Kasman, & Sari, 2018).

Larutan katalis yang telah disiapkan dicampurkan dengan minyak metil ester dalam reaktor dengan rasio metanol terhadap minyak sekitar 6:1 hingga 9:1 (mol/mol) untuk mendorong reaksi ke arah produk. Proses ini berlangsung pada temperatur 70°C selama 1–2 jam, dengan pengadukan intensif (800–1000 rpm) seperti pada Gambar 9 untuk memastikan homogenisasi antara fase minyak dan alkohol. Dalam tahap ini, terjadi reaksi antara metil ester dengan metanol, menghasilkan metil ester baru dan gliserol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) sebagai produk samping. Setelah reaksi selesai, campuran di masukkan kedalam corong pemisah pada Gambar 10 dan dibiarkan dalam keadaan diam selama beberapa jam agar terjadi pemisahan antara metil ester (produk utama) dan gliserol serta residu katalis (produk samping). Gliserol yang lebih berat akan mengendap di bagian bawah dan dapat dipisahkan melalui proses dekantasi atau sentrifugasi (Mulyani & Sujarwanta, 2018).



Gambar 9: Proses Transesterifikasi



Gambar 10: Hasil reaksi Transesterifikasi

2.6. Tahap Poliestерifikasi

Proses poliestерifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 11 merupakan tahap lanjutan dalam pembuatan biopelumas dari metil ester biodiesel. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan viskositas dan stabilitas termal produk dengan mengubah metil ester asam lemak *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) menjadi poliester, yang memiliki rantai molekul lebih panjang serta sifat pelumasan yang lebih baik. Dalam reaksi ini, digunakan trimetil propana (TMP, $C_6H_{14}O_3$) sebagai inti poliestерifikasi dan sodium metoksida (CH_3ONa) sebagai katalis yang menghasilkan biopelumas pada Gambar 12.



Gambar 11: Proses Poliestерifikasi



Gambar 12: Hasil Poliestерifikasi

Metil ester dipanaskan pada temperatur 100-125°C untuk menghilangkan kandungan air. Selanjutnya, trimetil propana (TMP, $C_6H_{14}O_3$) ditimbang dalam rasio molar 1:3 hingga 1:4, lalu dicampurkan ke dalam metil ester dan didiamkan di dalam *heating mantle* dan diaduk oleh stirrer selama 30 menit. Selanjutnya timbang larutan sodium metoksida (CH_3ONa) dan ditambahkan perlahan ke dalam campuran untuk memulai reaksi poliestерifikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dianalisis, dan kualitasnya divalidasi sesuai dengan *American Society for Testing and Materials* (ASTM D6751). Beberapa hasil karakteristik penelitian sebagai berikut:

3.1. Karakteristik Fisikokimia Minyak Nyamplung dan Minyak Mimba

Berdasarkan hasil karakteristik minyak nyamplung, nilai indeks viskositas yang tinggi (160,66) menunjukkan stabilitas viskositas yang baik terhadap perubahan suhu. Viskositas kinematik (55,64 mm^2/s) dan dinamik (51,44 $mPa.s$) pada 40°C memberikan informasi tentang kekentalan dan resistensi aliran pelumas. Densitas minyak nyamplung pada 40°C adalah 0,92 kg/m^3 . Secara keseluruhan, data ini menunjukkan sifat fisikokimia minyak nyamplung sesuai untuk aplikasi pelumasan.

Tabel 3: Karakteristik Fisikokimia Minyak Nyamplung

Sifat-sifat	Nilai CL	Satuan
Indeks Viskositas	160,66	
Viskositas Kinematik 40°C	55,64	mm^2/s
Viskositas Dinamik 40°C	51,44	$mPa.s$
Densitas 40°C	0,92	kg/m^3

Hasil pengujian menunjukkan bahwa minyak mimba pada Tabel 4 memiliki indeks viskositas yang tinggi, yaitu 169,65, menandakan stabilitas kekentalan yang baik terhadap perubahan suhu. Viskositas kinematik pada 40°C adalah 28,69 mm^2/s , sementara viskositas dinamiknya 26,03 $mPa.s$, memberikan informasi tentang kekentalan dan resistensi aliran pada suhu tersebut. Densitas

biopelumas pada 40°C adalah 0,90 kg/m³, yang penting untuk perhitungan volume dan massa. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa minyak mimba memiliki sifat fisikokimia yang menjanjikan untuk aplikasi pelumasan.

Tabel 4: Karakteristik Fisikokimia Minyak Mimba

Karakteristik	Nilai NM	Satuan
Indeks Viskositas	169,65	
Viskositas Kinematik 40°C	28,69	mm ² /s
Viskositas Dinamik 40°C	26,03	mPa.s
Densitas 40°C	0,90	kg/m ³

Campuran minyak mimba dan nyamplung pada Tabel 5 menunjukkan indeks viskositas sebesar 163,82, yang mengindikasikan stabilitas kekentalan yang baik terhadap perubahan suhu. Viskositas kinematik campuran pada 40°C adalah 45,75 mm²/s, sementara viskositas dinamiknya 42,05 mPa.s, memberikan informasi tentang kekentalan dan resistensi aliran pada suhu tersebut. Densitas campuran pada 40°C adalah 0,91 kg/m³. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa campuran minyak mimba dan nyamplung memiliki sifat fisikokimia yang menjanjikan untuk aplikasi pelumasan.

Tabel 5: Karakteristik Fisikokimia Campuran Minyak Nyamplung dan Minyak Mimba

Karakteristik	Nilai Campuran CL-NM	Satuan
Indeks Viskositas	163,82	
Viskositas Kinematik 40°C	45,75	mm ² /s
Viskositas Dinamik 40°C	42,05	mPa.s
Densitas 40°C	0,91	kg/m ³

3.2. Karakteristik Fisikokimia Metil ester dan Biopelumas)

Metil ester (ME) yang dihasilkan dari campuran CL-NM (mungkin campuran minyak *Calophyllum inophyllum* dan *Azadirachta indica*) pada Tabel 6 memiliki indeks viskositas 114,17, menunjukkan stabilitas viskositas yang cukup baik terhadap perubahan suhu. Viskositas kinematik pada 40°C adalah 35,72 mm²/s, sementara viskositas dinamiknya 32,88 mPa.s, memberikan informasi tentang kekentalan dan resistensi aliran pada suhu tersebut. Densitas metil ester pada 40°C adalah 0,92 kg/m³. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa metil ester dari campuran CL-NM memiliki sifat fisikokimia yang sesuai untuk aplikasi pelumasan, meskipun dengan nilai indeks viskositas yang lebih rendah dibandingkan campuran minyak mentahnya.

Tabel 6: Karakteristik Fisikokimia Metil ester

Karakteristik	Metil ester (ME) CL-NM	Satuan
Indeks Viskositas	114,17	
Viskositas Kinematik 40°C	35,72	mm ² /s
Viskositas Dinamik 40°C	32,88	mPa.s
Densitas 40°C	0,92	kg/m ³

Biopelumas CI-NM pada Tabel 7 menunjukkan indeks viskositas 115,3, menandakan stabilitas kekentalan yang cukup baik terhadap perubahan suhu. Viskositas kinematik pada 40°C adalah 35,46 mm²/s, sementara viskositas dinamiknya 32,64 mPa.s, memberikan informasi tentang kekentalan dan resistensi aliran pada suhu tersebut. Densitas biopelumas pada 40°C adalah 0,92 kg/m³, yang penting untuk perhitungan volume dan massa. Selain itu, biopelumas ini memiliki titik nyala yang tinggi, yaitu 289,2 °C, menunjukkan keamanan yang baik terhadap risiko kebakaran (Sari, Hastarini, Widyajatkiko, & Tambunan, 2020). Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa biopelumas CI-NM memiliki sifat fisikokimia yang menjanjikan untuk aplikasi pelumasan dengan keamanan yang baik.

Tabel 7: Karakteristik Fisikokimia Biopelumas

Karakteristik	Biopelumas (Biol) CI-NM	Satuan
Indeks Viskositas	115,3	
Viskositas Kinematik 40°C	35,46	mm ² /s
Viskositas Dinamik 40°C	32,64	mPa.s
Densitas 40°C	0,92	kg/m ³
Titik nyala	289,2	°C

3.3. Karakteristik Fisikokimia Campuran Minyak Mimba dan Minyak Nyamplung dengan Pelumas Komersial

Biopelumas yang dihasilkan (Biol10 hingga Biol50) pada Tabel 8 menunjukkan potensi sebagai alternatif pelumas komersial, dengan keunggulan pada indeks viskositas yang lebih tinggi dibandingkan SAE 15W40. Pada Biol50 memiliki indeks viskositas 201,01, yang menunjukkan stabilitas kekentalan yang lebih baik terhadap perubahan temperatur. Namun, viskositas kinematik dan dinamikanya lebih rendah, seperti Biol50 yang memiliki viskositas kinematik 43,78 mm²/s dan viskositas dinamik 37,07 mPa.s pada 40°C, menunjukkan kekentalan yang lebih rendah. Densitas biopelumas relatif stabil di sekitar 0,84-0,85 kg/m³. Hal ini menunjukkan bahwa biopelumas memiliki karakteristik yang menjanjikan, terutama dalam hal stabilitas viskositas, meskipun perlu diperhatikan perbedaan kekentalannya dibandingkan dengan pelumas komersial. Adapun Siti Maretia Benu dkk., mensintesis biopelumas dari minyak goreng limbah diperoleh melalui metode respon permukaan mendapatkan rendemen dan karakteristik (viskositas indeks dan titik nyala) yaitu sebesar 94,12 %, 205,

dan 215 °C. Hal ini sesuai dengan biopelumas dari bahan nabati memiliki potensi untuk dicampur dengan pelumas komersial dan karakteristik yang di uji mendekati hasil pelumas komersial (Siti Maretia Benu dkk., 2025).

Tabel 8: Karakteristik Fisikokimia Campuran Minyak Mimba dan Minyak Nyamplung dengan Pelumas Komersial

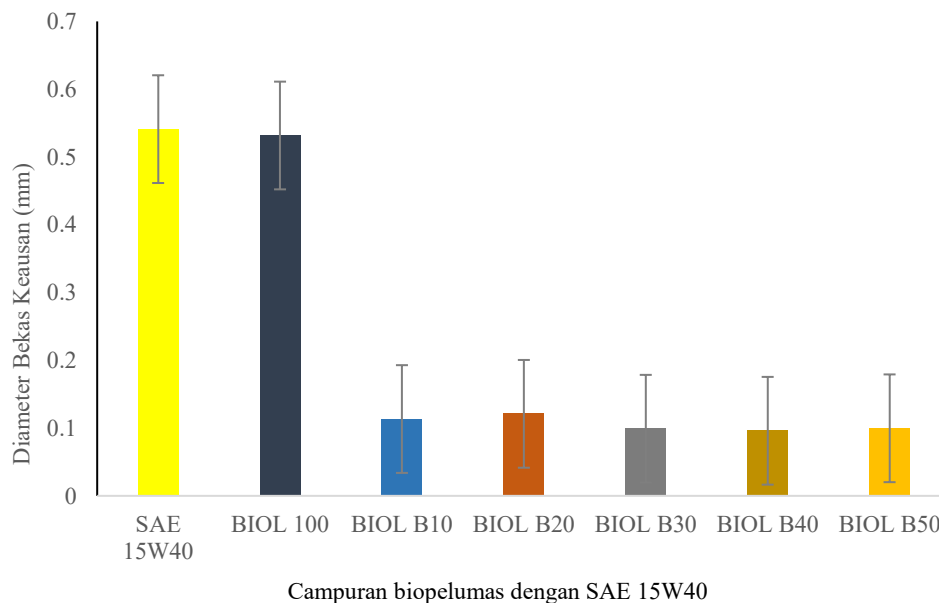
Karakteristik	Satuan	SAE 15W40	Biol10	Biol20	Biol30	Biol40	Biol50
Indeks Viskositas		136,14	174,73	185,65	188,95	184,36	201,01
Viskositas Kinematik 40°C	mm ² /s	99,20	79,48	70,78	68,01	57,32	43,78
Viskositas Dinamik 40°C	mPa.s	853,20	67,77	60,73	58,42	48,38	37,07
Densitas 40°C	kg/m ³	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84

3.4. Karakteristik Tribologis Biopelumas

Hasil pengujian (WSD) pada Tabel 9 dan grafik pada Gambar13 menunjukkan bahwa biopelumas menghasilkan WSD tertinggi, yaitu 0,531 mm, yang mengindikasikan tingkat keausan yang besar pada permukaan yang diuji dibandingkan dengan campurannya. Hal ini diteliti oleh Ruggiero dkk. bahwa biopelumas dari minyak non pangan memiliki konsentrasi asam lemak tak jenuh dan kurang jenuh yang signifikan, yang berpotensi menghasilkan koefisien gesekan yang berkurang (Ruggiero dkk., 2017). Campuran biopelumas dengan berbagai persentase komposisi pelumas komersial (Biol10, Biol20, Biol30, Biol40, dan Biol50) menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan biopelumas dalam campuran, semakin rendah WSD yang dihasilkan. Biol10, yang mengandung 10% komposisi pelumas komersial, memiliki WSD yang sangat rendah, yaitu 0,113 mm, yang menunjukkan perlindungan yang baik terhadap keausan. Selanjutnya, campuran dengan 20% pelumas komersial (Biol20) memiliki WSD 0,121 mm, dan campuran dengan 30% pelumas komersial (Biol30) menghasilkan WSD terendah, yaitu 0,099 mm. Campuran dengan 40% (Biol40) dan 50% (Biol50) pelumas komersial juga menunjukkan WSD yang relatif rendah, masing-masing 0,096 mm dan 0,099 mm.

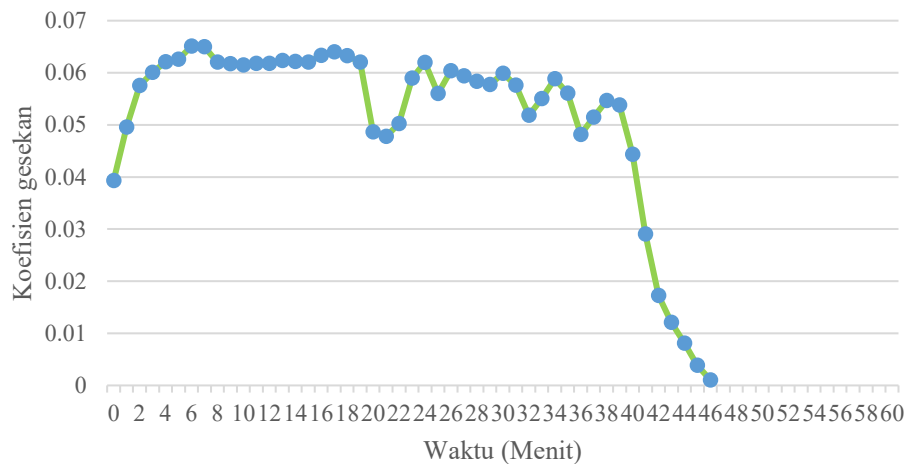
Tabel 9: Karakteristik Tribologis Biopelumas

Pelumas	Bola 1	Bola 2	Bola 3	Rata-rata
SAE 15W40	0,53737	0,53737	0,54839	0,541043
Biol 100	0,467	0,575	0,553	0,531667
Biol B10	0,109	0,118	0,113	0,113333
Biol B20	0,137	0,117	0,109	0,121
Biol B30	0,092	0,110	0,095	0,099
Biol B40	0,087	0,099	0,102	0,096
Biol B50	0,107	0,099	0,093	0,099667



Gambar 13: Grafik Wear Scar Diameter (WSD)

Grafik koefisien gesekan (*coefficient of friction/COF*) ditunjukkan pada Gambar 14, biopelumas menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap waktu, yang dapat dianalisis dalam beberapa fase untuk memahami performa pelumas ini. Pada fase awal menit (0-18), terdapat peningkatan koefisien gesekan yang cukup cepat, mencapai nilai sekitar 0,065. Hal ini mengindikasikan bahwa pada awal pengujian, terjadi penyesuaian antara permukaan gesek dan pelumas, yang mungkin disebabkan oleh lapisan pelumas yang belum sepenuhnya terbentuk atau stabil. Pada fase stabil menit (18-38), koefisien gesekan cenderung stabil di kisaran 0,05 hingga 0,06, menunjukkan bahwa lapisan pelumas telah terbentuk dengan baik dan memberikan perlindungan efektif terhadap gesekan. Meskipun terdapat variasi kecil pada fase ini, hal tersebut tidak mempengaruhi stabilitas pelumas secara keseluruhan. Pada fase penurunan drastis menit (38-48), terjadi penurunan koefisien gesekan yang sangat signifikan, mendekati 0, yang menunjukkan perubahan drastis pada sifat pelumasan. Penurunan ini disebabkan oleh kerusakan lapisan pelumas atau perubahan kondisi yang membuat pelumas menjadi lebih licin (Gasni, Razak, Ridwan, & Arif, 2019). Akhirnya, pada fase akhir menit (48-60), koefisien gesekan sangat rendah, hampir mendekati 0, yang menandakan bahwa pelumas sudah tidak berfungsi dengan baik atau kondisi tes mengalami perubahan yang drastis. Penurunan drastis pada fase akhir bisa disebabkan oleh beberapa faktor, seperti perubahan temperatur yang ekstrem, kerusakan struktur kimia pelumas akibat oksidasi atau degradasi, atau perubahan beban dan kecepatan gesek yang signifikan (Silva dkk., 2024).



Gambar 14: Grafik Koefisien Gesek

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan Pengujian campuran minyak mimba dan minyak nyamplung hingga campuran dengan pelumas komersial Biol10, Biol20, Biol30, Biol40 dan Biol 50 dalam pembuatan biopelumas menunjukkan bahwa campuran ini dapat menghasilkan biopelumas dengan performa yang sangat baik pada berbagai kondisi temperatur. Secara keseluruhan, peningkatan konsentrasi pelumas komersial dalam campuran (Biol10, Biol20, Biol30, Biol40 dan Biol 50) meningkatkan indeks viskositas, yang menunjukkan kemampuan biopelumas untuk mempertahankan viskositas dalam rentang temperatur yang luas, dengan Biol50 memberikan performa terbaik pada 201,01. Ini menunjukkan bahwa biopelumas B50 lebih stabil pada temperatur ekstrem, baik temperatur rendah maupun tinggi, dibandingkan dengan campuran lainnya. Biopelumas (Biol CL- NM) baik dalam bentuk biodiesel maupun dengan penambahan pelumas komersial Biol10, Biol20, Biol30, Biol40 dan Biol 50, menunjukkan potensi luar biasa dalam aplikasi pelumasan. Biopelumas dengan persentase pelumas komersial yang lebih tinggi (Biol50) memberikan performa terbaik secara keseluruhan, dengan stabilitas viskositas yang sangat baik pada temperatur rendah dan tinggi, serta memberikan perlindungan maksimal terhadap komponen mesin. Oleh karena itu, campuran biopelumas ini sangat potensial untuk digunakan dalam industri sebagai alternatif ramah lingkungan. Pengujian *wear scar diameter* biopelumas secara keseluruhan memiliki performa yang lebih baik dalam mengurangi keausan dibandingkan pelumas komersial SAE 15W40. Hal ini tercermin dari nilai rata-rata diameter bekas keausan yang lebih rendah pada semua varian biopelumas (Biol) yang diuji. Konsentrasi biopelumas juga memiliki pengaruh signifikan terhadap performa anti-aus, dengan Biol30 dan Biol40 menunjukkan hasil terbaik dengan nilai rata-rata diameter bekas keausan terendah (0,099 mm dan 0,096 mm). Sementara itu, Biol10 dan Biol20 masih memberikan nilai yang lebih rendah dibandingkan SAE 15W40, meskipun sedikit lebih tinggi daripada Biol30 dan Biol30. Namun, Biol50 menunjukkan peningkatan diameter bekas keausan dibandingkan Biol30 dan Biol30, yang mengindikasikan bahwa konsentrasi yang terlalu tinggi mungkin tidak memberikan manfaat tambahan. SAE 15W40 sebagai pelumas kontrol memiliki nilai diameter bekas keausan tertinggi (0,541 mm), menunjukkan performa anti-aus yang kurang performa dibandingkan biopelumas. Grafik (COF) biopelumas CL-NM 100 memiliki performa pelumasan yang cukup baik pada fase awal dan tengah pengujian, dengan koefisien gesekan yang stabil. Namun, terjadi penurunan drastis pada fase akhir, yang mengindikasikan adanya perubahan kondisi atau kerusakan pada pelumas. Penelitian ini menunjukkan bahwa campuran minyak nyamplung dan mimba memiliki potensi besar sebagai bahan dasar biopelumas. Hasil pengujian *wear scar diameter* mengindikasikan bahwa biopelumas yang dihasilkan secara signifikan lebih efektif dalam mengurangi keausan dibandingkan dengan oli konvensional SAE 15W40, yang menunjukkan kemampuan pelumasan yang sangat baik. Selain itu, grafik koefisien gesekan (COF) mendukung temuan ini, dengan menunjukkan fase stabilitas di mana gesekan tetap dijaga pada tingkat yang relatif rendah, menandakan perlindungan yang efektif terhadap permukaan gesek. Hal ini semakin memperkuat argumen bahwa campuran minyak nyamplung dan mimba dapat menjadi alternatif pelumas yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis dengan penuh rasa syukur menyampaikan penghargaan dan mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Medan atas dukungan serta penyediaan fasilitas untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amril, A. R. (2016). Sintesis Bio-Pelumas dari Minyak Limbah Ikan Patin dengan Pengaruh Kecepatan Pengadukan dan Suhu Reaksi. Riau University.
- Annisa, A., Meidinariasty, A., & Oktaviani, E. D. (2024). Pembuatan Biopelumas Dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Silika Alumina. *J Dalton: Jurnal Pendidikan Kimia dan Ilmu Kimia*, 7(3), 1-6.
- Aziz, I., Nurbayti, S., & Ulum, B. (2012). Pembuatan Produk Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas dengan Cara Esterifikasi dan Transesterifikasi. *Jurnal Kimia Valensi*, 2(3), 443-448.
- Azmi, K. (2024). Produksi Biodiesel Dari Limbah Minyak Goreng Menggunakan Teknologi Gelombang Inframerah. Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara.
- Azzahra, N. S. (2024). Pembuatan Biopelumas dari Minyak Kelapa (*Coconut Oil*). Universitas Islam Indonesia.
- Christina, N., Sungadi, E., Hindarso, H., & Kurniawan, Y. (2011). Pembuatan biodiesel dari minyak nyamplung dengan menggunakan katalis berbasis kalsium. *J Widya Teknik*, 12(2), 26-35.
- Benu, S.M., Eka Putra Dairi Boangmanalu, E.P.D., Pratama, A.B., Pulungan, M.A., (2025). Sintesis Pelumas Biodegradable Dari Limbah Minyak Goreng Melalui Pendekatan Respon Permukaan, Sinergi Polmed; Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 6(1), 19-27.
- Faqih, M. (2025). Analisis Dan Uji Sifat Tribologi Biopelumas Dari Limbah Minyak Goreng. Universitas Islam Sumatera Utara.
- Fuadi, Z., & Rahmadiawan, D. (2023). Tribologi Pelumasan: Pelumas Terbarukan: Syiah Kuala *University Press*.
- Gasni, D., Razak, K., Ridwan, A., & Arif, M. (2019). Pengaruh Penambahan Minyak Kelapa dan Sawit Terhadap Sifat Fisik dan Tribologi Pelumas SAE 40. *Jurnal METTEK*, 5(1), 1-9.
- Hadrah, H., Kasman, M., & Sari, F. M. (2018). Analisis Minyak Jelantah Sebagai Bahan Bakar Biodiesel dengan Proses Transesterifikasi. *Jurnal Daur Lingkungan*, 1(1), 16-21.
- Mulyani, H., & Sujarwanta, A. J. L. P. U. M. (2018). Lemak dan minyak. Lembaga Penelitian Metro.
- Prihanto, A., & Rahayu, L. H. (2015). Pembuatan Biodisel dari Minyak Biji Nyamplung Melalui Esterifikasi, Netralisasi Dan Transesterifikasi. *Jurnal Ilmiah Momentum*, 11(1), 34-40.
- Ruggiero, A., D'Amato, R., Merola, M., Valašek, P., & Müller, M. (2017). *Tribological characterization of vegetal lubricants: Comparative experimental investigation on Jatropha curcas L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil. Tribology International*, 109, 529-540.
- Sari, R. N., Hastarini, E., Widayajtmiko, A. H. W., & Tambunan, A. H. (2020). Karakteristik Biopelumas Berbasis Minyak Patin Siam (*Pangasius Hypophthalmus*) Characteristics Of Biolubricants Based On Catfish Oil (*Pangasius Hypophthalmus*).
- Silva, T. F., Melo Neta, M. M. F. d., Ribeiro Filho, P. R. C. F., Luna, F. M. T. d., & Cavalcante Jr, C. L. (2024). *Tribological Characteristics of Biolubricant Obtained by Transesterification of Grape Seed Oil. J Lubricants*, 12(12), 459, 1-14.
- Sudjarwo, D. L., Priyantoko, I. W., & Karim, M. L. (2023). Penggunaan Minyak Jagung Halus Sebagai Bahan Baku Biodiesel. Universitas Muhammadiyah Malang.