



LAJU KOROSI BAJA KARBON RINGAN PADA BIOPELUMAS DARI LIMBAH MINYAK GORENG

Angga Bahri Pratama^{a*}, Siti Maretia Benu^b, Eka Putra Dairi Boangmanalu^b, Sihar Siahaan^c, Husin Ibrahim^c

^aProgram Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

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

^cProgram Studi Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

*Corresponding authors at: anggabahri@polmed.ac.id (Angga Bahri Pratama)

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 30 September 2024

Direvisi pada 24 Februari 2025

Disetujui pada 25 Februari 2025

Tersedia daring pada 01 Maret 2025

Kata kunci:

Biopelumas, limbah minyak goreng, baja karbon ringan, laju korosi, SEM

Keywords:

Biolubricants, Waste cooking oil, mild carbon steel, corrosion rate, SEM

ABSTRAK

Limbah minyak goreng digunakan untuk sintesis biopelumas melalui reaksi poliesterifikasi. Biopelumas dibuat dari limbah minyak goreng dengan etilen glikol (EG). Reaksi dilakukan dengan menggunakan katalis Natrium Methoxide. Biopelumas adalah pelumas *biodegradable* potensial yang dapat digunakan dalam aplikasi pelumas industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati perilaku korosi baja karbon ringan yang terendam dalam campuran biopelumas-pelumas komersil dengan konsentrasi tertentu (BIOL10, BIOL20, BIOL30, BIOL40) selama 768 jam pada temperatur ruangan. Pengamatan permukaan baja karbon ringan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) dilakukan dan perhitungan laju korosi. Setelah perendaman di uji bilangan asam dan dianalisis pengaruh korosi baja karbon ringan pada biopelumas. Dengan demikian, penelitian ini memberikan wawasan yang penting mengenai dampak biopelumas terhadap korosi baja karbon ringan dan dapat menjadi kontribusi signifikan dalam pengembangan strategi mitigasi korosi yang efektif. Hasil penelitian yang didapatkan adalah biopelumas dari limbah minyak goreng sesuai dengan standar ISO VG 100. Penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi biopelumas dalam campuran (BIOL20, BIOL30, dan BIOL40), semakin rendah laju korosi yang diamati seiring dengan peningkatan waktu perendaman. Namun, campuran BIOL10 menunjukkan laju korosi yang hampir sama dengan pelumas komersil, bahkan lebih baik pada perendaman yang lebih lama. Nilai asam yang diamati menunjukkan peningkatan pada hampir seluruh pelumas yang menunjukkan kupon logam (baja ringan) telah mengalami proses oksidasi, yang pada akhirnya meningkatkan konsentrasi asam dalam campuran biopelumas.

ABSTRACT

The polymerization procedure is utilized to create biolubricants from used cooking oil. Ethylene glycol (EG) and leftover cooking oil are combined to create biolubricants. A catalyst made of sodium methoxide is used to carry out the reaction. Potentially biodegradable lubricants for use in industrial lubricant applications are known as biolubricants. This study aims to observe the corrosion behavior of light carbon steel immersed in a mixture of commercial biolubricants with a certain concentration (BIOL10, BIOL20, BIOL30, BIOL40) for 768 hours at room temperature. Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the surface of light carbon steel and calculate the rate of corrosion. Following soaking, the acid number test and the impact of light carbon steel corrosion on the biolubricant were examined. As a result, this study offers crucial information about how biolubricants affect mild carbon steel corrosion and can greatly aid in the creation of corrosion prevention techniques. According to ISO VG 100 criteria, the research's output is biolubricants made from leftover cooking oil. Research indicates that the corrosion rate decreases with increasing immersion duration in mixtures containing larger concentrations of biolubricant (BIOL20, BIOL30, and BIOL40). But at extended immersion times, the BIOL10 blend has an even superior corrosion rate

than commercial lubricants. The metal coupons (mild steels) had undergone an oxidation process, which finally raised the acid concentration in the biolubricant mixture, according to the reported acid values, which increased in practically all lubricants.

1. PENGANTAR

Sumber energi fosil khususnya bahan bakar dan pelumas otomotif yang berbahan dasar minyak bumi merupakan sumber energi yang mendasar. Meningkatnya ketergantungan umat manusia pada bahan bakar/pelumas fosil telah meningkatkan tingkat kelelahan dan ancaman lingkungan lainnya. Oleh karena itu, bahan bakar pelumas pengganti harus ditemukan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil guna melindungi lingkungan. Industri otomotif awalnya menunjukkan minat terhadap penggunaan pelumas untuk otomotif, dan peraturan telah ditetapkan untuk menggunakan beberapa persentase biopelumas di banyak negara maju; inisiatif seperti itu juga diperlukan untuk pelumas (Cavalcanti dkk, 2018). Biopelumas merupakan pelumas alternatif yang dapat dibuat dari sumber daya terbarukan seperti minyak nabati dan lemak hewani merupakan pengganti yang sangat baik untuk pelumas konvensional berbahan dasar minyak bumi (Cao dkk, 2024; Salih & Salimon, 2021). Dalam komersialisasi biodiesel dan biopelumas, masalah utama adalah harga bahan baku, terutama minyak nabati pangan (Gupta & Rathod, 2018). Oleh karena itu, pembuatan biopelumas dari minyak goreng limbah adalah pilihan yang hemat biaya dan dapat mengatasi masalah pembuangan *Used Cooking Oil (UCO)*. 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 dkk, 2014).

Namun, masalah utama penggunaan logam dalam industri adalah pelarutan logam dalam lingkungan agresif seperti larutan asam, garam, dan lingkungan laut. Proses korosi yang terjadi pada biopelumas disebabkan karena masih terdapat ion-ion sulfur yang terdapat dalam biopelumas (Arumugam, Ellappan, & Sriram, 2018).

Korosi merupakan degradasi material logam yang terjadi secara alamiah tanpa dapat dicegah karena adanya lingkungan yang korosif (Cecilia dkk, 2020). Terjadinya kehilangan sumber daya alam dan ekonomi yang sangat besar akibat korosi menyebabkan kajian pengendalian korosi menjadi perhatian utama dan serius dari para peneliti dewasa ini di dalam maupun di luar negeri. Salah satu material yang banyak digunakan di dalam berbagai industri terutama dalam industri migas, industri kimia, otomotif, industri makanan, dan industri petrokimia adalah baja karbon. Pemakaian baja karbon yang demikian luas disebabkan karena sifat-sifatnya yang sesuai digunakan dalam berbagai bidang, dan juga secara ekonomis lebih murah (Slepski, Gerengi, Jazdzewska, Orlikowski, & Darowicki, 2014).

Penggunaan biopelumas menimbulkan kekhawatiran terkait dengan peningkatan keasaman, oksidasi, peningkatan kehilangan kehausan, yang semuanya menyebabkan korosi (Gulzar dkk, 2016). Penggunaan biopelumas dalam industri otomotif mempunyai implikasi karena mengubah komposisi bahan bakar yang mengakibatkan degradasi dan korosi pada beberapa elemen mesin. Hal ini terjadi karena biopelumas biasanya mengandung beberapa unsur, seperti air, aldehida, keton, peroksida, asam organik dan ester (Thangavelu & Ezhumalai, 2017). Beberapa komponen mesin, seperti piston, blok mesin, kepala silinder, pompa bahan bakar, injektor, bantalan, nozel, badan katup, dan cincin pompa, dapat menimbulkan korosi jika bersentuhan langsung dengan pelumas.

Seluruh bagian mesin terbuat dari bahan, seperti baja ringan, aluminium, tembaga atau paduan, baja tahan karat dan bahan lainnya (Arumugam, Ellappan, Sangavi, Sriram, & Ramakrishna, 2018; Cecilia dkk., 2020). Beberapa penelitian sebelumnya telah mengamati efek korosi biodiesel pada logam. (Fasogbon & Olagoke, 2016), misalnya menyelidiki pengaruh temperatur terhadap karakteristik korosi pada beberapa logam, seperti paduan tembaga-magnesium, baja ringan, aluminium, dan baja tahan karat, yang direndam dalam minyak jelantah metil ester yang dicampur dengan bahan bakar pelumas komersil 965 jam pada temperatur kamar dan perendaman selama 8 jam pada temperatur yang berbeda yaitu 40°C, 60°C, 80°C, dan 100°C. Dapat disimpulkan bahwa paduan tembaga-magnesium lebih rentan terhadap korosi dibandingkan dengan baja ringan, aluminium, dan baja tahan karat. Selain itu temperatur dan konsentrasi biopelumas mempengaruhi laju korosi, dimana temperatur dan konsentrasi biopelumas yang tinggi mempercepat laju korosi. (Akhbabue, Aisien, & Ojo, 2014) mengamati laju korosi baja karbon ringan (MCS) dan aluminium (Al) pada perendaman statis, biodiesel dicampur dengan bahan bakar solar dalam beberapa variasi campuran; B0, B50 dan B100, selama 18 minggu pada temperatur kamar. Hasil penelitian menunjukkan korosi MCS dan Al pada bahan bakar meningkat seiring dengan waktu perendaman, dan konsentrasi biodiesel yang tinggi pada bahan bakar diketahui mempercepat laju korosi terkait dengan adanya asam lemak dari biodiesel. Banyak penelitian telah dilakukan mengenai degradasi oksidatif dan sifat korosif biopelumas. (Arumugam, Ellappan, & Sriram, 2021) telah mengamati sifat korosif pelumas sintetik dengan adanya biodiesel menggunakan rig uji bangku korosi temperatur tinggi. Melalui penelitian mereka, mereka dengan tegas melaporkan bahwa sifat korosif pelumas sangat dipengaruhi oleh keberadaan biodiesel sebagai akibat dari efek pengenceran bahan bakar. Karena minyak dasar untuk formulasi biodiesel/biopelumas identik, maka penggunaan biopelumas berbahan dasar minyak nabati untuk mesin berbahan bakar biodiesel juga diharapkan akan semakin mendorong terjadinya korosi pada komponen mesin.

Namun hanya sedikit yang fokus pada penggunaan biopelumas yang diperoleh dari minyak non-pangan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempelajari perilaku korosi biopelumas sebelum menggunakan pelumas baru pada mesin. Meskipun banyak upaya yang telah dilakukan sebelumnya oleh para peneliti dalam formulasi biopelumas/biodiesel, penggunaannya dalam mesin diesel, dan perilaku korosi biodiesel. Namun sejauh pengetahuan penulis, literatur yang membahas perilaku korosi biopelumas saat terpapar berbagai bahan baja karbon masih langka. Kompatibilitas bahan pelumas merupakan aspek penting untuk dipertimbangkan selama pengembangan biopelumas yang baru. Uji korosi memberikan gambaran awal tentang kompatibilitas antara bahan dan pelumas. Dalam penelitian ini, pendekatan sistematis untuk menganalisis sifat korosif biopelumas dari limbah minyak goreng sesuai dengan ASTM D6594 untuk mengeksplorasi kemungkinan substitusi pelumas sintetik dengan biopelumas. Penelitian ini merupakan kajian mendalam terhadap perilaku korosi baja ringan dalam biopelumas dan dicampur dengan pelumas komersil. Tes perendaman dilakukan pada temperatur ruangan

selama 768 jam. Laju korosi diamati setiap 336 jam dengan mengambil spesimen baja ringan, dan permukaannya diperiksa menggunakan *scanning electron mikroskop* (SEM). Selain itu, perubahan sifat biopelumas juga dievaluasi dengan melakukan uji bilangan asam. Sampel yang ditunjuk masing-masing adalah Biol10, Biol20, Biol30, Biol40, dan Biol50. Hasilnya akan membantu dalam pengamatan perilaku korosi pada mesin untuk berbagai macam kandungan biopelumas.

1.1. Bahan Baku Pembuatan Biopelumas

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. 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 dkk., 2014). 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, dkk., 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 dkk., 2017). Dari penelitian (Negi dkk., 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). Studi ini menunjukkan bahwa biopelumas yang berasal dari minyak jelantah dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan minyak ramah lingkungan.

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 dkk., 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 dkk., 2018).

1.2. Korosi

Korosi adalah kerusakan atau degradasi logam akibat reaksi dengan lingkungan yang korosif. Korosi dapat juga diartikan sebagai serangan yang merusak logam karena logam bereaksi secara kimia atau elektrokimia dengan lingkungan. Korosi atau secara awam lebih dikenal dengan istilah pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan-bahan logam diberbagai macam kondisi lingkungan. Penyelidikan tentang sistem elektrokimia telah banyak membantu menjelaskan mengenai korosi ini, yaitu reaksi kimia antara logam dengan zat-zat yang ada di sekitarnya atau dengan partikel-partikel lain yang ada di dalam matrik logam itu sendiri. Jadi dilihat dari sudut pandang kimia, korosi pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang berkontak langsung dengan lingkungan berair dan oksigen. Bila ditinjau dari interaksi yang terjadi, korosi adalah proses transfer elektron dari logam ke lingkungannya. Logam bertindak sebagai sel yang memberikan elektron (anoda) dan lingkungan bertindak sebagai penerima elektron (katoda). Sedangkan penurunan mutu yang diakibatkan interaksi secara fisik bukan disebut korosi, namun biasa dikenal sebagai erosi dan keausan. Dengan reaksi ini sebagian logam akan hilang, menjadi suatu senyawa yang lebih stabil. Di alam, logam pada umumnya berupa senyawa, karena itu peristiwa korosi juga dapat dianggap sebagai peristiwa kembalinya logam menuju bentuknya sebagaimana ia terdapat di alam. Dan ini merupakan kebalikan dari proses *extractive metallurgy*, yang memurnikan logam dari senyawanya (Chandran, Ng, Lau, Gan, & Choo, 2016). Korosi adalah serangan yang terjadi pada bahan logam sebagai akibat dari lingkungan yang aktif, oleh karena itu hal yang menyebabkan kebocoran tangki penyimpanan pada tekanan atmosfer menyebabkan kerugian material, pencemaran lingkungan, kegagalan peralatan dan mempengaruhi usia peralatan, maka menyebabkan kerugian pengukuran terjadinya korosi merupakan bagian penting agar manajemen aset di pabrik untuk dapat beroperasi (Nugroho, Haryadi, Ismail, & Kim, 2016). Salah satu penyebab terjadinya korosi adalah akibat perbedaan mikrostruktur. Area dengan perbedaan mikrostruktur akan menghasilkan daerah katoda-anoda dalam logam tersebut, dan jika dipaparkan dalam media elektrolit akan potensial untuk terjadi korosi. Dengan semakin banyak jumlah butir pada pipa lurus maka jumlah area katoda-anoda pada pipa tersebut juga akan semakin luas, sehingga laju korosinya juga akan lebih besar dibandingkan dengan pipa sambungan (Pambudi).

1.3. Laju korosi baja karbon

Setelah ketebalan setiap spesimen diukur maka dilakukan perhitungan laju korosi dengan metode kehilangan berat. Pada analisa perhitungan laju korosi ini setiap spesimen yang telah dihitung ketebalannya dihitung laju korosinya dan dihitung perbandingannya. Sementara pada pembahasan diperoleh hasil dari analisa data. Hasil percobaan berupa hasil perhitungan laju korosi setiap specimen campuran. Kemudian ketika laju korosi setiap spesimen. Laju korosi baja karbon dihitung dengan menggunakan persamaan dalam menentukan secara kuantitatif menggunakan metode gravimetri, terlebih dahulu ditentukan laju korosi baja karbon dengan menggunakan persamaan berikut (Zahra, Aliyah, & Nurhadi, 2019)

Laju korosi benda uji logam diselidiki berdasarkan data hasil pengukuran yang dinyatakan dengan persamaan 1. Selisih berat yang diperoleh dari pengukuran kemudian diubah menjadi laju korosi (CR), dimana laju korosi (mm/y) merupakan singkatan dari mm per tahun, D adalah massa jenis logam (g/cm³), W adalah susut berat (g), T adalah waktu perendaman (jam) dan A adalah luas penampang permukaan

logam benda uji (cm²). Prosedur dan persamaan yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan metode ASTM G31-72 untuk Pengujian Korosi Perendaman Laboratorium Logam (G31-722004) (Zahra dkk., 2019) :

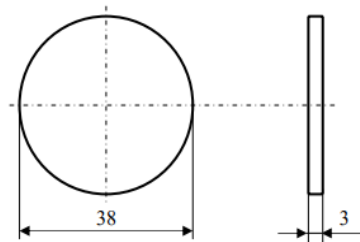
$$CR = \frac{(8,76 \times 10^4 \times W)}{D \times A \times T} \text{ (mm/tahun)} \quad (1)$$

2. METODE

2.1. Tahapan-tahapan penelitian

Dalam penelitian ini, tahapan tahapan yang digunakan melibatkan beberapa tahapan penting untuk analisis laju korosi baja karbon ringan pada Biopelumas dari limbah minyak. Berikut adalah tahapan tahapan penelitian yang akan diimplementasikan:

1. Persiapan Bahan Baku:
 - a. Pengumpulan minyak goreng limbah sebagai bahan baku utama
 - b. Persiapan metanol, katalis KOH, dan etilen glikol untuk reaksi transesterifikasi dan poliesterifikasi
2. Produksi Biopelumas dari minyak goreng limbah
 - a. Proses produksi biopelumas menggunakan proses transesterifikasi menggunakan katalis basa yaitu 1% (b/b) KOH (kalsium hidroksida) dan metanol 25% (v/v). Proses ini dilakukan menggunakan alat *double jacketed glass reactor* dengan temperatur *reactor* 60 derajat celcius, kecepatan putarannya 400 rpm, dan proses dilakukan selama 90 menit.
 - b. Setelah proses transesterifikasi dilakukan selanjutnya dilakukan proses poliesterifikasi menggunakan katalis natrium metoksida dengan temperatur *reactor* 120 derajat celcius, kecepatan putarannya adalah 400 rpm, dan proses dilakukan selama 180 menit.
3. Uji karakteristik biopelumas
Pengujian karakteristik biopelumas yang dilakukan adalah viskositas kinematik, viskositas indeks, titik nyala, bilangan asam.
4. Tahapan Uji Korosi
Membuat campuran Biopelumas dengan pelumas komersil yaitu Biol10, Biol20, Biol30, Biol40.
5. Penyiapan Spesimen
 - a. Proses pembuatan spesimen tahapan proses pembuatan spesimen pemotongan bahan memotong bahan yang berupa baja karbon dengan ukuran tebal 3 mm dan diameter 38 mm dengan menggunakan mesin gergaji ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1: Spesimen

- a. Pengeboran spesimen dilakukan dengan menggunakan mesin bor, lubang ini bertujuan untuk memudahkan dalam perangkaian spesimen dalam proses pencelupan.
- b. Pemolesan spesimen dilakukan dengan menggunakan mesin *polishing*, pemolesan ini bertujuan agar dihasilkan permukaan yang rata.
- c. kemudian dibersihkan dengan aseton.
6. Perendaman Spesimen Dalam Media Biol
 - a. Logam dalam kondisi baru di masukkan ke dalam wadah gelas *beaker* yang berisi BIOL. Kemudian pada 336 jam dan 768 dilakukan pengamatan dan penimbangan spesimen logam. Pengulangan dilakukan 5 kali setiap variabel percobaan.
 - b. Semua cacat permukaan dihilangkan dari kedua sisi setiap kupon uji dengan kertas abrasif 240 grit, kemudian dibersihkan dengan deterjen dan air deionisasi dan dihilangkan lemaknya dengan aseton. Sebelum merendamnya ke dalam pelumas uji, berat setiap kupon uji diukur menggunakan timbangan elektronik yang presisi
7. Penentuan Laju Korosi
Setelah ketebalan setiap spesimen diukur maka dilakukan perhitungan laju korosi dengan metode kehilangan berat. Pada analisa perhitungan laju korosi ini setiap spesimen yang telah dihitung ketebalannya dihitung laju korosinya dan dihitung perbandingannya.
8. Pengujian *Acid Value* setelah perendaman
Pengujian *acid value* dilakukan di pusat energi baru terbarukan Politeknik Negeri Medan menggunakan Alat Titraoline 7750.
9. Uji SEM setelah perendaman
SEM digunakan untuk menganalisis morfologi permukaan baja ringan yang direndam dalam bahan bakar: Biopelumas 100, Biol10, Biol20, Biol30, Biol40 masing-masing selama 336 jam dan 768 jam. Pengamatan ini dilakukan untuk mengevaluasi dampak bahan bakar biopelumas terhadap korosi selama perendaman statis.

2.2. Parameter Pengukuran dan Pengamatan

Dalam penelitian mengenai sifat dan perilaku korosi *mild steel* dalam campuran biopelumas-pelumas komersil (Biol), beberapa parameter pengukuran dan pengamatan dilakukan untuk memahami dampak dari biopelumas terhadap logam tersebut. Salah satunya adalah pengukuran laju korosi, yang dilakukan dengan mengukur berat yang hilang selama proses perendaman untuk menghitung tingkat korosi.

Selain itu, pengamatan morfologi permukaan logam menggunakan SEM juga dilakukan untuk menentukan komposisi lapisan permukaan dan memahami perubahan yang terjadi akibat korosi. Pengukuran nilai asam juga dilakukan dengan titrasi otomatis untuk mengamati perubahan dalam sifat-sifat minyak yang dapat mempengaruhi korosi. Pengukuran berat spesimen dengan ketelitian empat desimal menggunakan timbangan analitik juga penting untuk menghitung perbedaan berat sebelum dan setelah pengujian, sementara pengamatan serangan korosi dengan SEM memberikan gambaran visual yang jelas tentang serangan korosi yang terjadi pada permukaan logam. Semua parameter ini merupakan bagian integral dari penelitian untuk memahami dan mengatasi korosi baja karbon ringan dalam lingkungan yang mengandung biopelumas.

Laju korosi benda uji logam diselidiki berdasarkan data hasil pengukuran yang dinyatakan dengan persamaan 2. Selisih berat yang diperoleh dari pengukuran kemudian diubah menjadi laju korosi (CR), dimana laju korosi (mpy) merupakan singkatan dari mm per tahun, D adalah massa jenis logam (g/cm³), W adalah susut berat (g), T adalah waktu perendaman (jam) dan A adalah luas penampang permukaan logam benda uji (cm²). Prosedur dan persamaan yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan metode ASTM G31-72 untuk Pengujian Korosi Perendaman Laboratorium Logam (G31-722004). (Zahra dkk., 2019) :

$$CR = \frac{(8,76 \times 10^4 \times W)}{D \times A \times T} \text{ (mm/tahun)} \tag{2}$$

Tabel 1: Pengujian laju korosi

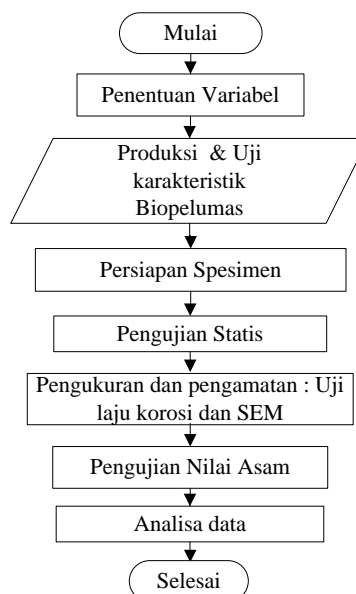
Nama Sampel	Laju Korosi (mm/tahun)	
	336 jam	768 jam
Pelumas komersil		
Biopelumas100		
Biol10		
Biol20		
Biol30		
Biol 40		

2.3. Rancangan Penelitian

Dalam penelitian mengenai sifat dan perilaku korosi *mild steel* (baja karbon ringan) dalam campuran biopelumas-pelumas komersil, rancangan penelitian yang digunakan sebagai berikut:

1. Penentuan Variabel: Menentukan variabel yang akan diamati, seperti laju korosi, perubahan morfologi permukaan logam, nilai asam minyak, dan berat spesimen.
2. Persiapan Spesimen: Menyiapkan spesimen baja karbon ringan yang akan digunakan dalam pengujian, termasuk pembersihan dan persiapan permukaan logam.
3. Pengujian Statis: Melakukan pengujian statis dengan merendam spesimen baja karbon ringan dalam campuran biopelumas-pelumas komersil selama periode waktu tertentu, dalam hal ini 768 jam pada temperatur ruangan.
4. Pengukuran dan Pengamatan: Melakukan pengukuran laju korosi dengan menghitung berat yang hilang selama proses perendaman, serta melakukan pengamatan morfologi permukaan logam menggunakan SEM untuk menentukan perubahan yang terjadi.
5. Pengujian Nilai Asam: Melakukan pengujian nilai asam minyak dengan titrasi otomatis untuk memahami perubahan sifat-sifat minyak yang dapat mempengaruhi korosi.
6. Analisis Data: Menganalisis data yang diperoleh dari pengukuran dan pengamatan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam mengenai perilaku korosi *mild steel* (Baja karbon ringan) dalam campuran biopelumas-pelumas komersil.

Adapun rancangan penelitian dapat dilihat pada gambar 2 sebagai berikut



Gambar 2: Diagram alir penelitian

2.4. Teknik Pengumpulan dan Analisa Data

Dalam penelitian mengenai sifat dan perilaku korosi baja ringan dalam campuran biopelumas-pelumas komersil, teknik pengumpulan dan analisis data yang digunakan dapat mencakup sebagai berikut

1. Pengumpulan data

Pengukuran Berat Spesimen menggunakan timbangan analitik dengan ketelitian empat desimal untuk mengukur berat spesimen sebelum dan setelah proses perendaman. Pengukuran Laju Korosi menghitung berat yang hilang selama proses perendaman untuk mengestimasi laju korosi spesimen. Pengukuran nilai asam melakukan titrasi otomatis untuk mengukur nilai asam minyak dan memahami perubahan sifat-sifat biopelumas selama proses. Pengamatan Morfologi Permukaan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) untuk mengamati perubahan morfologi permukaan logam dan karakteristik serangan korosi.

2. Analisis Data

Perhitungan Laju Korosi Menggunakan data berat yang hilang untuk menghitung laju korosi spesimen *mild steel* dalam campuran biopelumas-pelumas komersil. Analisis Morfologi Permukaan Menganalisis gambar SEM untuk memahami perubahan yang terjadi pada permukaan logam dan karakteristik serangan korosi. Interpretasi Nilai Asam Menganalisis data nilai asam minyak untuk mengevaluasi perubahan sifat-sifat minyak yang dapat mempengaruhi korosi. Dengan menggunakan teknik pengumpulan data yang tepat dan analisis data yang cermat, para peneliti dapat memperoleh informasi yang akurat dan relevan mengenai perilaku korosi *mild steel* dalam campuran biopelumas-pelumas komersil, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi korosi dan potensial strategi mitigasi yang dapat diterapkan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Biopelumas WCO

Biopelumas dianalisis, dan kualitasnya divalidasi sesuai dengan *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Sifat fisikokimia WCO metil ester, Lubricant SAE15W-40, biopelumas WCO dan dibandingkan dengan standar pelumas yang diperoleh dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2. Viskositas kinematik metil ester WCO pada 40 °C (5,717 cSt) dan densitas pada 15 °C (860,83 kg/m³). WCO memiliki karakteristik pelumasan yang menguntungkan. Setelah biodiesel (metil ester) diubah menjadi biopelumas dengan proses poliesterifikasi, viskositas kinematik (40 °C dan 100 °C) yang diperoleh masing-masing adalah 83,46 cSt dan 13,2 cSt.

Viskositas pelumas adalah atribut yang paling kritis, karena penyimpangan apa pun dari spesifikasi yang diperlukan untuk suatu komponen dan aplikasinya dapat merugikan. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan perangkat dan bahkan bahaya yang lebih luas. Viskositas yang stabil dalam berbagai temperatur lebih disukai saat memilih minyak (Bapat, Pradhan, & Madankar, 2024). Salah satu indikator numerik pengaruh temperatur terhadap viskositas oli adalah indeks viskositas oli (VI). Indeks viskositas yang rendah menunjukkan bahwa viskositas bergantung pada temperatur, menghasilkan oli yang lebih encer pada temperatur tinggi dan oli yang jauh lebih kental pada temperatur yang lebih rendah (Ifeanyi-Nze & Akhiehiro, 2023). Namun, VI yang tinggi menunjukkan bahwa viskositas sedikit berubah pada kisaran temperatur yang luas. VI yang lebih tinggi menunjukkan kualitas pelumas yang lebih baik (Ruggiero, D'Amato, Merola, Valašek, & Müller, 2017). Indeks viskositas pelumas bio WCO (WCO-BL) diukur menjadi 216,32 (Tabel 2). Penambahan katalis etilen glikol dan natrium metoksida ke metil ester WCO menghasilkan nilai viskositas kinematik dan indeks viskositas tertinggi, hampir setara dengan pelumas SAE15W 40 dan standar ISO VG 100. Dimana viskositas kinematik SAE 15W40 pada 40 °C (99,2 cSt) dan indeks viskositas (136.14).

Titik nyala adalah tindakan keamanan untuk memastikan pengoperasian oli yang aman (Kalam dkk., 2017). Tabel 2 menunjukkan titik nyala adalah 243,3 °C lebih tinggi dari pelumas komersial 15W40 (230 °C), dan titik insiden biopelumas mendekati standar ISO VG 100. Rata-rata pelumas komersial memiliki titik nyala lebih besar dari 200 °C (Appiah, Tulashie, Akpari, Rene, & Dodoo, 2022; Crown, 2023; Mohamed dkk., 2022; Paar, 2023). Viskositas dan titik nyala bahan bakar dan pelumas berdampak besar pada karakteristik aliran dan atomisasi bahan bakar cair. Viskositas dan titik nyala pelumas bio dapat dipengaruhi oleh kotoran, termasuk gliserol bebas, gliserida, dan temperatur (Kalam dkk., 2017)).

Tabel 2 menunjukkan bahwa pelumas komersial SAE15W40 (1703,2 menit) memiliki stabilitas yang lebih tinggi daripada biopelumas (1642,67 menit). Stabilitas oksidasi biomassa dapat menyebabkan polimerisasi dan peningkatan viskositas (Kania, Yunus, Omar, Rashid, & Jan, 2015). Epoksidasi, pembentukan padatan, dan hidrogenasi semuanya dapat meningkatkan stabilitas oksidatif minyak non-nabati yang dimodifikasi secara kimiawi melalui reaksi esterifikasi dan transesterifikasi (Mohamad Aziz, Yunus, Kania, & Abd Hamid, 2021; Prasannakumar, Edla, Thampi, Arif, & Santhakumari, 2022).

Tabel 2: Propertis Biopelumas dan pelumas komersil

Sifat-sifat biopelumas	Satuan	UCO	metil ester	Bio pelumas (Bio100)	Standar Pelumas				
					SAE15W-40	ISO VG32	ISO VG46	ISO VG68	ISO VG100
Viskositas 40 °C	cSt	47,9	5,717	83,46	99,2	>28,8	>41,1	>61,4	>90
Viskositas 100 °C	cSt	-	-	13,2	13,7	>4,1	>4,1	>4,1	>4,1
Densitas 40 °C	Kg/m ³	901,68	860,83	-	-	-	-	-	-
Indeks viskositas	-	-	-	216,32	136,14	>90	>90	>198	>216
Titik nyala	°C	-	165,3	243,3	230	204	220	226	246
Stabilitas oksidasi 110°C	min	77,6	1043,4	1642,67	1703,2	-	-	-	1670,26
Bilangan asam	mg KOH/g	2,21	0,46	0,447	0,73	-	-	-	-

3.2. Laju Korosi Baja Ringan

Karakterisasi logam korosif sangat penting untuk ketahanan jangka panjang bagian-bagian mesin saat menggunakan biopelumas sebagai oli mesin. Tabel 3. dan gambar 3. membandingkan laju korosi biopelumas WCO yang dicampur dengan pelumas komersil pada temperatur kamar. Pada penelitian ini, berat yang hilang selama proses perendaman digunakan untuk menghitung laju korosi. Laju korosi

baja ringan seluruh campuran bahan bakar (SAE 15W40, BIOL10, BIOL20, BIOL30, BIOL40, dan BIOL100) lebih tinggi pada perendaman 336 jam yaitu 0,0026 mm/tahun, 0,0013 mm/tahun, 0,024 mm/tahun, 0,026 mm/tahun, 0,0272 mm/tahun dan 0,03 mm/tahun.

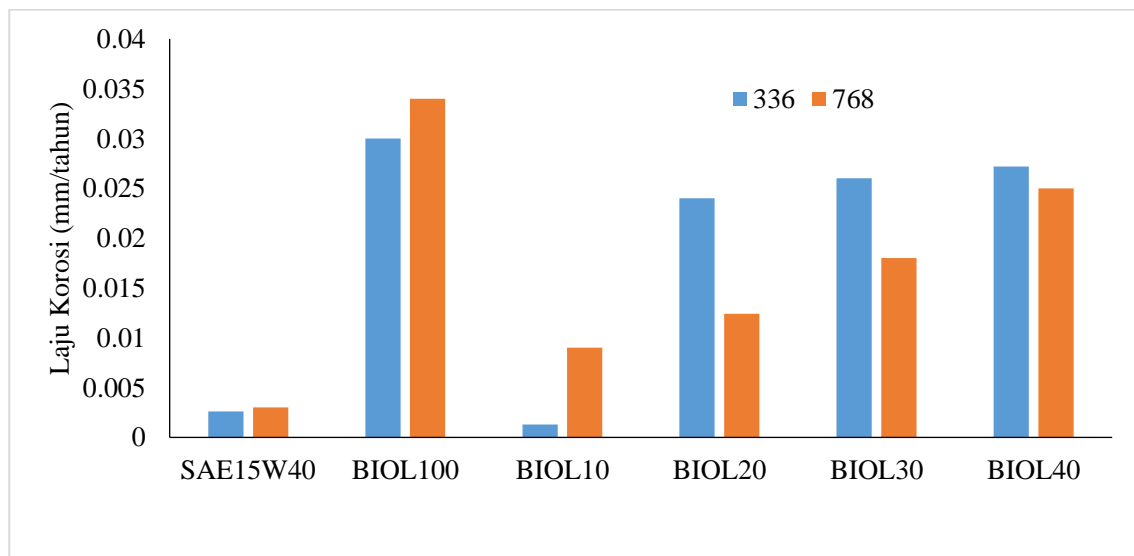
Tabel 3: Laju Korosi Biopelumas-pelumas SAE 15W40

Nama Sampel	Laju Korosi (mm/tahun)	
	336 jam	768 jam
SAE15W40	0,0026	0,003
Biol100	0,03	0,034
Biol10	0,0013	0,009
Biol20	0,024	0,0124
Biol30	0,026	0,018
Biol40	0,0272	0,025

Laju korosi baja ringan direndam dalam Biol40 dan Biol100 15 kali lebih cepat dibandingkan dengan pelumas komersil 15W40, Biol40 dan Biol100 ini memiliki laju korosi paling tinggi dibandingkan pelumas komersil lain, sedangkan Biol10 memiliki laju korosi paling rendah, sekitar 39% lebih rendah dibandingkan pelumas komersil. Secara keseluruhan penambahan biopelumas WCO ke dalam pelumas komersil menyebabkan percepatan laju korosi pada baja ringan. Laju korosi tergantung pada persentase volume biopelumas dalam campuran biopelumas-pelumas komersil. Peningkatan laju korosi berhubungan dengan peningkatan kandungan biopelumas dalam campuran (Sterpu, Simedrea, Chis, & Săpunaru, 2024). Tingginya laju korosi menunjukkan bahwa biopelumas lebih korosif dibandingkan pelumas komersil (Dharma dkk., 2023). Peningkatan laju korosi akibat penambahan biopelumas juga sejalan dengan temuan (Samuel, Ashiedu, & Oreko, 2016) yang melaporkan bahwa penambahan biopelumas minyak sawit yang dihasilkan dari proses transesterifikasi dengan katalis alkali berdampak pada peningkatan laju korosi masing-masing sebesar 0,054, 0,0954 dan 0,139 mpy untuk B0, B50 dan B100. (Dharma dkk., 2023) juga menambahkan bahwa baja karbon ringan dan tembaga merupakan bahan yang mudah teroksidasi dibandingkan dengan aluminium dan baja tahan karat.

Baja ringan yang direndam dalam jangka waktu lama kemungkinan besar memiliki laju korosi yang lebih rendah. Namun perlu diperhatikan, penurunan berat badan tidak linier dengan waktu perendaman karena cenderung mengalami perlambatan dibandingkan dengan waktu pertambahan. Penurunan laju korosi dapat terjadi seperti yang ditunjukkan oleh (Sterpu dkk., 2024) yang menemukan adanya penurunan laju korosi aluminium, dimana laju korosi aluminium pada waktu 1200 jam lebih rendah dibandingkan pada waktu 600 jam. (Koutsouki dkk., 2016) juga mencatat adanya penurunan laju korosi magnesium dan aluminium yang seiring dengan bertambahnya lama perendaman. Pada penelitian ini laju korosi pada waktu 768 jam mengalami penurunan masing-masing menjadi 0,0124 mm/tahun, 0,018 mm/tahun, 0,025 mm/tahun untuk Biol20, Biol30, dan Biol40.

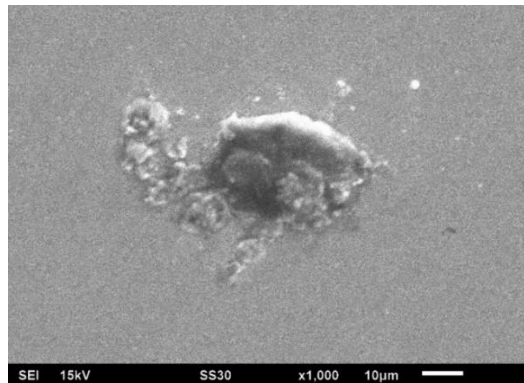
Karakteristik permukaan Perubahan warna baja ringan akibat pemaparan campuran bahan bakar biopelumas-pelumas komersil sebelum dan sesudah perendaman baja ringan direndam dalam bahan bakar solar namun hampir tidak terlihat perubahan warnanya namun kemudian perubahan warna semakin terlihat yaitu sedikit lebih gelap. Hal ini berbeda dengan baja ringan yang direndam dalam campuran biopelumas-pelumas komersil. Terlihat adanya perubahan warna atau degradasi pada semua jenis campuran biopelumas WCO. Pada awal perendaman, warna tampak kecoklatan yang lama kelamaan menjadi gelap seiring bertambahnya waktu perendaman. Setelah perendaman selama 768 jam, lapisan tipis warna hitam terlihat pada permukaan produk, terutama untuk beberapa campuran, seperti Biol40. Perendaman baja ringan dalam jangka waktu lama dalam biodiesel menyebabkan perubahan warna dan pembentukan sedimen. Pembentukan sedimen dan gum dapat menyebabkan masalah kinerja mesin termasuk penyumbatan filter bahan bakar (Rocabruno-Valdés dkk., 2019).



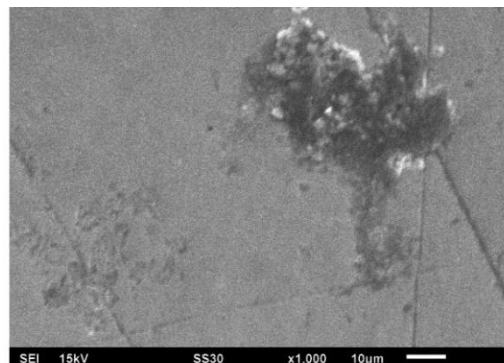
Gambar 3: Laju korosi biopelumas-pelumas SAE15W40

3.3. Analisa SEM Biopelumas-pelumas komersil

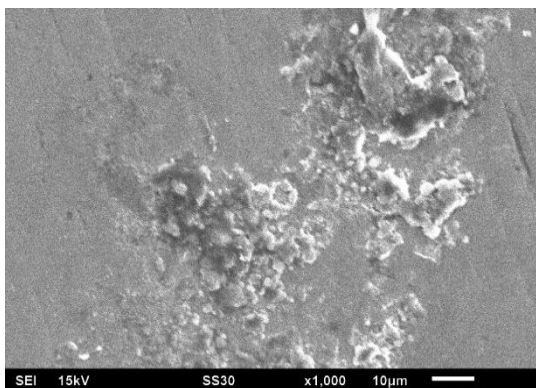
SEM digunakan untuk menganalisis morfologi permukaan baja ringan yang direndam dalam bahan bakar: SAE15W40, Bio110, Bio120, Bio130, Bio140 masing-masing selama 336 jam dan 768 jam seperti ditunjukkan pada gambar 4. Pengamatan ini dilakukan untuk mengevaluasi dampak bahan bakar biopelumas terhadap korosi selama perendaman statis. Terlihat jelas adanya perubahan morfologi permukaan logam akibat korosi. Waktu perendaman menunjukkan degradasi material baja ringan lebih besar akibat perendaman pada bahan bakar yang dicampur dengan biodiesel. Pada perbesaran 1000 \times , luas area pada permukaan logam yang terkena korosi baja ringan menjadi lebih luas dengan bertambahnya durasi waktu. SEM juga menunjukkan tingkat korosi dan degradasi material permukaan. Lubang-lubang berbentuk bulat yang terlihat di permukaan merupakan indikasi serangan korosi (Dharma dkk., 2023). Korosi pitting pada permukaan logam juga dapat disebabkan oleh beberapa jenis asam monokarboksilat, seperti asam format, asam asetat, asam propionat, asam kaproat (Dharma dkk., 2023; Saluja, Kumar, & Sham, 2016). Baja ringan rentan terhadap serangan campuran biopelumas sedangkan kupon kate baja ringan yang direndam dalam solar tidak menunjukkan adanya korosi yang berarti. Lamanya waktu perendaman juga mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap perubahan morfologi permukaan baja. Baja ringan yang direndam pada waktu 768 jam dibandingkan dengan 336 jam menunjukkan adanya lubang-lubang bulat pada seluruh permukaan dengan warna hitam yang lebih merata.



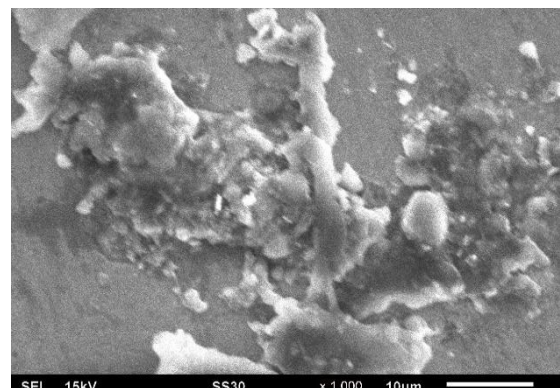
(a)



(b)



(c)



(d)

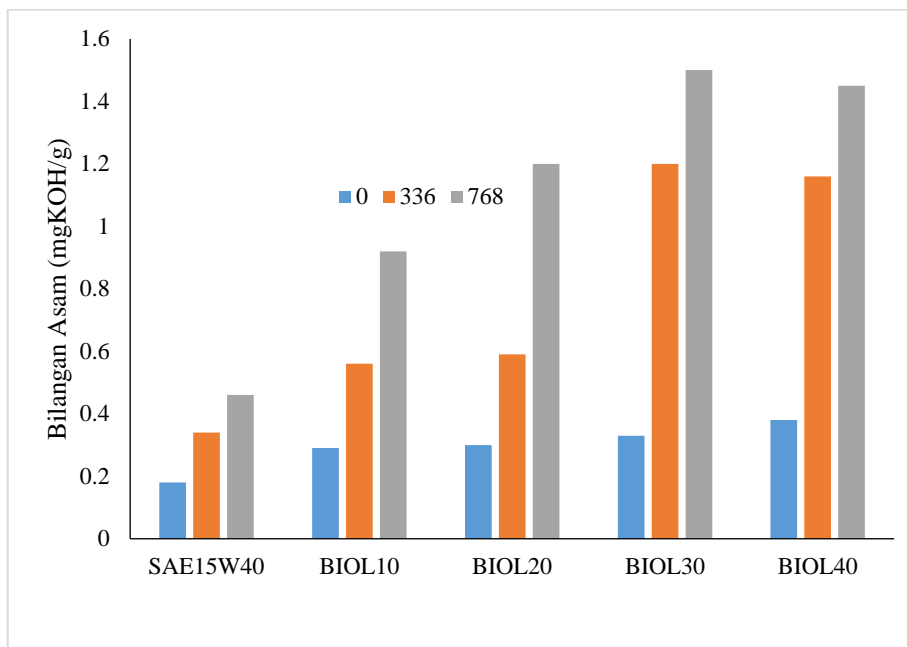
Gambar 4: SEM (1000 \times) menunjukkan morfologi produk korosi pada permukaan baja ringan setelah direndam selama 768 jam pada temperatur sekitar untuk (a) Bio110, (b) Bio120, (c) Bio130, (d) Bio140

3.4. Pengaruh korosi terhadap bilangan asam pada biopelumas WCO dan pelumas komersil 15W40

Bilangan asam adalah nilai konsentrasi kandungan asam dalam larutan tidak berair. Nilai ini diperoleh dengan menghitung jumlah kalium hidroksida (KOH) yang diperlukan untuk menetralkan 1 g sampel dan menunjukkan jumlah gugus asam karboksilat di dalamnya

(Saluja dkk., 2016). Standar batas bilangan asam pada campuran biopelumas adalah 0,5 mg KOH/g untuk standar ASTM D6751 dan EN 14214. Nilai asam yang diukur untuk campuran biopelumas-pelumas komersil WCO selama 0 jam adalah (0,182; 0,29; 0,31; 0,33; 0,39) mg KOH/g masing-masing untuk SAE15W40, Biol10, Biol20, Biol30, Biol40.

Nilai asam meningkat seiring bertambahnya waktu perendaman baja ringan. Gambar 5. juga menunjukkan bahwa peningkatan nilai asam yang signifikan pada setiap waktu pengamatan akibat paparan baja ringan. Nilai asam biopelumas-pelumas komersil lebih stabil dan sedikit meningkat, namun dalam skala yang lebih kecil. Nilai asam yang diamati menunjukkan peningkatan pada hampir seluruh pelumas yang menunjukkan kupon logam (baja ringan) telah mengalami proses oksidasi, yang pada akhirnya meningkatkan konsentrasi asam dalam campuran pelumas komersil.



Gambar 5: Perubahan nilai asam campuran biopelumas-pelumas SAE15W40 sebelum dan sesudah terpapar baja ringan pada temperatur sekitar selama 0, 336, 768 perendaman

Sesuai dengan penelitian (Thangavelu, Ahmed, & Ani, 2016) bilangan asam BIOL40 yang menunjukkan nilai tertinggi bila direndam antara 400 jam dan 2000 jam, berturut-turut adalah 1,9618, 1,95798, 2,3378, 2,4206, 2,5152 mg KOH/g. Menurut (Yeşilyurt, Öner, & Yilmaz, 2019) peningkatan bilangan asam tersebut disebabkan oleh meningkatnya oksidasi biopelumas sehingga membentuk asam lemak bebas pada pelumas. Adanya asam korosif pada pelumas dapat meningkatkan nilai asam. Selain itu, jumlah asam juga dapat digunakan untuk mengetahui kadar asam lemak bebas dan asam lainnya yang bertanggung jawab terhadap degradasi biopelumas (Rocabruno-Valdés dkk., 2019).

4. KESIMPULAN

Biopelumas dari limbah minyak goreng sesuai dengan standar ISO VG 100. Penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi biopelumas dalam campuran (BIOL20, BIOL30, dan BIOL40), semakin rendah laju korosi yang diamati seiring dengan peningkatan waktu perendaman. Namun, campuran BIOL10 menunjukkan laju korosi yang hampir sama dengan pelumas komersil, bahkan lebih baik pada perendaman yang lebih lama. Nilai asam yang diamati menunjukkan peningkatan pada hampir seluruh pelumas yang menunjukkan kupon logam (baja ringan) telah mengalami proses oksidasi, yang pada akhirnya meningkatkan konsentrasi asam dalam campuran biopelumas.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada Politeknik Negeri Medan atas pendanaan yang diberikan melalui Kontrak: (B/358/PL5/PT.01.05/2024) yang berasal dari dana DIPA POLMED tahun 2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhabue, C., Aisien, F., & Ojo, C. (2014). The effect of Jatropha oil biodiesel on the corrosion rates of aluminium and mild carbon steel. *Biofuels*, 5(5), 545-550.
- Appiah, G., Tulashie, S. K., Akpari, E. E. A., Rene, E. R., & Doodoo, D. (2022). Biolubricant production via esterification and transesterification processes: Current updates and perspectives. *International Journal of Energy Research*, 46(4), 3860-3890. doi: <https://doi.org/10.1002/er.7453>
- Aravind, A., Joy, M., & Nair, K. P. (2015). Lubricant properties of biodegradable rubber tree seed (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) oil. *Industrial crops and products*, 74, 14-19. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.014>

- Arumugam, S., Ellappan, R., Sangavi, S., Sriram, G., & Ramakrishna, P. (2018). Feasibility analysis of biodegradable automotive lubricant: an evaluation of material–lubricant compatibility in a corrosion perspective. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 1345-1368.
- Arumugam, S., Ellappan, R., & Sriram, G. (2018). Bio Lubricant-Biodiesel Combination of IC Engines: A Review on Corrosion Horizon and Perspective. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 10(3-4), 277-281.
- Arumugam, S., Ellappan, R., & Sriram, G. (2021). Degradation of engine components upon exposure to chemically modified vegetable oil-Based automotive lubricant. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(11), 100227.
- Arumugam, S., Sriram, G., Rajmohan, T., & Paulo Davim, J. (2016). Multi-objective Optimization of Engine Parameters While Bio-lubricant–Biofuel Combination of VCR Engine Using Taguchi-Grey Approach. *Ecotribology: Research Developments*, 105-123.
- Bapat, A., Pradhan, S., & Madankar, C. S. (2024). Oil and Fats as Raw Materials as Corrosion Inhibitors and Biolubricants. *Oils and Fats as Raw Materials for Industry*, 195-229. doi:<https://doi.org/10.1002/9781119910558.ch>
- Cao, D., Matsakas, L., Zhang, J., Dong, L., Shi, Y., Zhu, J., . . . Mu, L. (2024). Biolubricant. *Sustainable Production Innovations: Bioremediation and Other Biotechnologies*, 1-56.
- Cavalcanti, E. D., Aguiéiras, E. C., da Silva, P. R., Duarte, J. G., Cipolatti, E. P., Fernandez-Lafuente, R., . . . Freire, D. M. (2018). Improved production of biolubricants from soybean oil and different polyols via esterification reaction catalyzed by immobilized lipase from *Candida rugosa*. *Fuel*, 215, 705-713. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.119>
- Cecilia, J. A., Ballesteros Plata, D., Alves Saboya, R. M., Tavares de Luna, F. M., Cavalcante Jr, C. L., & Rodríguez-Castellón, E. (2020). An overview of the biolubricant production process: Challenges and future perspectives. *Processes*, 8(3), 257.
- Chandran, D., Ng, H. K., Lau, H. L. N., Gan, S., & Choo, Y. M. (2016). Investigation of the effects of palm biodiesel dissolved oxygen and conductivity on metal corrosion and elastomer degradation under novel immersion method. *Applied Thermal Engineering*, 104, 294-308.
- Crown, O. (2023). Fuels and lubricants -hydraulic fluids. In: <https://www.crownoil.co.uk/guides/hydraulic-oil-guide/>.
- Dharma, S., Silitonga, A., Shamsuddin, A., Sebayang, A., Milano, J., Sebayang, R., . . . Ginting, B. (2023). Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(2), 3887-3899.
- Ellappan, R., Arumugam, S., Sundararajan, R., & Venkatesh, K. (2021). Comparative Corrosion Behaviour of Ferrous and Non-ferrous Metals in Bio-lubricant and Bio-diesel Environment. Paper presented at the Advances in Materials and Manufacturing Engineering: Select Proceedings of ICMME 2019.
- ESDM. (2023). Handbook Of Energy & Economic Statistics Of Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Farfan-Cabrera, L. I., Gallardo-Hernández, E. A., & Pérez-González, J. (2017). Compatibility study of common sealing elastomers with a biolubricant (Jatropha oil). *Tribology International*, 116, 1-8. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.039>
- Fasogbon, S., & Olagoke, O. (2016). Influence of temperature on corrosion characteristics of metals in used cooking oil methyl ester. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 5(4), 71-75.
- Gulzar, M., Masjuki, H., Kalam, M., Varman, M., Zulkifli, N., Mufti, R., & Zahid, R. (2016). Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research*, 18, 1-25.
- Gupta, A. R., & Rathod, V. K. (2018). Calcium diglyceroxide catalyzed biodiesel production from waste cooking oil in the presence of microwave: Optimization and kinetic studies. *Renewable Energy*, 121, 757-767.
- Ifeanyi-Nze, F. O., & Akhiehiro, E. T. (2023). Optimization of the process variables on biodegradable industrial lubricant basestock synthesis from *Jatropha curcas* seed oil via response surface methodology. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1169565. doi:<https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1169565>
- Joshi, J. R., Bhandari, K. K., & Patel, J. V. (2023). A review on bio-lubricants from non-edible oils-recent advances, chemical modifications and applications. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100(1), 100849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100849>
- Joshi, J. R., Bhandari, K. K., Patel, J. V., & Karve, M. (2023). Chemical modification of waste cooking oil for the biolubricant production through transesterification process. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100(3), 100909. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.100909>
- Kalam, M., Masjuki, H., Cho, H. M., Mosarof, M., Mahmud, M. I., Chowdhury, M. A., & Zulkifli, N. (2017). Influences of thermal stability, and lubrication performance of biodegradable oil as an engine oil for improving the efficiency of heavy duty diesel engine. *Fuel*, 196, 36-46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.071>
- Kania, D., Yunus, R., Omar, R., Rashid, S. A., & Jan, B. M. (2015). A review of biolubricants in drilling fluids: Recent research, performance, and applications. *Journal of petroleum science and engineering*, 135, 177-184. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.09.021>
- Koutsouki, A., Tegou, E., Badeka, A., Kontakos, S., Pomonis, P., & Kontominas, M. (2016). In situ and conventional transesterification of rapeseeds for biodiesel production: The effect of direct sonication. *Industrial crops and products*, 84, 399-407.
- Kugelmeier, C. L., Monteiro, M. R., da Silva, R., Kuri, S. E., Sordi, V. L., & Della Rovere, C. A. (2021). Corrosion behavior of carbon steel, stainless steel, aluminum and copper upon exposure to biodiesel blended with petrodiesel. *Energy*, 226, 120344.
- Lee, C. T., Lee, M. B., Chong, W. W. F., Samion, S., & Skudai, U. (2022). Nano-frictional investigation on boundary lubricity of oleic acid, methyl oleate and trimethylolpropane trioleate. *Jurnal Tribologi*, 32, 1-15.
- Lelawati, L. (2022). PENGARUH PEMANASAN DAN QUENCHING DENGAN AIR LAUT TERHADAP STRUKTUR MIKRO BAJA KARBON SEDANG. *Jurnal Redoks*, 7(1), 62-72.
- Liu, S., Nie, K., Zhang, X., Wang, M., Deng, L., Ye, X., . . . Tan, T. (2014). Kinetic study on lipase-catalyzed biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 99, 43-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.10.009>

- Mobarak, H., Mohamad, E. N., Masjuki, H. H., Kalam, M., Al Mahmud, K., Habibullah, M., & Ashraful, A. (2014). The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 34-43.
- Mohadesi, M., Aghel, B., Maleki, M., & Ansari, A. (2019). Production of biodiesel from waste cooking oil using a homogeneous catalyst: Study of semi-industrial pilot of microreactor. *Renewable Energy*, 136, 677-682.
- Mohamad Aziz, N. A., Yunus, R., Kania, D., & Abd Hamid, H. (2021). Prospects and challenges of microwave-combined technology for biodiesel and biolubricant production through a transesterification: A review. *Molecules*, 26(4), 788.
- Mohamed, N., Hamidon, M. L. H., Jumadi, R., Khalid, A., Jaat, N., Salleh, H., & Samion, S. (2022). Analysis of the Biodegradable Lubricant in Internal Combustion Engine. *Journal of Automotive Powertrain and Transportation Technology*, 2(1), 47-55.
- Mulyana, C., Saad, A. H., Nurhilal, O., & Yusuf, M. F. (2015). Penentuan Umur Sisa Pipa (Tube) Pada Pengilangan Minyak (Halaman 18 sd 22). *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(55).
- Negi, R. S., Singh, R. K., Atray, N., & Singh, S. K. (2023). Potential valorization of used cooking oil into novel biolubricating grease through chemical modification and its performance evaluation. *Industrial crops and products*, 205, 117555. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117555>
- Nugroho, A., Haryadi, G. D., Ismail, R., & Kim, S. J. (2016). Risk based inspection for atmospheric storage tank. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Otabor, G., Ifijen, I., Mohammed, F., Aigbodion, A., & Ikhuoria, E. (2019). Alkyd resin from rubber seed oil/linseed oil blend: A comparative study of the physicochemical properties. *Heliyon*, 5(5), e01621.
- Paar, A. (2023). ISO viscosity classification - ISO 3448. In.
- Pambudi, H. R. JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG 2016.
- Panchal, T. M., Patel, A., Chauhan, D., Thomas, M., & Patel, J. V. (2017). A methodological review on bio-lubricants from vegetable oil based resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 65-70. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.105>
- Perera, M., Yan, J., Xu, L., Yang, M., & Yan, Y. (2022). Bioprocess development for biolubricant production using non-edible oils, agro-industrial byproducts and wastes. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131956. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131956>
- Prasannakumar, P., Edla, S., Thampi, A. D., Arif, M., & Santhakumari, R. (2022). A comparative study on the lubricant properties of chemically modified *Calophyllum inophyllum* oils for bio-lubricant applications. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130733. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130733>
- Prasannakumar, P., Sankarannair, S., Bose, C., Santhakumari, R., & Jyothi, S. N. (2023). Influence of techniques on synthesizing cashew nut shell oil as a prospective biolubricant on its physicochemical, tribological, and thermal behaviors. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136717. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136717>
- Putra, M. D., Nata, I. F., & Irawan, C. (2020). Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalyst: Biodiesel product data and its characterization. *Data in brief*, 28.
- Qi, D., & Lee, C.-F. (2014). Influence of soybean biodiesel content on basic properties of biodiesel-diesel blends. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 504-507.
- Rocabruno-Valdés, C., González-Rodríguez, J., Díaz-Blanco, Y., Juantorena, A., Muñoz-Ledo, J., El-Hamzaoui, Y., & Hernández, J. (2019). Corrosion rate prediction for metals in biodiesel using artificial neural networks. *Renewable Energy*, 140, 592-601.
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tribont.2017.01.030>
- Salih, N., & Salimon, J. (2021). A review on eco-friendly green biolubricants from renewable and sustainable plant oil sources. *Biointerface Res. Appl. Chem*, 11(5), 13303-13327. doi:<https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1330313327>
- Saluja, R. K., Kumar, V., & Sham, R. (2016). Stability of biodiesel—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 866-881.
- Samuel, O., Ashiedu, F., & Oreko, B. (2016). Analysis of coconut ethyl ester (biodiesel) and fossil diesel blending: properties and corrosion characteristics. *Nigerian Journal of Technology*, 35(1), 107-113.
- Singh, Y., Farooq, A., Raza, A., Mahmood, M. A., & Jain, S. (2017). Sustainability of a non-edible vegetable oil based bio-lubricant for automotive applications: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 701-713.
- Slepski, P., Gerengi, H., Jazdzewska, A., Orlikowski, J., & Darowicki, K. (2014). Simultaneous impedance and volumetric studies and additionally potentiodynamic polarization measurements of molasses as a carbon steel corrosion inhibitor in 1M hydrochloric acid solution. *Construction and Building Materials*, 52, 482-487.
- Soni, S., & Agarwal, M. (2014). Lubricants from renewable energy sources—a review. *Green Chemistry letters and reviews*, 7(4), 359-382.
- Sterpu, A. E., Simearea, B. G., Chis, T. V., & Săpunaru, O. V. (2024). Corrosion Effect of Biodiesel-Diesel Blend on Different Metals/Alloy as Automotive Components Materials. *Fuels*, 5(1), 17-32.
- Sun, G., Li, Y., Cai, Z., Teng, Y., Wang, Y., & Reaney, M. J. (2017). K₂CO₃-loaded hydrotalcite: a promising heterogeneous solid base catalyst for biolubricant base oil production from waste cooking oils. *Applied catalysis b: environmental*, 209, 118-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.078>
- Syaima, M., Ong, K., Noor, I. M., Zamratul, M., Brahim, S., & Hafizul, M. (2015). The synthesis of bio-lubricant based oil by hydrolysis and non-catalytic of palm oil mill effluent (POME) using lipase. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 669-675. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.005>
- Thangavelu, S. K., Ahmed, A. S., & Ani, F. N. (2016). Impact of metals on corrosive behavior of biodiesel–diesel–ethanol (BDE) alternative fuel. *Renewable Energy*, 94, 1-9.
- Thangavelu, S. K., & Ezhumalai, P. (2017). Corrosion behavior of low carbon steel in bioethanol fuel blends. *Solid State Phenomena*, 263, 115-119.

- Ude, C. N., Igwilo, C. N., Nwosu-Obieogu, K., Nnaji, P. C., Oguanobi, C. N., Amulu, N. F., . . . Omenihu, U. C. (2023). Optimization of dual transesterification of jatropha seed oil to biolubricant using hybridized response surface methodology (RSM) and adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)-genetic algorithm (GA). *Sustainable Chemistry for the Environment*, 4, 100050. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100050>
- Wang, E., Ma, X., Tang, S., Yan, R., Wang, Y., Riley, W. W., & Reaney, M. J. (2014). Synthesis and oxidative stability of trimethylolpropane fatty acid triester as a biolubricant base oil from waste cooking oil. *Biomass and Bioenergy*, 66, 371-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.022>
- Yeşilyurt, M. K., Öner, İ. V., & Yılmaz, E. C. (2019). Biodiesel induced corrosion and degradation. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 60-70.
- Zahra, F. A., Aliyah, B., & Nurhadi, L. O. (2019). Ekstrak Kafein Ampas Kopi Sebagai Inhibitor Korosi Baja Murni Dalam Media H₂SO₄. *Prosiding Semnastek*.
- Zaid, M., Singh, Y., Kumar, A., & Gupta, S. (2020). Development of the *Calophyllum inophyllum* based biolubricant and their tribological analysis at different conditions. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2582-2585. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.546>
- Raja, A.S., Arasu, A.V., & Sornakumar, T. (2015). Effect Of Gasoline-Ethanol Blends On Performance And Emission Characteristics Of A Single Cylinder Air Cooled Motor Bike Si Engine. *Journal of Engineering Science and Technology* 10, 3.
- Sebayang, A. H., Hassan, M. H. Ong, H. C., Dharma, S., Bahar, A. H., Silitonga, A. S., & Kusumo, F. (2017). Enzymatic hydrolysis using ultrasound for bioethanol production from durian (*Durio zibethinus*) seeds as potential biofuel. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 553–558.