



Pengaruh Variasi Jumlah Base Oil Epoksi Asam Lemak Crude Palm Oil terhadap Karakteristik Fisik dan Proteksi Korosi *Biogrease*

Fatmayati^{1*}, Ardiansyah Hamid²

¹Program Studi Teknik Pengolahan Sawit, Politeknik Kampar, Bangkinang, Indonesia

²Program Studi Teknik Pengolahan Kelapa Sawit, Politeknik Kampar, Bangkinang, Indonesia

*Penulis korespondensi: fatmayati80@gmail.com

Abstract. This study investigated the effect of the amount of epoxidized fatty-acid base oil derived from crude palm oil (CPO) on the physical characteristics and corrosion protection performance of *Biogrease*. The base oil was produced through CPO hydrolysis followed by in situ epoxidation using hydrogen peroxide and acetic acid. The *Biogrease* was formulated using calcium complex soap as thickener and calcium carbonate (CaCO_3) and hydroxyapatite (HA) as additives. The epoxy base-oil amounts were 100, 125, 150, 175, and 200 g, while the thickener and additives were kept constant. Characterization included melting point, visual color, corrosion rate after immersion in 3% NaCl for 216 h, and surface roughness after 3, 6, and 9 days. The melting point decreased gradually from 80.05 to 79.80 °C as the base-oil amount increased. Corrosion rate increased from 7.621 to 24.693 mpy, whereas commercial grease showed 2.667 mpy and the unlubricated specimen reached 31.400 mpy. Surface roughness increased with immersion time, but all *Biogrease*-coated specimens remained considerably smoother than the unlubricated specimen. V1 containing 100 g epoxy base oil provided the best overall balance, with a melting point of 80.05 °C, a corrosion rate of 7.621 mpy, and surface roughness values of 0.341, 0.459, and 0.490 μm at 3, 6, and 9 days, respectively. The results indicate that excessive base-oil addition relative to the fixed thickener content weakens the grease network and reduces protective performance.

Keywords: *Biogrease*; Calcium Complex Soap; Crude Palm Oil; Epoxidation; Surface Roughness.

Abstrak. Penelitian ini mengkaji pengaruh jumlah *base oil* berupa senyawa epoksi asam lemak yang berasal dari minyak sawit kasar (crude palm oil, CPO) terhadap karakteristik fisik dan kemampuan proteksi korosi *Biogrease*. *Base oil* diperoleh melalui hidrolisis CPO yang dilanjutkan dengan epoksidasi secara in situ menggunakan hidrogen peroksida dan asam asetat. *Biogrease* diformulasikan menggunakan sabun kalsium kompleks sebagai *thickener* serta kalsium karbonat (CaCO_3) dan hidroksiapatit (HA) sebagai aditif. Jumlah *base oil* epoksi divariasikan menjadi 100, 125, 150, 175, dan 200 g, sedangkan jumlah *thickener* dan aditif dipertahankan tetap. Karakterisasi meliputi titik leleh, warna secara visual, laju korosi setelah perendaman dalam NaCl 3% selama 216 jam, serta kekasaran permukaan setelah 3, 6, dan 9 hari. Titik leleh menurun bertahap dari 80,05 menjadi 79,80 °C seiring peningkatan jumlah *base oil*. Laju korosi meningkat dari 7,621 menjadi 24,693 mpy, sedangkan grease komersial sebesar 2,667 mpy dan spesimen tanpa pelumas sebesar 31,400 mpy. Kekasaran permukaan meningkat seiring waktu perendaman, tetapi seluruh spesimen yang dilapisi *Biogrease* tetap lebih halus dibandingkan spesimen tanpa pelumas. V1 dengan 100 g *base oil* epoksi memberikan keseimbangan karakteristik terbaik, dengan titik leleh 80,05 °C, laju korosi 7,621 mpy, serta kekasaran permukaan 0,341; 0,459; dan 0,490 μm masing-masing pada hari ke-3, ke-6, dan ke-9. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *base oil* secara berlebihan terhadap jumlah *thickener* yang tetap dapat melemahkan jaringan *Biogrease* dan menurunkan kemampuan proteksinya.

Kata kunci: *Biogrease*; Crude Palm Oil; Epoksidasi; Kekasaran Permukaan; Sabun Kalsium Kompleks.

1. LATAR BELAKANG

Pengembangan pelumas berbasis sumber terbarukan menjadi salah satu pendekatan untuk mendukung tribologi berkelanjutan. *Grease* berfungsi mengurangi gesekan dan keausan serta mempertahankan pelumas pada kondisi operasi tertentu. Minyak nabati berpotensi menggantikan minyak mineral karena bersifat terbarukan, biodegradable, dan memiliki kemampuan pelumasan yang baik, meskipun kestabilan oksidatif dan termalnya masih menjadi tantangan (Soodoo et al., 2023; Uppar et al., 2023). Pengembangan *Biogrease* memerlukan

pemilihan *base oil*, *thickener*, dan aditif yang tepat untuk memperoleh kinerja yang sesuai. Razak dan Ahmad (2021) menunjukkan potensi *palm-based ester* sebagai *base fluid*, sedangkan Săpunaru et al (2024) menunjukkan bahwa formulasi dan karakteristik *thickener* berperan terhadap kinerja bio-grease.

Minyak sawit kasar (*crude palm oil*, CPO) mengandung trigliserida dengan asam lemak jenuh dan tidak jenuh yang berpotensi dimodifikasi secara kimia. Ikatan rangkap pada asam lemak tidak jenuh dapat dikonversi melalui epoksidasi menjadi gugus oksirana, sehingga menghasilkan senyawa yang lebih reaktif untuk pengembangan bahan berbasis minyak nabati. Proses epoksidasi dapat dilakukan menggunakan hidrogen peroksida dengan asam organik atau katalis asam, sedangkan suhu, waktu reaksi, rasio reaktan, dan konsentrasi katalis memengaruhi pembentukan epoksi serta reaksi samping (Budiyati et al., 2020; Uppar et al., 2023). Modifikasi tersebut berpotensi meningkatkan pemanfaatan minyak nabati sebagai bahan dasar biolubricant.

Pada sistem *grease*, kinerja tidak hanya ditentukan oleh *base oil*. *Thickener* membentuk jaringan yang menahan *base oil* dan menentukan konsistensi, titik leleh, stabilitas mekanik, serta pelepasan minyak. Penelitian Ni'mah dan Maharani (2022) menunjukkan potensi sabun kalsium kompleks dari bahan minyak nabati sebagai *thickener grease* yang mendekati karakteristik pelumas padat menurut standar. Pada *palm ester*, *calcium complex soap* juga digunakan untuk menghasilkan *Biogrease* dengan karakteristik reologi dan tribologi yang dapat dikembangkan untuk aplikasi teknis (Razak et al., 2024).

Pemilihan aditif juga menjadi faktor penting. CaCO_3 dan hidroksiapatit merupakan dua aditif anorganik yang berpotensi mendukung perlindungan permukaan dan kemampuan menahan beban. Pada *palm-based Biogrease*, kombinasi CaCO_3 dan HA dilaporkan memperbaiki respons gesekan dan kemampuan membawa beban (Razak & Ahmad, 2021). Penelitian lain menggunakan CaCO_3 dan hBN pada *palm ester Biogrease* menunjukkan penurunan koefisien gesek dan laju keausan dibandingkan formulasi dasar (Razak et al., 2024).

Kajian yang secara khusus menghubungkan variasi jumlah *base oil* epoksi asam lemak CPO dengan titik leleh, proteksi korosi, dan perubahan kekasaran permukaan masih terbatas. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mempertahankan jumlah *thickener* dan aditif, kemudian memvariasikan jumlah *base oil* epoksi pada lima tingkat. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi langsung terhadap perubahan rasio base oil terhadap *thickener* dan implikasinya terhadap karakteristik fisik serta perlindungan permukaan.

Penelitian bertujuan menganalisis pengaruh variasi jumlah *base oil* epoksi asam lemak CPO terhadap titik leleh, warna, laju korosi, dan kekasaran permukaan *Biogrease* serta menentukan formulasi yang memberikan keseimbangan karakteristik paling baik.

2. METODE PENELITIAN

Tempat dan Bahan

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Pengolahan Sawit, Politeknik Kampar, Bangkinang, Riau, pada bulan Oktober 2023 – Februari 2024. Bahan utama berupa CPO dari PMKS Mitra Bumi, Bukit Sembilan, Kabupaten Kampar. Bahan kimia meliputi HCl 37%, H₂SO₄, asam asetat glasial, H₂O₂ 30%, heksana, Ca(OH)₂, asam stearat, CaCO₃, hidroksiapatit, NaCl, NaOH, KOH, etanol 96%, indikator fenolftalein, dan akuades. Peralatan utama terdiri atas sistem refluks, hot plate, magnetic stirrer, corong pisah, rotary evaporator, Electrothermal IA9200 melting point, dan Mitutoyo SURFTEST SJ-310.

Pembuatan *Base Oil* Epoksi

Sebanyak 800 g CPO dihidrolisis menggunakan air dengan rasio minyak:air 1:9 dan HCl 37% sebesar 3% (b/b). Reaksi berlangsung pada 100 °C selama 1 jam dengan pengadukan 500 rpm. Setelah reaksi selesai, campuran dipisahkan menggunakan corong pisah hingga diperoleh fase asam lemak dan fase air–gliserol. Data penelitian mencatat perolehan asam lemak sebesar 754 g dari 800 g CPO dan kadar asam lemak bebas hasil hidrolisis sebesar 2,6%.

Epoksidasi dilakukan melalui pembentukan asam perasetat secara in situ. Berdasarkan data penelitian, sebanyak 754 g asam lemak hasil hidrolisis direaksikan dengan heksana 300 g, asam asetat glasial 112,5 g, H₂SO₄ 18,75 g, dan H₂O₂ 30% sebanyak 225 g. Campuran direaksikan pada 60 °C selama 180 menit, kemudian dicuci menggunakan air panas 40–45 °C dan dimurnikan dengan *rotary evaporator* pada 80 °C selama 15 menit. Proses tersebut menghasilkan 615,5 g senyawa epoksi, sehingga rendemen epoksidasi mencapai 81,63%.

Pembuatan Sabun Kalsium Kompleks

Sabun kalsium kompleks dibuat dengan senyawa epoksi sekitar 60 g, asam stearat 30 g, Ca(OH)₂ sekitar 22,5 g, dan asam asetat glasial 30 g. Senyawa epoksi dipanaskan pada 120 °C selama 5 menit. Ca(OH)₂ dilarutkan dalam air sebelum dimasukkan ke sistem, kemudian campuran diaduk pada 650 rpm selama 30 menit pada 120 °C. Data laporan menunjukkan rendemen thickener sebesar 84,03%.

Formulasi *Biogrease*

Biogrease dibuat dengan memvariasikan jumlah *base oil* epoksi, sedangkan *thickener* dan aditif dipertahankan konstan. *Base oil* dipanaskan sampai mencair, kemudian *thickener*

dan aditif dimasukkan. Homogenisasi dilakukan pada 120 °C dan 650 rpm selama 120 menit, dilanjutkan pengadukan tanpa pemanasan hingga terbentuk struktur semi-padat.

Tabel 1. Formulasi *Biogrease*.

Variasi	Base oil epoksi (g)	Thickener (g)	CaCO ₃ (g)	HA (g)
V1	100	12	5	3
V2	125	12	5	3
V3	150	12	5	3
V4	175	12	5	3
V5	200	12	5	3

Pengujian dan Analisis Data

Titik leleh diuji menggunakan *Electrothermal* IA9200 sebagai alat alternatif karena keterbatasan alat; laporan menyatakan pengujian belum dilakukan secara penuh menggunakan ASTM D556. Warna diamati secara visual mengacu pada SNI 7069-8:2017. Uji korosi menggunakan *pelat baja cutter* yang dilapisi *Biogrease*, *grease* komersial, atau tanpa pelumas, kemudian direndam dalam NaCl 3% selama 216 jam. Laju korosi dihitung dari kehilangan massa menggunakan konstanta $3,45 \times 10^6$ untuk satuan mpy. Kekasaran permukaan diukur menggunakan Mitutoyo SURFTEST SJ-310 setelah perendaman 3, 6, dan 9 hari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

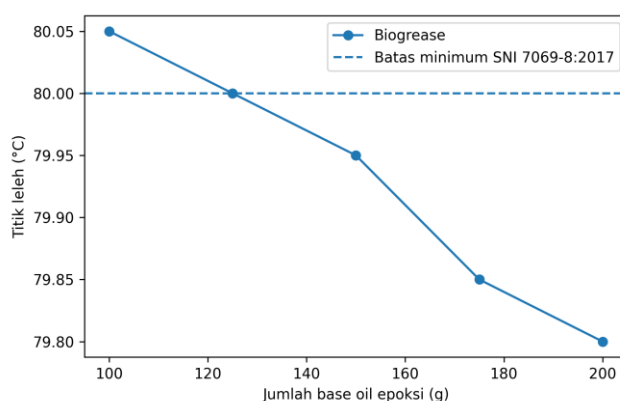
Pembentukan *Base Oil* dan *Thickener*

Hidrolisis CPO menghasilkan fase asam lemak yang digunakan sebagai bahan baku epoksidasi. Data penelitian menunjukkan bahwa dari 800 g CPO diperoleh 754 g asam lemak dengan kadar asam lemak bebas sebesar 2,6%. Selanjutnya, asam lemak tersebut diepoksidasi melalui pembentukan asam perasetat secara *in situ* dari asam asetat dan hidrogen peroksida dengan bantuan katalis asam. Pada mekanisme ini, asam perasetat berperan sebagai agen epoksidasi yang mentransfer atom oksigen ke ikatan rangkap asam lemak sehingga terbentuk gugus oksirana (Chen et al., 2019; Wai et al., 2019). Dari 754 g asam lemak yang direaksikan diperoleh 615,5 g senyawa epoksi atau rendemen sebesar 81,63%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses epoksidasi mampu menghasilkan produk dalam jumlah yang cukup tinggi untuk dimanfaatkan sebagai *base oil Biogrease*. Efektivitas proses epoksidasi dipengaruhi oleh beberapa parameter, antara lain suhu, waktu reaksi, rasio asam karboksilat dan hidrogen peroksida terhadap ikatan rangkap, jumlah katalis, serta intensitas pengadukan. Kondisi reaksi yang terlalu berat juga perlu dihindari karena dapat memicu pembukaan cincin oksirana dan menurunkan kualitas produk epoksi (Hakim et al., 2021; Wai et al., 2019).

Sabun kalsium kompleks yang dihasilkan berupa padatan putih dengan tekstur halus menyerupai mentega dan rendemen 84,03%. Jaringan *thickener* berfungsi menahan base oil dan menentukan konsistensi grease. Temuan ini sejalan dengan Ni'mah dan Maharani (2022) mengenai pengembangan sabun kalsium kompleks sebagai *thickener* serta penelitian Abdul Razak et al. (2024) pada *palm ester Biogrease*.

Titik Leleh

Titik leleh menurun bertahap dari 80,05 °C pada V1 menjadi 79,80 °C pada V5 sedangkan titik leleh *Grease* komersial menunjukkan 152,25 °C. Data dapat dilihat di Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan Jumlah Base Oil Epoksi Dengan Titik Leleh *Biogrease*.

Pada Gambar 1 terlihat bahwa titik leleh *Biogrease* cenderung menurun seiring peningkatan jumlah *base oil*. Kondisi ini menunjukkan bahwa komposisi antara *base oil* dan *thickener* berperan dalam menentukan kestabilan termal grease. Peningkatan fraksi *base oil* dengan jumlah *thickener* yang tetap dapat mengurangi proporsi jaringan pengental yang mempertahankan fase minyak dalam struktur semipadat. Kozdrach (2024) menunjukkan bahwa jenis dan keberadaan *thickener* pada pelumas berbasis minyak nabati berpengaruh nyata terhadap sifat reologi, viskoelastisitas, dan karakteristik tribologi. Dengan demikian, rasio *base oil–thickener* perlu dioptimalkan untuk memperoleh karakteristik termal yang sesuai.

V1 dan V2 mencapai batas minimum 80 °C yang digunakan dalam laporan berdasarkan SNI 7069-8:2017. Namun, karena pengujian menggunakan Electrothermal IA9200 sebagai alternatif dan bukan ASTM D556 secara penuh, hasil ini perlu diposisikan sebagai hasil karakterisasi laboratorium, bukan klaim kesetaraan metode standar. Nilai grease komersial yang jauh lebih tinggi menunjukkan masih adanya ruang optimasi formulasi untuk aplikasi temperatur tinggi.

Warna Biogrease

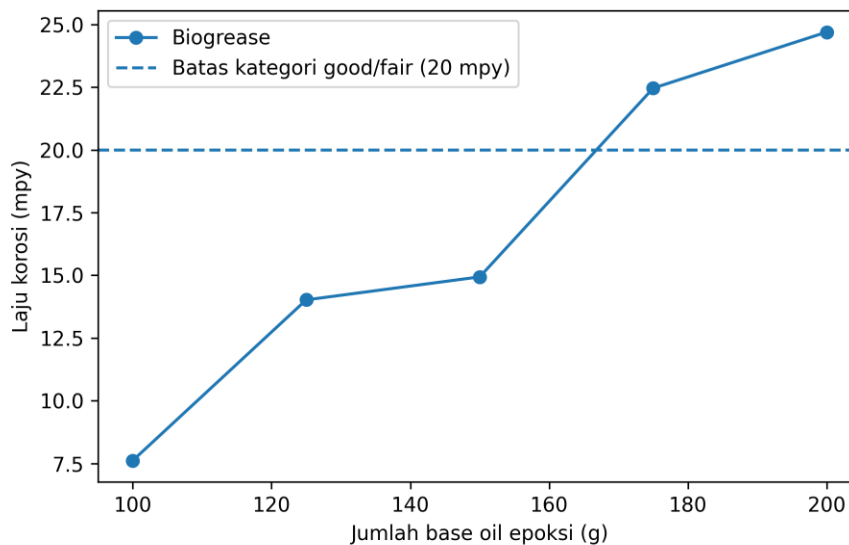
Warna berubah dari putih pada V1 menjadi putih krem pada V2, krem muda pada V3, krem pada V4, dan krem pekat pada V5, sedangkan grease komersial berwarna coklat tua. Perubahan visual menunjukkan bahwa peningkatan fraksi *base oil* mempengaruhi penampakan produk. Warna bukan parameter utama kinerja tribologi, tetapi dapat menjadi indikator visual konsistensi produk.

Tabel 2. Warna Biogrease.

Sampel	Warna
V1	Putih
V2	Putih krem
V3	Krem muda
V4	Krem
V5	Krem pekat
Komersial	Cokelat tua

Laju Korosi

Seluruh formulasi *Biogrease* mampu menurunkan laju korosi dibandingkan spesimen tanpa grease. Data laju korosi pada variasi *base oil* yang digunakan dapat dilihat di Gambar 2.



Gambar 2. Laju Korosi Pada Berbagai Formulasi *Biogrease*.

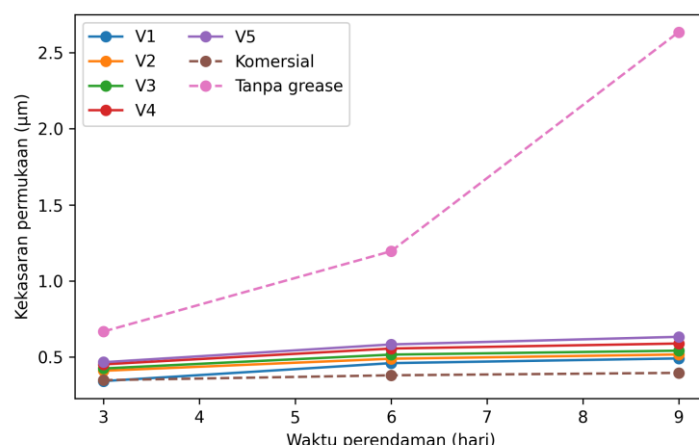
Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa V1 memberikan laju korosi terendah di antara formulasi *Biogrease*, yaitu 7,621 mpy, sedangkan V5 menghasilkan 24,693 mpy. Spesimen tanpa grease mencapai 31,400 mpy dan grease komersial 2,667 mpy. Peningkatan laju korosi dari V1 ke V5 menunjukkan bahwa penambahan base oil pada *thickener* yang tetap tidak otomatis meningkatkan proteksi. Peningkatan fraksi minyak dapat menurunkan kepadatan jaringan *thickener* sehingga film pelindung pada permukaan logam menjadi kurang kontinu. Jika lapisan pelumas kurang stabil, air dan oksigen lebih mudah mencapai permukaan logam.

Temuan ini sejalan dengan penelitian *palm Biogrease* yang menunjukkan bahwa komposisi thickener dan aditif mempengaruhi pembentukan lapisan pelindung serta respons tribologi (Razak et al., 2024; Razak & Ahmad, 2021).

CaCO_3 dan HA tetap berperan penting dalam interpretasi hasil karena keduanya digunakan sebagai aditif dalam formulasi *Biogrease*. Razak dan Ahmad (2021) melaporkan bahwa penambahan 5% CaCO_3 dan 3% HA pada *palm-based Biogrease* mampu menurunkan koefisien gesek sekaligus meningkatkan kemampuan membawa beban dibandingkan grease tanpa aditif. Efek tersebut menunjukkan bahwa kedua aditif dapat mendukung pembentukan lapisan pelumas yang lebih efektif pada permukaan kontak. Dengan demikian, peningkatan laju korosi pada V4–V5 lebih tepat dikaitkan dengan rasio base oil terhadap *thickener* yang kurang optimum, sementara efektivitas aditif juga bergantung pada dispersi dan komposisinya.

Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan meningkat pada seluruh sampel seiring bertambahnya waktu perendaman, tetapi peningkatannya jauh lebih besar pada spesimen tanpa grease. Hasil pengujian kekasaran permukaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perubahan Kekasaran Permukaan Selama Perendaman.

Gambar 3 menunjukkan bahwa kekasaran permukaan V1 meningkat dari 0,341 menjadi 0,459 dan 0,490 μm masing-masing pada hari ke-3, ke-6, dan ke-9, sedangkan spesimen tanpa grease meningkat lebih besar, yaitu dari 0,667 menjadi 1,195 dan 2,636 μm . *Grease* komersial menghasilkan nilai yang relatif stabil, yaitu 0,347; 0,379; dan 0,395 μm . Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa lapisan *Biogrease* dapat membatasi kontak langsung antara permukaan baja dan lingkungan korosif sehingga perubahan kondisi permukaan dapat ditekan. Kecenderungan ini juga terlihat pada V1 yang memiliki laju korosi terendah dan peningkatan kekasaran paling kecil di antara formulasi *Biogrease*.

Berdasarkan parameter yang diuji, V1 memberikan karakteristik paling seimbang. Namun, formulasi tersebut belum dapat dinyatakan sebagai kondisi optimum secara menyeluruh karena evaluasi *bio-grease* idealnya mencakup karakteristik reologi, stabilitas mekanik, perilaku gesekan, keausan, dan ketahanan struktur. Kozdrach (2024) menunjukkan bahwa jenis *thickener* memengaruhi sifat reologi, viskoelastik, dan tribologi pelumas berbasis minyak nabati, sedangkan Abouelkasem et al. (2024) menekankan pentingnya pengujian tribologi dan kinerja operasional pada *bio-grease*.

4. KESIMPULAN

Variasi jumlah *base oil* epoksi asam lemak CPO pada jumlah *thickener* dan aditif yang tetap memengaruhi karakteristik *Biogrease*. Peningkatan *base oil* dari 100 menjadi 200 g menyebabkan titik leleh turun dari 80,05 menjadi 79,80 °C dan laju korosi meningkat dari 7,621 menjadi 24,693 mpy. Seluruh *Biogrease* memberikan perlindungan permukaan yang lebih baik daripada kondisi tanpa *grease*, ditunjukkan oleh nilai kekasaran yang lebih rendah selama perendaman 3–9 hari.

Formulasi V1 dengan 100 g *base oil* epoksi memberikan keseimbangan terbaik pada parameter yang diuji, yaitu titik leleh 80,05 °C, laju korosi 7,621 mpy, dan kekasaran permukaan 0,341–0,490 µm selama 3–9 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa *base oil* epoksi CPO berpotensi dikembangkan sebagai bahan dasar *Biogrease*, tetapi peningkatan kinerja terhadap *grease* komersial masih memerlukan optimasi rasio *thickener*–*base oil* dan pengujian tribologi serta reologi yang lebih lengkap.

DAFTAR REFERENSI

- Abouelkasem, Z. A., Nassef, G. A., Abdelnaeem, M., & Nassef, M. G. A. (2024). Enhancing the Elastohydrodynamic Lubrication and Vibration Behavior of Rolling Bearings Using a Hybrid Bio - Grease Blended with Activated Carbon Nanoparticles. *Tribology Letters*, 72(2), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01847-3>
- Budiyati, E., Rochmadi, R., Budiman, A., & Budhijanto, B. (2020). Studies on Epoxidation of Tung oil with Hydrogen Peroxide Catalyzed by Sulfuric Acid. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 15(3), 674–686. <https://doi.org/10.9767/bcrec.15.3.8243.674-686>
- Chen, J., Beaufort, M. D. L., Gyurik, L., Dorresteyn, J., Otte, M., & Gebbink, R. J. M. K. (2019). catalyzed by a manganese complex with hydrogen peroxide and acetic acid. *Green Chemistry*, 21(April), 2436–2447. <https://doi.org/10.1039/c8gc03857k>
- Hakim, M. L., Hambali, E., & Setyaningsih, D. (2021). Formulasi Pembuatan *Biogrease* Dengan Base Oil Epoksi RBDPO. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(3), 364–370. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.3.364>

- Kozdrach, R. (2024). Effect of Thickener Type on Change the Tribological and Rheological Characteristics of Vegetable Lubricants. *Materials*, 17(3959), 1–23. <https://doi.org/10.3390/ma17163959>
- Ni`mah, L., & Maharani, N. (2022). Pembuatan Sabun Kalsium Kompleks Sebagai Thickener Pelumas Padat (Grease) dari Minyak Jelantah. *Jurnal Konversi*, 11(1), 39–44.
- Razak, I. H. A., & Ahmad, M. A. (2021). Tribology in Industry Tribological Behavior of Calcium Complex Palm-*Biogrease* with Green Additives. *Tribology in Industry*, 43(1), 139–149. <https://doi.org/10.24874/ti.1002.11.20.02>
- Razak, I. H. A., Ahmad, M. A., & Azizan, M. A. (2024). Effect of green thickener and additive on friction and wear performance of palm ester bio-grease. *Jurnal Trobologi*, 42(December 2023), 21–32.
- Sapunaru, O. V, Sterpu, A. E., Vodounon, C. A., Nasr, J., Dutescu-Vasile, C., Osman, S., & Koncsag, C. I. (2024). Lubricating Greases from Fried Vegetable Oil — Preparation and Characterization. *Lubricants*, 12(197), 1–17. <https://doi.org/10.3390/lubricants12060197>
- Soodoo, N., Bouzidi, L., & Narine, S. S. (2023). Fundamental Structure – Function Relationships in Vegetable Oil-Based Lubricants: A Critical Review. *Lubricants*, 11(284), 1–48. <https://doi.org/10.3390/lubricants11070284>
- Uppar, R., Dinesha, P., & Kumar, S. (2023). A critical review on vegetable oil-based bio-lubricants : preparation , characterization , and challenges. *Environment, Development and Sustainability*, 25(9), 9011–9046. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02669-w>
- Wai, P. T., Jiang, P., Shen, Y., Zhang, P., Gu, Q., & Leng, Y. (2019). Catalytic developments in the epoxidation of vegetable oils and the analysis methods of epoxidized products. *RSC Advances*, 9(November), 38119–38136. <https://doi.org/10.1039/C9RA05943A>