JURNAL REKAYASA MESIN (JRM)
Vol. 11, No. 02, Agustus 2026
Hal: 775-780
e-ISSN: 2988-7429; p-ISSN: 2337-828X
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin

Optimasi Konsentrasi Aditif Graphene pada Gemuk Pelumas Berbahan Dasar Minyak Goreng Bekas untuk Meminimalkan Koefisien Gesek

Gunawan Dwi Prasetya [1], Dewi Puspitasari [2*], Arya Mahendra Sakti [3], Ferly Isnomo Abdi [4], Dyah Riandadari [5]

[1,2,3,4,5]Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231
E-mail: [*]dewipuspitasari@unesa.ac.id

Abstrak: Minyak goreng bekas merupakan limbah rumah tangga yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dimanfaatkan dengan baik. Salah satu alternatif pemanfaatannya adalah sebagai bahan dasar gemuk pelumas dengan penambahan *graphene* untuk meningkatkan karakteristik tribologinya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *graphene* terhadap koefisien gesek gemuk pelumas berbasis minyak goreng bekas. Gemuk pelumas diformulasikan menggunakan minyak goreng bekas dan HDK sebagai bahan pengental dengan variasi penambahan *graphene*. Pengujian tribologi dilakukan menggunakan metode *Pin-on-Disk* untuk memperoleh nilai koefisien gesek (COF) selama proses pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata koefisien gesek Sampel 1, Sampel 2, Sampel 3, dan Sampel 4 berturut-turut sebesar 0,0738; 0,0347; 0,0443; dan 0,0400. Penambahan *graphene* menghasilkan perubahan nilai koefisien gesek, tetapi peningkatan jumlah *graphene* tidak menunjukkan hubungan yang linear terhadap penurunan koefisien gesek. Sampel 2 menghasilkan nilai rata-rata koefisien gesek terendah sebesar 0,0347 pada kondisi pengujian yang dilakukan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi formulasi *graphene* memengaruhi karakteristik gesekan gemuk pelumas berbasis minyak goreng bekas.

Kata kunci: *graphene*, gemuk pelumas, koefisien gesek, minyak goreng bekas, tribologi.

Abstract: *Used cooking oil is a household waste that can be utilized as an alternative base material for grease lubricant. This study aims to analyze the effect of graphene addition on the friction coefficient of grease lubricant formulated from used cooking oil. The grease was prepared using used cooking oil and HDK as a thickening agent, with variations in graphene addition. Tribological testing was conducted using the Pin-on-Disk method to determine the friction coefficient (COF) during the test. The results showed that the average friction coefficients of Samples 1, 2, 3, and 4 were 0.0738, 0.0347, 0.0443, and 0.0400, respectively. The addition of graphene affected the friction characteristics of the grease; however, increasing the graphene content did not produce a linear decrease in the friction coefficient. Sample 2 exhibited the lowest average friction coefficient of 0.0347 under the test conditions used in this study. These results indicate that graphene content and grease formulation influence the friction characteristics of used cooking oil-based grease lubricants.*

Keywords: *graphene, grease lubricant, friction coefficient, used cooking oil, tribology.*

© 2024, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah rumah tangga masih menjadi salah satu tantangan lingkungan yang di hadapi Indonesia, terutama seiring dengan peningkatan jumlah limbah yang dihasilkan akibat aktivitas dan pertumbuhan penduduk. Salah satu limbah yang paling sulit ditangani adalah minyak goreng bekas atau yang dikenal dengan minyak jelantah. Banyak masyarakat yang masih membuang minyak jelantah langsung ke saluran air atau tanah tanpa proses pengolahan yang tepat. Pembuangan minyak jelantah secara langsung ke tanah maupun saluran air dapat mengganggu kualitas lingkungan karena sifatnya yang sulit terurai dan berpotensi menyebabkan pencemaran tanah serta air [1]. Namun, minyak jelantah tidak sepenuhnya menjadi limbah yang tidak bernilai karena masih mengandung komponen asam lemak dan senyawa organik yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku berbagai produk bernilai tambah. Pemanfaatan minyak jelantah telah dikembangkan untuk menghasilkan berbagai produk, seperti sabun, lilin, dan biodiesel [2], [3]. Selain pemanfaatan tersebut, karakteristik kimia minyak jelantah juga memberikan peluang untuk dikembangkan sebagai bahan dasar produk pelumas yang lebih berkelanjutan.

Minyak nabati dan turunannya memiliki potensi sebagai bahan dasar pelumas karena struktur kimianya yang didominasi triggliserida yang tersusun atas gliserol dan rantai panjang asam lemak dengan gugus ester dapat memberikan kemampuan membentuk film

pelumas yang kuat pada permukaan logam, sehingga menghasilkan sifat *lubricity* yang baik [4]. Potensi tersebut membuka peluang pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan dasar pelumas atau gemuk yang sekaligus dapat memberikan nilai tambah terhadap limbah. Selain sebagai produk rumah tangga, minyak jelantah juga memiliki potensi besar di bidang industri, salah satunya dalam pembuatan pelumas atau gemuk. Selama ini, sebagian besar gemuk yang ada di pasaran diproduksi menggunakan minyak berbasis fosil. Hal ini menimbulkan dua masalah utama, yaitu semakin berkurangnya sumber daya minyak bumi yang tidak terbarukan serta meningkatnya emisi karbon dan limbah berbahaya [5]. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan pada minyak fosil, tetapi juga mendorong terciptanya ekonomi sirkular di sektor industri [2].

Penggunaan minyak nabati, termasuk minyak jelantah, sebagai bahan dasar pelumas menunjukkan potensi yang baik. Hal tersebut didukung oleh penelitian *Husin et al.*, yang menunjukkan bahwa pencampuran minyak nabati berupa *virgin coconut oil* (VCO) dan *crude palm oil* (CPO) dengan minyak mineral SAE 15W/50 menghasilkan karakteristik viskositas yang relatif mendekati minyak mineral SAE 15W/50 [6]. Namun, penggunaan minyak nabati sebagai bahan dasar pelumas masih menghadapi keterbatasan dalam hal kestabilan dan kinerja tribologinya. Oleh karena itu, diperlukan strategi formulasi melalui penambahan aditif untuk meningkatkan performa pelumas berbasis minyak nabati. Salah satu material yang berpotensi digunakan sebagai aditif adalah *graphene* karena karakteristiknya yang dapat mendukung peningkatan kinerja tribologi melalui pengurangan gesekan dan keausan.

Graphene merupakan material dua dimensi yang memiliki struktur berlapis, sifat mekanik yang tinggi, konduktivitas termal, serta kemampuan membentuk lapisan geser pada permukaan kontak [7], [8]. Karakteristik tersebut menjadikan *graphene* berperan sebagai *solid lubricant* melalui mekanisme pergeseran antar lapis pelindung (*tribofilm*) pada permukaan yang mengalami gesekan [9]. Lapisan tersebut dapat mengurangi kontak langsung antarmuka, sehingga berpotensi menurunkan koefisien gesek dan keausan serta meningkatkan kinerja tribologis pelumas [10].

Meskipun demikian, efektifitas *graphene* sebagai aditif pelumas tidak hanya ditentukan oleh karakteristik materialnya, tetapi juga dipengaruhi oleh konsentrasi yang digunakan. Konsentrasi *graphene* yang terlalu rendah dapat menghasilkan jumlah partikel yang tidak mencukupi untuk membentuk lapisan pelindung secara efektif, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aglomerasi dan menurunkan kestabilan dispersi dalam pelumas. Oleh karena itu, diperlukan penentuan konsentrasi *graphene* yang optimal untuk memperoleh penurunan koefisien gesek yang maksimal. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi aditif *graphene* pada gemuk pelumas berbahan dasar minyak goreng bekas terhadap koefisien gesek serta menentukan konsentrasi yang menghasilkan kinerja tribologis optimum.

DASAR TEORI

Limbah Minyak Goreng (WCO)

Minyak goreng bekas atau *waste cooking oil* (WCO) adalah minyak yang sudah digunakan berulang kali untuk menggoreng makanan sehingga kualitasnya menurun. Kondisi tersebut membuat minyak jelantah tidak layak konsumsi, tetapi masih dapat dimanfaatkan kembali bila diolah dengan baik [9]. Perubahan sifat minyak jelantah terjadi karena adanya proses degradasi kimia saat dipanaskan berulang kali. Tiga mekanisme utama degradasi adalah oksidasi (reaksi dengan oksigen yang menghasilkan senyawa peroksida), hidrolisis (meningkatkan kadar asam lemak bebas atau *free fatty acid*/FFA), dan polimerisasi (pembentukan molekul berat yang membuat minyak lebih kental). Proses ini menyebabkan kualitas minyak turun drastis, terutama dari sisi kestabilan visual, sehingga harus dilakukan pengolahan sebelum digunakan kembali [13].

Sebelum dipakai sebagai bahan baku pelumas, minyak jelantah perlu melalui proses pemaparan awal (prapemurnian) agar kualitasnya lebih baik. Tahapan ini biasanya meliputi penyaringan untuk menghilangkan sisa makanan, pemisahan air dan kotoran melalui pengendapan, penguapan air dengan pemanasan ringan, dan penurunan kadar FFA dengan netralisasi atau adsorpsi menggunakan karbon aktif. Beberapa penelitian juga menggunakan bahan tambahan seperti bentonit atau alumina untuk menyerap warna dan bau yang tidak diinginkan [3].

Tribologi Pelumas

Tribologi adalah ilmu yang membahas tentang gesekan, keausan, dan pelumasan**.** Dalam tribologi, terdapat tiga kondisi utama pelumasan atau rezim pelumasan. Pertama, *boundary lubrication*, yaitu kondisi di mana lapisan pelumas sangat tipis sehingga permukaan logam masih bersentuhan langsung. Kedua, *mixed lubrication*, yaitu kondisi peralihan di mana sebagian permukaan terpisah oleh lapisan pelumas, sementara sebagian lainnya masih bersentuhan. Ketiga, *hydrodynamic lubrication*, yaitu kondisi ideal di mana permukaan logam sepenuhnya terpisahkan oleh film pelumas sehingga gesekan menjadi sangat rendah [14].

Kinerja pelumas dapat dievaluasi menggunakan beberapa parameter penting. Salah satunya adalah koefisien gesek (μ), yaitu nilai yang menunjukkan besar kecilnya gaya gesek yang terjadi pada permukaan. Semakin rendah nilai μ, semakin baik kemampuan pelumas dalam mengurangi gesekan. Parameter lainnya adalah laju keausan, yaitu seberapa cepat material hilang dari permukaan yang bergesekan [6].

Reologi Gemuk

Kinerja reologi gemuk dapat ditingkatkan dengan penambahan aditif. Aditif berfungsi menjaga kestabilan struktur gemuk dan membantu mempertahankan konsistensi meskipun digunakan pada suhu tinggi atau beban besar. Misalnya, penambahan nanopartikel *graphene* terbukti mampu membuat gemuk lebih stabil secara mekanis sekaligus lebih mudah dialirkan melalui sistem pelumasan [7]. Selain itu, aditif juga berpengaruh pada pompalitas, yaitu kemampuan gemuk untuk dipompa dalam sistem pelumasan. Gemuk yang memiliki pompalitas baik dapat dialirkan dengan mudah ke titik-titik pelumasan, sehingga distribusinya merata. Dengan bantuan aditif seperti *graphene*, pompalitas gemuk berbasis minyak jelantah bisa ditingkatkan sehingga lebih layak digunakan untuk kebutuhan industri [2], [13].

***Graphene* sebagai Aditif Pelumas**

METODE

Alat dan Bahan

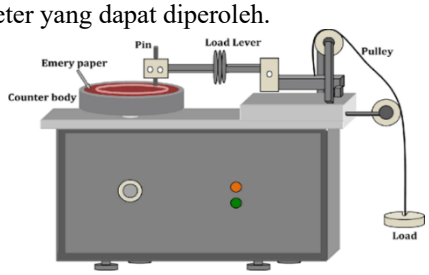
Penelitian diawali dengan persiapan alat dan bahan yang digunakan dalam proses pembuatan serta pengujian gemuk berbasis limbah minyak goreng. Peralatan yang digunakan meliputi pengaduk mekanik, timbangan analitik, oven, alat uji tribologi, dan peralatan pengamatan visual. Bahan yang digunakan terdiri atas limbah minyak goreng sebagai *base oil, fumed silica* sebagai *thickener,* serta serbuk *graphene* sebagai aditif. Limbah minyak goreng difiltrasi terlebihdahulu sebelum digunakan, sedangkan *fumed silica* diayak menggunakan mesh berukuran 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang lebih seragam. Graphene kemudian ditambahkan dengan variasi konsentrasi sebesar 0, 5, 10, dan 15 gram dengan penamaan Sampel 1, 2, 3, dan 4. Variasi tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahannya terhadap sifat tribologi dan stabilitas visual gemuk berbasis limbah minyak goreng.

Metode Pengadukan

Empat formulasi gemuk disiapkan dengan masing-masing tiga kali pengulangan. Sampel 1 terdiri atas 470 g minyak jelantah dan 30 g HDK, tanpa ada penambahan *graphene,* sampel 2 terdiri atas 450 g minyak jelantah, 45 g HDK, dan 5 g *graphene*, sampel 3 terdiri atas 440 g minyak jelantah, 50 g HDK, dan 10 g *graphene*, sedangkan sampel 3 terdiri atas 430 g minyak jelantah, 55 g HDK, dan 15 g *graphene*. Proses pengadukan dilakukan dalam tiga tahap. Tahap pertama dilakukan pada 350 rpm selama 15 menit untuk mencampurkan minyak jelantah dan HDK hingga terbentuk campuran awal yang homogen. Tahap kedua dilakukan pada 1250 rpm selama 60 menit untuk meningkatkan homogenitas dan mendispersikan HDK serta *graphene* secara merata. Tahap terakhir dilakukan pada 450 rpm selama 15 menit untuk menstabilkan campuran dan mengurangi kemungkinan terjadinya aglomerasi partikel. Dengan demikian, total waktu pengadukan setiap sampel adalah 90 menit. Setelah proses pengadukan, sampel diperiksa secara visual untuk memastikan homogenitas, tekstur, dan kestabilan awal. Sampel yang masih menunjukkan aglomerasi *graphene* atau kondisi yang belum homogen dilakukan pengadukan ulang, sedangkan sampel yang telah homogen digunakan untuk pengujian selanjutnya.

Pengujian Tribologi

Untuk mengetahui kinerja pelumas dalam mengurangi gesekan, dilakukan pengujian tribologi menggunakan metode *Pin-on-Disk*. Metode ini digunakan untuk mengevaluasi perilaku gesekan antara dua permukaan yang berkontak selama proses pengujian, dengan koefisien gesek sebagai salah satu parameter yang dapat diperoleh.



Gambar 1. Alat Uji Tribologi

Pada metode ini, sebuah pin (biasanya berbentuk bola baja kecil) ditekan ke permukaan *disk* (cakram logam) yang berputar. Pelumas yang diuji ditempatkan di antara *pin* dan *disk*. Selama pengujian berlangsung, alat akan mencatat koefisien gesek (μ) dan perubahan pada permukaan logam, sehingga dapat diketahui kemampuan pelumas dalam mengurangi gesekan dan melindungi permukaan [15].

Pengujian dilakukan dengan mengacu pada prosedur *Pin-on-Disk* ASTM G99. Namun, parameter pengujian yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan kondisi dan konfigurasi alat yang digunakan, sehingga nilai beban, kecepatan, jarak tempuh atau durasi pengujian, suhu, serta material pin dan disk perlu dicantumkan secara spesifik. ASTM G99 juga menegaskan bahwa apabila parameter pengujian berbeda dari parameter standar, kondisi pengujian yang digunakan harus dinyatakan dengan jelas. Hasil penelitian dapat dijadikan acuan untuk mengembangkan formulasi pelumas baru, termasuk pelumas berbasis minyak goreng bekas dengan penambahan *graphene* [13].

HASIL DAN PEMBAHASAN

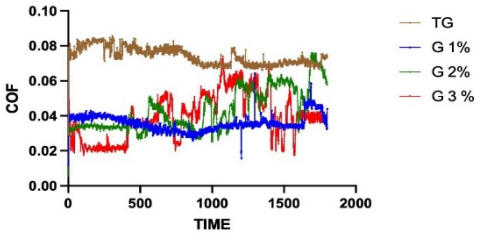
Pengujian koefisien gesek dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *graphene* terhadap sifat tribologi gemuk berbasis minyak jelantah. Nilai koefisien gesek yang lebih rendah menunjukkan berkurangnya hambatan gesek pada permukaan kontak [16]. *Graphene* berpotensi digunakan sebagai aditif pelumas karena struktur berlapisnya memungkinkan mekanisme *interlayer sliding* yang dapat menurunkan gaya geser pada daerah kontak [17].

TABEL I
Hasil Uji Data Koefesien Gesek

No Sampel	Pengulangan	Koefisien Gesek (μ)	Rata- Rata (μ)
1	1	0,0802	0,0738
	2	0,0713	
	3	0,0699	
2	1	0,0585	0,0347
	2	0,0355	
	3	0,0101	
3	1	0,0332	0,0443
	2	0,0492	
	3	0,0505	
4	1	0,0381	0,0400
	2	0,0185	
	3	0,0635	

Hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 1, rata-rata koefisien gesek Sampel 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut adalah 0,0738; 0,0347; 0,0443; dan 0,0400. Penambahan *graphene* pada Sampel 2 menurunkan koefisien gesek sebesar 52,98% dibandingkan Sampel 1. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa *graphene* dapat meningkatkan kemampuan pelumasan gemuk melalui pembentukan lapisan pelindung pada permukaan kontak [8]. Mekanisme tersebut juga dilaporkan pada penelitian *graphene-grease* yang menunjukkan penurunan koefisien gesek akibat pembentukan deposition film pada daerah kontak [18]. Namun, peningkatan jumlah *graphene* tidak menghasilkan penurunan koefisien gesek secara linier. Nilai rata-rata meningkat menjadi 0,0443 pada Sampel 3 dan sedikit menurun menjadi 0,0400 pada Sampel 4. Kondisi ini menunjukkan bahwa efektivitas *graphene* sebagai aditif tribologi dipengaruhi oleh konsentrasi dan kemampuan dispersinya di dalam pelumas [19]. Konsentrasi *graphene* yang lebih tinggi dapat meningkatkan kecenderungan aglomerasi sehingga distribusi partikel pada daerah kontak menjadi kurang homogen. Aglomerasi tersebut dapat menghambat pembentukan lapisan pelindung yang efektif dan menyebabkan performa pengurangan gesekan menurun.

Variasi antar pengulangan juga ditemukan pada beberapa sampel, terutama Sampel 2 dengan nilai 0,0585; 0,0355; dan 0,0101 serta Sampel 4 dengan nilai 0,0381; 0,0185; dan 0,0635. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh homogenitas sampel, kondisi permukaan kontak, distribusi pelumas, dan parameter pengujian tribologi [18]. Oleh karena itu, nilai rata-rata digunakan untuk menggambarkan kecenderungan performa masing-masing sampel, sedangkan variasi pengulangan perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Berdasarkan nilai rata-rata, Sampel 2 menghasilkan koefisien gesek terendah sebesar 0,0347. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi pengujian penelitian ini, komposisi Sampel 2 memberikan performa pengurangan gesekan paling rendah dibandingkan sampel lainnya. Namun, Sampel 2 tidak langsung dinyatakan sebagai kondisi optimum karena variasi antar pengulangannya masih cukup besar. Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa penambahan *graphene* dapat menurunkan koefisien gesek, tetapi peningkatan jumlah *graphene* tidak selalu menghasilkan peningkatan performa tribologi karena dipengaruhi oleh dispersi dan kemungkinan aglomerasi partikel.



Gambar 2. Grafik COF terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 2, seluruh sampel menunjukkan fluktuasi nilai koefisien gesek pada tahap awal pengujian yang berkaitan dengan proses *running-in*, yaitu tahap penyesuaian permukaan kontak sebelum kondisi gesekan menjadi lebih stabil. Hasil ini sejalan dengan penelitian Lv *et al.* yang menunjukkan bahwa pelumas berbasis *graphene* dapat mengalami perubahan COF pada tahap *running-in* sebelum terbentuk kondisi pelumasan yang lebih stabil [20]. Sampel 1 menunjukkan nilai COF paling tinggi pada kisaran 0,07–0,08, sedangkan Sampel 2 menunjukkan nilai COF yang lebih rendah dan relatif stabil pada kisaran 0,03–0,04, sementara Sampel 3 dan Sampel 4 mengalami fluktuasi yang lebih besar hingga sekitar 0,06–0,07. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan graphene dapat menurunkan COF melalui pembentukan lapisan pelindung (*tribofilm*) dan mekanisme *interlayer sliding* pada struktur berlapis *graphene* [8]. Berdasarkan pola grafik, Sampel 2 menunjukkan nilai COF yang rendah dan relatif stabil dibandingkan sampel lainnya, sehingga pada kondisi pengujian ini penambahan *graphene* pada Sampel 2 memberikan karakteristik gesekan yang paling rendah.

REFERENSI

[1] S. Hanjarvelianti and D. Kurniasih, "Pemanfaatan Minyak Jelantah dan Sosialisasi Pembuatan Sabun Dari Minyak Jelantah Pada Masyarakat Desa Sungai Limau Kecamatan Sungai Kunyit-Mempawah," *J. Bul. Al-Ribaath*, vol. 15, no. 2, p. 26, Jan. 2020, doi: 10.29406/br.v17i1.1878.

[2] F. Azahra, P. R. Indirani, A. N. Kholis, D. Nurcahyanti, and N. Nurkartikasari, "Pemanfaatan Limbah Minyak Jelantah Menjadi Produk Lilin Aroma Terapi di Desa Pereng Karanganyar Sebagai Konsep Rintisan Desa Kreatif," *JMM - J. Masy. Merdeka*, vol. 7, no. 1, p. 01, 2024, doi: 10.51213/jmm.v7i1.153.

[3] E. Megawati, A. Ardiansyah, A. Mukminin, D. Ariyani, Y. Yuniarti, and M. Lutfi, "Analisis Sifat Fisika dan Nilai Keekonomian Minyak Goreng Bekas Menjadi Biodiesel Dengan Metode Transesterifikasi," *Al-Kim.*, vol. 9, no.

1, pp. 48–54, 2022, doi: 10.15575/ak.v9i1.17962.

[4] R. Uppar, P. Dinesha, and S. Kumar, "A Critical Review on Vegetable Oil-Based Bio-Lubricants: Preparation, Characterization, and Challenges," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 25, no. 9, pp. 9011–9046, Sep. 2023, doi: 10.1007/s10668-022-02669-w.

[5] D. D. Yanti *et al.*, "Pelatihan Pembuatan Sabun dari Minyak Goreng Bekas di Desa Padang Rejo, Pringsewu," *J. Pengabdi. Masy. Bangsa*, vol. 1, no. 6, pp. 878–886, Aug. 2023, doi: 10.59837/jpmba.v1i6.272.

[6] Z. Husin, S. Ali, and P. Simbolon, "Pengujian Viskositas Blending Minyak Nabati Dengan Minyak Mineral SAE 15W/50," vol. 2, no. 1, 2023.

[7] N. Aeni, D. N. Sari, T. Suprianti, H. Bahar, and A. R. Ansyarif, "Menumbuhkan Kreatifitas dan Kewirausahaan Siswa Melalui Pelatihan Pembuatan Llilin Aromaterapi dari Minyak Jelantah," *RESWARA J. Pengabdi. Kpd. Masy.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2024, doi: 10.46576/rjpkm.v5i1.3326.

[8] A. R. Marlinda *et al.*, "Graphene as a Lubricant Additive for Reducing Friction and Wear in Its Liquid-Based Form," *Lubricants*, vol. 11, no. 1, p. 29, Jan. 2023, doi: 10.3390/lubricants11010029.

[9] D. Franzosi, J. C. F. De Queiroz, E. Tomanik, W. Christinelli, F. J. Profito, and R. M. Souza, "Exploring the potential of graphene nanoplatelets as a lubricant additive: Topography evolution and performance under boundary lubrication conditions," *Tribol. Int.*, vol. 192, p. 109282, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109282.

[10] M. Hamzah Alhusaini, S. Yuliati, and M. Yerizam, "Pengaruh Variasi Tekanan Pada Pemurnian Minyak Goreng Bekas Menggunakan Membran Polisulfon Ultrafiltrasi," *J. Pendidik. Dan Teknol. Indones.*, vol. 2, no. 9, pp. 417–424, 2022, doi: 10.52436/1.jpti.223.

[11] M. M., eka sri Yusmartini, and N. Selviana, "Pengaruh berat karbon aktif dari ampas tebu dan lama perendaman terhadap kualitas minyak goreng bekas," *J. Inov.*, vol. 5, p. 12, Aug. 2022, doi: 10.37338/ji.v5i1.208.

[12] M. Mardwita, E. Sri Yusmartini, and N. Selviana, "Pengaruh berat karbon aktif dari ampas tebu dan lama perendaman terhadap kualitas minyak goreng bekas," *J. Inov.*, vol. 5, no. 1, p. 12, Aug. 2022, doi: 10.37338/ji.v5i1.208.

[13] A. Musliman, H. Hasbullah, F. Damayanti, A. Suryana, and M. Lapasau, "Penggerak Masyarakat Peduli Lingkungan melalui Pembuatan Sabun Cair dengan Memanfaatkan Minyak Jelantah," *J. PkM Pengabdi. Kpd. Masy.*, vol. 7, no. 2, p. 255, 2024, doi: 10.30998/jurnalpkm.v7i2.22266.

[14] H. Khairiah, F. Fatmayati, and A. Dhora, "Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit untuk Pemurnian Minyak Goreng Bekas," *J. Tek. Ind. Terintegrasi*, vol. 7, no. 1, pp. 460–469, 2024, doi: 10.31004/jutin.v7i1.24720.

[15] N. Aeni, D. N. Sari, T. Suprianti, H. Bahar, and A. R. Ansyarif, "Menumbuhkan Kreatifitas Dan Kewirausahaan Siswa Melalui Pelatihan Pembuatan Lilin Aromaterapi Dari Minyak Jelantah," *RESWARA J. Pengabdi. Kpd. Masy.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2024, doi: 10.46576/rjpkm.v5i1.3326.

[16] B. Gupta, N. Kumar, K. Panda, S. Dash, and A. K. Tyagi, "Energy efficient reduced graphene oxide additives: Mechanism of effective lubrication and antiwear properties," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 18372, Jan. 2016, doi: 10.1038/srep18372.

[17] J. Zhao, T. Gao, Y. Li, Y. He, and Y. Shi, "Two-dimensional (2D) graphene nanosheets as advanced lubricant additives: A critical review and prospect," *Mater. Today Commun.*, vol. 29, p. 102755, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102755.

[18] J. Wang, X. Guo, Y. He, M. Jiang, and K. Gu, "Tribological characteristics of graphene as grease additive under different contact forms," *Tribol. Int.*, vol. 127, pp. 457–469, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.06.026.

[19] J. Sun and S. Du, "Application of graphene derivatives and their nanocomposites in tribology and lubrication: a review," *RSC Adv.*, vol. 9, no. 69, pp. 40642–40661, 2019, doi: 10.1039/C9RA05679C.

[20] F. Lv, C. Jiao, and J. Xu, "Theoretical and experimental investigation on effective length-to-diameter ratio of misaligned water-lubricated bearings," *Tribol. Int.*, vol. 187, p. 108712, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108712.