

Review Pengaruh Penambahan Nanopartikel Pada Pelumas Terhadap Oli Mesin

Dimas Maha Saputra, Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA

Alamat: Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp. Rambutan, Ps. Rebo, Jakarta Timur. Telp.(021)840094 Fax.
(021)87782739

E-mail: mahasaputradimas12@gmail.com

Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Peningkatan efisiensi dan kestabilan mesin merupakan komponen kunci teknologi mesin, terutama dalam aspek pelumasan yang krusial untuk mengurangi gesekan dan keausan komponen. Pelumas konvensional seringkali mengalami kesulitan dalam menjaga stabilitas termal dan sifat tribologi dalam kondisi operasi yang tinggi. Oleh karena itu, penggunaan nanopartikel dalam pelumas sedang dikembangkan sebagai inovasi untuk meningkatkan kinerja mesin. Review ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh berbagai jenis dan konsentrasi nanopartikel terhadap karakteristik fisik dan kinerja pelumas, seperti viskositas, konduktivitas termal, dan kemampuan untuk mengurangi gesekan. Metode ini digunakan adalah eksperimen di mana nanopartikel logam oksida dicampurkan ke dalam oli dasar menggunakan metode ultrasonik, dilanjutkan dengan menggunakan viskometer dan tribometer. Temuan review ini menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel dapat meningkatkan stabilitas termal secara signifikan dan mengurangi koefisien variasi gesek dibandingkan dengan oli tanpa aditif nanopartikel. Hal ini menunjukkan bahwa pelumas berbasis nanopartikel berpotensi meningkatkan efisiensi mesin dan komponen.

Kata Kunci: Nanopartikel, pelumas, oli mesin, viskositas, tribologi.

Abstract

Improving engine efficiency and stability is a key component of engine technology, especially in the crucial aspect of lubrication to reduce friction and component wear. Conventional lubricants often have difficulty in maintaining thermal stability and tribological properties under high operating conditions. Therefore, the use of nanoparticles in lubricants is being developed as an innovation to improve engine performance. This review aims to analyze the effect of various types and concentrations of nanoparticles on the physical characteristics and performance of lubricants, such as viscosity, thermal conductivity, and the ability to reduce friction. The method used is an experiment in which metal oxide nanoparticles are mixed into the base oil using an ultrasonic method, followed by using a viscometer and tribometer. The findings of this review show that the addition of nanoparticles can significantly improve thermal stability and reduce the coefficient of variation of friction compared to oil without nanoparticle additives. This indicates that nanoparticle-based lubricants have the potential to improve engine and component efficiency.

Keywords: Pelumas, oli mesin, viskositas, tribologi, and nanoparticles.

1. PENDAHULUAN

Teknologi mesin modern meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan daya tahan sistem pelumasan yang beroperasi dalam kondisi ekstrem, termasuk suhu tinggi, tekanan berat, dan kecepatan geser tinggi antar komponen. Pelumas konvensional berbasis mineral seringkali gagal menjaga stabilitas viskositas dan kinerja tribologi dalam kondisi tersebut, yang menyebabkan peningkatan gesekan, keausan, dan penurunan efisiensi mesin. Oleh karena itu, inovasi

pelumas dengan nanopartikel telah menjadi salah satu topik terpenting dalam penelitian dan tribologi mesin saat ini. Tujuan penggunaan nanopartikel dalam pelumas (nanolubricant) adalah untuk memaksimalkan fungsi pelumasan, mengurangi kehilangan energi akibat gesekan, dan meningkatkan komponen mekanis mesin [1].

Pelumas konvensional berbasis mineral sering kali gagal menjaga stabilitas viskositas dan kinerja tribologi dalam kondisi tersebut. Interaksi efektif dengan logam permukaan. Nanopartikel ini dapat

membentuk lapisan pelindung (tribo-film) pada permukaan logam yang terkelupas, sehingga mengurangi abrasi dan meningkatkan ketahanan aus. Selain itu, nanopartikel memiliki kemampuan untuk berfungsi sebagai konduktor panas yang meningkatkan konduktivitas termal, memungkinkan penghilangan panas yang lebih efisien dari area gesekan. Dengan demikian, nanopartikel tidak hanya berfungsi sebagai media pelumas tetapi juga sebagai peningkatan kinerja mesin dan pencegahan degradasi oli termal [2]. Tujuan penggunaan nanopartikel dalam pelumas (nanolubricant) adalah untuk memaksimalkan fungsi pelumas dapat dibagi menjadi beberapa kategori, termasuk oksida logam (seperti TiO_2 , Al_2O_3 , CuO , SiO_2), non-oksida (BN, SiC), berbasis karbon (grafena, CNT, grafit), logam murni (Ag, Cu, Ni), dan hibrida (MoS_2 -BN, Al_2O_3 /grafena). Masing-masing memiliki mekanisme kerja yang berbeda tetapi memiliki tujuan yang sama, yaitu untuk meningkatkan karakteristik tribologi dan stabilitas pelumas dalam berbagai kondisi operasi. Selain itu, tren baru dalam pengembangan pelumas bio-nanopartikel juga telah dipelajari secara ekstensif karena kemampuannya untuk meningkatkan kinerja sekaligus meningkatkan keberlanjutan [3].

Nanopartikel ini dapat membentuk lapisan pelindung (tribo-film) pada permukaan logam, terutama di bidang stabilitas dispersi nanopartikel dalam minyak, potensi penggumpalan partikel, dan dampak lingkungan dari proses sintesis nanopartikel. Oleh karena itu, penelitian komprehensif menggunakan tinjauan pustaka sistematis (SLR) diperlukan untuk mengintegrasikan berbagai topik empiris dan menentukan karakteristik ideal nanopartikel sebagai aditif pelumas. Hasil studi saat ini kurang menggembirakan. Menurut Birleanu dkk. (2022), penambahan TiO_2 ke dalam oli mesin dapat mengurangi koefisien gesekan hingga 20% dan meningkatkan umur pelumas sekitar 30% dibandingkan dengan pelumas konvensional. Menurut studi Nagarajan dkk. (2023), kombinasi MoS_2 -hBN sebagai aditif nanopartikel menghasilkan pengurangan gesekan sebesar 15% dan peningkatan stabilitas termal yang signifikan pada oli diesel. Di sisi lain, Kuang dkk. (2024) menemukan bahwa penambahan nanopartikel grafena ke dalam oli dapat mengurangi emisi CO_2 sebesar 4–5% dan meningkatkan efisiensi pembakaran sebesar 3% [4].

Namun Investigasi Pengaruh Nanopartikel TiO_2 terhadap Performa Mesin dan Karakteristik Emisi pada Mesin Diesel, Bahan bakar fosil sedang

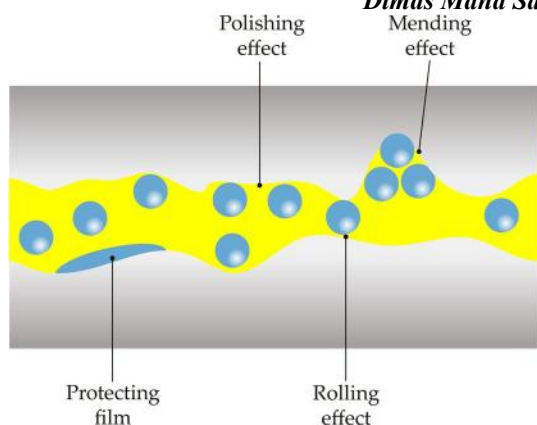
mengalami periode di mana kepentingannya meningkat di seluruh dunia dan pada saat yang sama, bahan bakar fosil banyak dibahas. Butanol merupakan jenis alkohol primer yang lebih baik daripada etanol dan metanol sebagai alternatif bahan bakar untuk pembakaran internal. Hal ini dikarenakan kandungan butanol lebih tinggi dari pada solar [5].

Kesimpulannya, penambahan alkohol ke biodiesel mengurangi viskositas bahan bakar. Berdasarkan hasil survei sebelumnya, alkohol dianggap sebagai aditif teroksigenasi yang meningkatkan efisiensi mesin. Bersamaan dengan itu, penambahan nanopartikel ke dalam proses alkohol-biodiesel merupakan metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja mesin secara signifikan [6].

Berdasarkan tinjauan pustaka, n-butanol dan biodiesel digunakan dalam mesin diesel untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi emisi, sementara penggunaan Partikel Nano TiO_2 dilakukan secara metodis. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas nano TiO_2 sebagai aditif dan untuk mempromosikan solar dan n-butanol. Namun, penulis mencatat bahwa penelitian sebelumnya tentang penggunaan aditif nano TiO_2 dalam solar-n-butanol-Bombax ceiba metil ester sebagai bahan bakar yang dimodifikasi belum dilakukan [7].

2. MEKANISME TRIBOLOGI DAN TERMAL NANOPARTIKEL DALAM MESIN

Pelumas berperan penting dalam sistem kerja mesin karena berfungsi mengurangi gesekan, mencegah keausan, dan menjaga stabilitas termal pada komponen yang tidak berfungsi. Namun, pelumas konvensional berbasis minyak mineral memiliki kemampuan untuk mencegah degradasi termal dan oksidatif dalam kondisi ekstrem. Untuk mengatasi masalah ini, pendekatan baru diciptakan dengan menambahkan nanopartikel ke dalam oli dasar untuk menghasilkan nanopelumas dengan konduktivitas tribologi dan termal yang lebih baik. Secara teoritis, sifat fisik dan kimianya, seperti viskositas, tegangan permukaan, dan kemampuan membentuk lapisan pelindung antar permukaan



Gambar 1 Mekanisme pelumasan nanopartikel

logam, berpengaruh signifikan terhadap kinerja pelumas. Karena permukaannya yang besar dan reaktivitasnya yang tinggi, nanopartikel dengan ukuran berkisar antara 1 hingga 100 nanometer dapat mengubah struktur mikro pelumas. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengklarifikasi mekanisme kerja nanopartikel dalam pembentukan lapisan pelindung, mengurangi gesekan antar permukaan, dan meningkatkan efisiensi pelumasan dalam proses manufaktur di berbagai sistem industri.

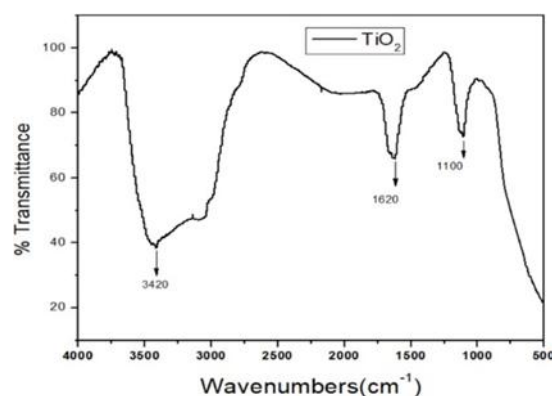
Selain itu, nanopartikel TiO_2 memiliki karakteristik katalitik, fotokatalitik, dan termal tinggi yang sangat berguna dalam proses produksi pembakaran. Dengan ukuran partikel yang sangat kecil (20–100 nm) dan permukaan spesifik yang besar, TiO_2 dapat meningkatkan reaktivitas molekul oksigen dalam lingkungan pembakaran. Hal ini memperlambat proses oksidasi bahan bakar, menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, energi panas yang lebih tinggi, dan pembentukan hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) yang lebih sedikit [8].

Efisiensi termal rem (BTE) meningkat dan konsumsi bahan bakar spesifik rem (BSFC) menurun ketika TiO_2 ditambahkan pada konsentrasi rendah (biasanya 25–75 ppm) karena kinerja mesin. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kualitas atomisasi pembakaran dan pembakaran yang lebih cepat dan stabil. Bersamaan dengan itu, CO, HC, dan opasitas asap menurun sementara emisi NO_x sedikit meningkat karena peningkatan suhu puncak. Namun, kadar NO_x masih dapat dikendalikan dengan menggunakan biodiesel dan n-butanol [9].

Penelitian tentang pengaruh penambahan nanopartikel pada mesin pelumas atau nanopartikel TiO_2 sebagai aditif dalam campuran

biodiesel terhadap kinerja dan emisi diesel menunjukkan bahwa penggunaan nanopartikel berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi dan kinerja sistem mesin. Dalam pelumas, penggunaan nanopartikel seperti TiO_2 , AlO_3 , dan grafena dapat menciptakan lapisan pelindung (*tribo-film*) yang mengurangi gesekan, meningkatkan konduktivitas termal, dan meningkatkan umur mesin dan pelumas. Hal ini berdampak pada penurunan keausan secara keseluruhan dan peningkatan efisiensi energi [10].

Sementara itu, dalam sistem bahan bakar, nanopartikel TiO_2 berfungsi sebagai katalis aktif yang mempercepat proses oksidasi bahan bakar biodiesel-n-butanol, sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna dan efisien. Hasilnya, konsumsi bahan bakar spesifik menurun, efisiensi termal meningkat, serta emisi berbahaya seperti CO dan HC berkurang secara signifikan [11].



Gambar 2 Diagram skema unit produksi campuran biodiesel BCME- TiO_2 [12].



Gambar 3 Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FT-IR) spektroskopi nanopartikel TiO_2 [13]

Setiap kali bekerja, mesin akan mengalami pengapian. Jenis akurasi ini jarang terjadi pada mesin; Faktanya, pengapian pada kendaraan mesin merupakan salah satu penyebab utama pelumasan. Mayoritas komponen mesin kendaraan yang berasal dari logam akan membentuk panas segera setelah digunakan. Sistem pelumasan diperlukan untuk mengurangi dampak pendingin tersebut di atas (Suzuki, 2021). Pelumas berfungsi sebagai pendingin,

perapat, pembersih, dan anti karat selain sebagai peredam (Auto2000, 2020).[14].

Dasar pelumas adalah proses pembuatan minyak bumi, dan proses yang dipilih merupakan proses khusus yang mempengaruhi sifat yang dipahami. Selain itu, bahan kimia digunakan untuk menyempurnakan dan memperbaiki sifat yang ada atau memberikan sifat yang dipahami dalam pelumas dasar dasar yang kurang baik (Mulyono, 2019). Bahan dasar (*base oil*) pelumas pelumas sekarang berasal dari bumi minyak yang sering disebut pelumas mineral, dan kimia sintesa yang disebut pelumas sintetis. Namun minyak mineral dan minyak sintetis mau tidak mau menimbulkan permasalahan terhadap lingkungan dan ketersediaan minyak bumi di alam semakin menyebabkan manusia mulai menggunakan bahan-bahan yang ramah lingkungan dan mudah terurai secara alami (*biodegradable*). Akibatnya pelumas dari minyak nabati (*biopelumas*) digunakan kembali (Sanjaya, 2008). Bio pelumas berasal dari bahan dasar, seperti lemak hewan, minyak tumbuh-tumbuhan, atau ester sintetis. Selain tidak beracun dan mudah terurai secara hayati, pelumas berbasis dasar minyak tumbuhan (terbarukan) memperbarui (Kuweir, 2010). Aditif TiO₂-NP yang digunakan memberikan dampak yang signifikan terhadap perubahan karakteristik biopelumas. Beberapa permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai pembuatan biolubrikan yang menggabungkan dispersan etilen glikol dengan larutan aditif TiO₂-N [15].

3. HASIL PEMBAHASAN

Studi ini memiliki urgensi tinggi karena berkaitan erat dengan efisiensi energi dan pengembangan industri otomotif. Diperlukan pelumas yang tidak hanya mengurangi gesekan tetapi juga memiliki ketahanan terhadap oksidasi dan suhu tinggi untuk meningkatkan permintaan sistem mesin yang berkinerja tinggi dan hemat energi. Pengembangan nanopartikel menawarkan solusi inovatif untuk mencapai tujuan yang dinyatakan. Selain itu, review ini tentang pelumas berbasis nanopartikel mendukung upaya di seluruh dunia untuk mengurangi emisi karbon dan penggunaan bahan bakar. Dalam lingkungan industri, pelumas nano dapat mengurangi frekuensi penggantian oli, mengurangi biaya perawatan, dan meningkatkan umur komponen mekanis. Dengan kata lain, studi ini juga penting karena memberikan kesempatan untuk memahami mekanisme tribologi pada skala nano dan interaksi partikel dalam sistem pelumasan, yang sangat penting untuk pengembangan teknologi pelumasan canggih di masa depan [16].

Dalam lingkungan industri, pelumas nano dapat mengurangi frekuensi penggantian oli, mengurangi

biaya perawatan, dan meningkatkan umur komponen mekanis. Dengan kata lain, tinjauan ini juga penting karena memberikan kesempatan untuk memahami mekanisme tribologi pada skala nano dan interaksi partikel dalam sistem pelumasan, yang krusial bagi pengembangan teknologi pelumasan canggih di masa depan. review ini menunjukkan kemajuan pada pengaruh penambahan Nanopartikel pada pelumas terhadap oli mesin yang sering kali kehilangan pada suhu dan tekanan tinggi menyebabkan peningkatan, keausan, serta penurunan efisiensi mesin. Penambahan nanopartikel logam oksida seperti titanium dioksida (TiO₂), aluminium oksida (Al₂O₃), dan tembaga oksida (CuO) terbukti mampu meningkatkan sifat tribologi pelumas [17].

Nanopartikel berdimensi nano mampu menciptakan lapisan pelindung (*tribo-film*) yang mengurangi gesekan antar komponen. Selain itu, peningkatan konduktivitas termal dan viskositas pelumas membuat oli lebih stabil terhadap fluktuasi suhu tinggi. Hasil studi eksperimental menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel dalam konsentrasi ideal (antara 0,05 dan 0,075 persen) dapat mengurangi koefisien gesekan hingga 80% dan keausan hingga 90% dibandingkan dengan oli konvensional. Pelumas berbasis nanopartikel (*nanolubricant*) memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi mesin, meningkatkan integritas komponen, serta mengurangi emisi karbon dan konsumsi bahan bakar. Inovasi ini merupakan langkah penting menuju sistem pelumasan yang lebih efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan guna memajukan teknologi mesin di masa depan [18].

Pencampuran nanopartikel juga membantu memastikan homogenitas pelumas, mencegah penggumpalan, dan menstabilkan dispersi partikel dalam oli. Dengan peningkatan kinerja ini, pelumas berbasis nanopartikel (*nanolubricant*) terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi, meningkatkan umur mesin, serta mengurangi emisi karbon dan konsumsi bahan bakar. penambahan nanopartikel ke dalam oli mesin adalah pendekatan yang sangat menjanjikan untuk meningkatkan kinerja pelumas dan mesin — mulai dari pengurangan gesekan dan keausan, peningkatan pembuangan panas, hingga potensi penghematan bahan bakar dan emisi yang lebih rendah. Namun, untuk aplikasi luas di industri otomotif atau mesin berat, masih diperlukan penelitian lanjutan yang mencakup stabilitas jangka panjang, dampak lingkungan, dan skala aplikasi praktik. Dengan demikian, integrasi nanopartikel dalam pelumas bisa menjadi bagian penting dari teknologi pelumasan generasi berikutnya jika tantangan-tantangan tersebut dapat diatasi [19].

Meskipun banyak penelitian menunjukkan hasil positif, masih terdapat beberapa masalah yang perlu

ditangani. Salah satu tantangan utama adalah stabilitas dispersi nanopartikel dalam pelumas: partikel dapat beragregasi atau menggumpal, yang dapat mengurangi efektivitasnya atau bahkan merusak komponen mesin. Analisis kritis terhadap dispersi nanopartikel dalam pelumas menunjukkan bahwa ukuran, bentuk, komposisi, dan karakteristik permukaannya secara signifikan memengaruhi stabilitas dan kinerja aditifnya. Selain meningkatkan kinerja tribologi, nanopartikel juga berkontribusi pada peningkatan konduktivitas termal pelumas. Dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi, pelumas dapat dengan cepat menghilangkan panas dari area gesekan, menjaga lingkungan kerja yang stabil, dan mencegah degradasi oli akibat panas berlebih. Efek ini juga membantu menstabilkan indeks viskositas pelumas dalam berbagai kondisi operasional sehingga pelumas dapat mengurangi ketebalan lapisan pelumas dalam waktu yang lebih lama [20].

Dari sudut pandang aplikasi, keberlanjutan dan efisiensi energi dipengaruhi secara positif oleh pelumas berbasis nanopartikel atau nanopelumas. Karena gaya gesek berkurang memungkinkan konsumsi bahan bakar dan emisi gas, mesin yang menggunakan nanopelumas terbukti membutuhkan lebih sedikit daya untuk beroperasi. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi pelumas berbasis nanopartikel menawarkan keuntungan lingkungan yang substansial selain meningkatkan kinerja teknis[21].

pelumas berbasis nanopartikel atau nanopelumas memberikan dampak positif terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan. Mesin yang menggunakan nanopelumas terbukti membutuhkan lebih sedikit daya untuk beroperasi karena gaya gesek berkurang, sehingga memungkinkan konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi pelumas berbasis nanopartikel tidak hanya meningkatkan kinerja teknis tetapi juga memiliki manfaat lingkungan yang signifikan[22].

Secara keseluruhan, berdasarkan hasil percobaan Pustaka, dapat disimpulkan bahwa penambahan nanopartikel ke dalam pelumas memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan kinerja mesin. Inovasi ini dapat mengatasi keterbatasan pelumas konvensional, memperbaiki keseluruhan komponen mekanis, serta meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan. Berdasarkan temuan yang konsisten dari beberapa studi, nanopelumas diharapkan dapat menjadi solusi yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk manufaktur kontemporer dan industri otomotif [23].

Dari perspektif lingkungan dan keberlanjutan, penggunaan nanopelumas juga memberikan manfaat ekologis yang signifikan. Emisi gas rumah kaca,

seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan nitrogen oksida (NOx), dapat dikurangi dengan mengurangi konsumsi bahan bakar. Pengurangan emisi ini berkontribusi signifikan terhadap penurunan polusi udara dan memajukan tujuan global untuk teknologi ramah lingkungan. Selain itu, frekuensi penggantian pelumas[24].

Solusi utama yang diberikan oleh penelitian sebelumnya adalah penggunaan nanopartikel oksida logam sebagai aditif serbaguna. Penambahan nanopartikel pada oli dasar dapat menghasilkan pembentukan lapisan pelindung (tribo-film) pada permukaan logam, yang berfungsi untuk mengurangi gesekan dan mencegah abrasi. Selain itu, teknik pencampuran nanopartikel menggunakan teknologi ultrasonik dan surfaktan Triton X efektif dalam menjaga stabilitas dispersi nanopartikel agar tidak menggumpal. Pendekatan ini meningkatkan homogenitas pelumas dan mempersingkat waktu pengadukan oli [25].

Selain meningkatkan efisiensi pembakaran, teknologi pelumas sedang dikembangkan untuk mengurangi kelembapan lingkungan. Menurut sebuah studi yang diterbitkan dalam Jurnal Pelumas (2024a) tentang Sintesis dan Evaluasi Bio-Pelumas dari Bahan Baku Terbarukan, pelumas berbasis ester alami dan sintetis dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan dengan stabilitas termal dan oksidatif yang baik. Penggunaan bio-pelumas tidak hanya mengurangi emisi karbon, tetapi juga mengurangi potensi pencemaran akibat limbah pelumas yang dihasilkan [26].

Pertama, berdasarkan karakteristik fisik pelumas, penambahan nanopartikel dapat mengubah viskositas, konduktivitas termal, titik tuang, dan titik nyala. Sebagai contoh, sebuah studi menemukan bahwa oli mesin tipe SAE 20W50 yang mengandung CuO pada konsentrasi 0,5 persen berat mengalami peningkatan viskositas sekitar 5,7 persen dibandingkan dengan oli dasar. Secara keseluruhan, hasil review seminar menyatakan bahwa penambahan nanopartikel pada pelumas merupakan inovasi strategis dalam bidang tribologi dan teknik mesin modern. Teknologi ini diyakini akan menjadi arah utama dalam pengembangan sistem pelumasan masa depan — efisien, tahan lama, hemat energi, dan berwawasan lingkungan. Sebaliknya, review nanopartikel kami menunjukkan bahwa penambahan TiO₂ dan FeO₃ ke oli dasar 10W30 menghasilkan peningkatan konduktivitas termal hingga 4-5% pada suhu saat ini[27].

Dua nanopartikel tribologi sisi (gesekan & keausan) berkontribusi nyata. Sebagai contoh, analisis oli yang mengandung Cu, TiO₂, dan karbon-nanohorn (SWCNH) ini menunjukkan bahwa koefisien gesekan dapat menurun sekitar 17% pada

nanopartikel Cu 130 nm dibandingkan dengan oli tanpa aditif, dan laju keausan dapat menurun sekitar 50% dalam kondisi saat ini. Mekanisme tersebut antara lain efek “nano-bearing” atau “roller”, dimana partikel berskala nano, seperti bantalan mikroskopis yang memfasilitasi gesek permukaan, tribo-film pelindung antar logam permukaan, dan pengisian “celah” mikroskopis yang terjadi akibat awal keausan. Dengan meningkatkan mekanismenya, mesin akan menghasilkan panas yang lebih sedikit, kehilangan energi yang lebih sedikit, dan peningkatan jumlah komponen logam seperti piston, cincin, dan poros[28].

Penambahan nanopartikel pada oli mesin ini sangat efektif untuk meningkatkan kinerja pelumas dan mesin, dimulai dengan perbaikan dan pengurangan keausan, peningkatan panas pembuangan, dan diakhiri dengan potensi pembakaran dan pengurangan emisi. Namun demikian, masih perlu diberikan tinjauan yang menilai stabilitas jangka panjang, dampak lingkungan, dan skala penerapan praktis pada industri otomotif atau mesin berat. Dengan demikian, jika tantangan-tantangan yang dimaksud dapat dilihat, maka integrasi nanopartikel pada pelumas dapat menjadi komponen krusial dalam teknologi pembangkitan pelumasan[29].

Berdasarkan penggunaannya, penambahan nanopartikel ke oli mesin telah dibuktikan pada beberapa jenis mesin, seperti mesin industri dan mesin bermotor. Penelitian eksperimental menggunakan nanopartikel TiO₂, Al₂O₃, dan MoS₂ menunjukkan penurunan laju keausan dan koefisien gesekan yang signifikan, sehingga meningkatkan efisiensi energi mesin dan mengurangi konsumsi bahan bakar. Konsentrasi nanopartikel dalam pelumas juga harus dioptimalkan karena konsentrasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan viskositas dan residu pelumas. Konsentrasi ideal yang sering disarankan adalah antara 0,1% dan 5% nanopartikel dalam kaitannya dengan total pelumas. Tingkat penggunaan ini memberikan keseimbangan yang sangat baik antara pengurangan gesekan, keausan, dan stabilitas pelumas[30].

Nanopartikel TiO₂ diteliti menggunakan mikroskop elektron pemindaian emisi medan (FESEM). Model: FEI-Apreo LoVac digunakan untuk analisis. menampilkan citra FESEM pada berbagai pengaturan perbesaran. Citra FE-SEM nanopartikel TiO₂ pada perbesaran 100.000x ditampilkan pada Gambar 2(b). citra-citra ini menunjukkan nanofluida TiO₂ yang berbentuk bulat, berpermukaan halus, dan berkelompok, dengan ukuran partikel rata-rata 35 nm. Spektrum inframerah transformasi Fourier nanopartikel TiO₂ (FT-IR) ditampilkan pada Gambar 3. Pada spektrum 1100 cm-

1, ikatan kuat terlihat. Vibrasi O-H yang terkait dengan deformasi bidang pada 1620 cm⁻¹ ditunjukkan oleh serapan ekstensif pada 3350 cm⁻¹-3750 cm⁻¹[31].

Nanofluida TiO₂ memiliki konsentrasi oksigen yang tinggi selama pembakaran dan meningkatkan aksi katalitik. Energi permukaan nanofluida TiO₂ yang tinggi juga dihasilkan oleh rasio volume terhadap permukaannya yang besar. Hal ini mempercepat proses pembakaran. Pertama, campuran B20 dibuat menggunakan 80% solar dan 20% BCME. 20% BCME, 10% butanol, dan 70% solar sisanya digabungkan untuk menghasilkan B20Bu10 pada tahap kedua. Tahap selanjutnya melibatkan pencampuran TiO₂ dengan B20Bu10 dalam berbagai jumlah 30, 60, dan 90 ppm menggunakan ultrasonikator. Untuk menilai stabilitasnya, sampel disimpan dalam tabung reaksi dalam keadaan statis. Investigasi standar menunjukkan bahwa sampel tetap stabil selama lebih dari dua minggu. Sifat fisikokimia bahan bakar diesel, B20, B20Bu10, B20Bu10T30, B20Bu10T60, dan B20Bu10T90 ditampilkan sesuai dengan standar ASTM[32].

Karena mesin dapat beroperasi lebih efisien dengan kebutuhan energi yang lebih rendah, pengembangan teknologi nanopelumas juga mendorong pengurangan emisi karbon dan kerusakan lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan nanopartikel dalam pelumas tidak hanya memberikan manfaat teknis tetapi juga berkontribusi pada tujuan lingkungan global. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa penambahan nanopartikel ke dalam pelumas merupakan solusi potensial untuk mengatasi keterbatasan oli konvensional. Inovasi ini merupakan pendekatan strategis untuk pengembangan teknologi yang efisien, ramah lingkungan, dan tahan lama yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan otomotif modern [33].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjau pusaka yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penambahan nanopartikel pada pelumas memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja mesin, terutama dalam aspek sifat tribology, stabilitas termal, dan efisiensi energi. Pelumas konvensional ini sering kali mengalami penurunan kemampuan pelumas pada suhu tinggi dan tekanan ekstrem, sehingga menyebabkan peningkatan gesekan dan keausan antar komponen logam. Hal ini menyebabkan peningkatan gesekan antar komponen logam, persepsi keausan, dan penurunan efisiensi energi mesin. Oleh karena itu, penggunaan

nanopartikel sebagai aditif pelumas menjadikannya solusi yang inovatif, efektif, dan tahan lama. Penggunaan nanopartikel logam oksida seperti titanium dioksida (TiO_2), aluminium oksida (AlO_3), dan tembaga oksida (CuO) dapat meningkatkan sifat tribologi pelumas secara signifikan. Pada rentang konsentrasi ideal 0,05–0,075%, nanopartikel dapat mengurangi koefisien gesek hingga 80% dan keausan hingga 90% dibandingkan dengan oli tanpa nano aditif. Mekanisme utama peningkatan kinerja ini berasal dari penggunaan lapisan pelindung (tribo-film) dalam proses logam. Lapisan tersebut berfungsi sebagai penghalang yang melindungi permukaan dari abrasi, oksidasi, dan keausan, serta berfungsi sebagai media pelumas padat mikro yang mencegah kerusakan antar komponen [34].

Selain itu, nanopartikel memiliki kemampuan untuk meningkatkan konduktivitas termal pelumas, yang mempercepat penyebaran panas dari area gesekan. Hal ini mengurangi risiko degradasi termal pada oli dan menstabilkan suhu operasi mesin. Peningkatan indeks viskositas juga meningkatkan kinerja pelumas dalam berbagai kondisi operasional, sehingga lebih stabil pada suhu rendah maupun tinggi. Dengan demikian, pelumas berbasis nanopartikel (nanolubricant) terbukti dapat meningkatkan efisiensi energi, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan meningkatkan umur pakai mesin [35].

Karena mesin dapat beroperasi lebih efisien dengan kebutuhan energi yang lebih rendah, pengembangan teknologi nanopelumas juga mendorong pengurangan emisi karbon dan kerusakan lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan nanopartikel dalam pelumas tidak hanya memberikan manfaat teknis tetapi juga berkontribusi pada tujuan lingkungan global. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa penambahan nanopartikel ke dalam pelumas merupakan solusi potensial untuk mengatasi keterbatasan oli konvensional. Inovasi ini merupakan pendekatan strategis untuk pengembangan teknologi yang efisien, ramah lingkungan, dan tahan lama yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan otomotif modern [36].

Nanopartikel oksida logam seperti titanium dioksida (TiO_2), aluminium oksida (AlO_3), dan tembaga oksida (CuO) telah terbukti dalam beberapa penelitian mampu meningkatkan karakteristik tribologi pelumas secara signifikan. Dibandingkan dengan pelumas tanpa penambahan nanopartikel,

nanopartikel dapat mengurangi keausan hingga 90% dan koefisien gesekan hingga 80% pada rentang konsentrasi optimal 0,05–0,075%. Pembentukan lapisan pelindung (tribo-film) pada permukaan logam, yang berfungsi sebagai pelumas mikro-padat dan mencegah keausan, oksidasi, dan abrasi, merupakan mekanisme utama untuk peningkatan kinerja ini [37].

Meskipun hasilnya positif, masih ada beberapa masalah yang perlu diatasi, terutama stabilitas dispersi nanopartikel dalam minyak untuk mencegah penggumpalan yang dapat mengurangi efektivitas atau bahkan merusak komponen mesin. Pemanfaatan teknologi ultrasonik dan surfaktan selama proses pencampuran merupakan cara yang efektif untuk mencapai dispersi nanopartikel yang seragam [38].

Secara umum, nanolubricant, juga dikenal sebagai pelumas berbasis nanopartikel, merupakan solusi inovatif yang mendukung manufaktur kontemporer dan industri otomotif. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi mesin seperti efisiensi energi, daya komponen, dan umur pakai, tetapi juga berkontribusi pada tujuan lingkungan global dengan mengurangi emisi dan konsumsi energi. Diharapkan bahwa kemajuan lebih lanjut dalam teknologi pelumas berbasis nanopartikel akan mampu menetapkan standar baru untuk sistem pelumas yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan di masa mendatang [39].

Secara umum, nanolubricant, juga dikenal sebagai pelumas berbasis nanopartikel, merupakan solusi inovatif yang mendukung manufaktur kontemporer dan industri otomotif. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi mesin seperti efisiensi energi, daya komponen, dan umur pakai, tetapi juga berkontribusi pada tujuan lingkungan global dengan mengurangi emisi dan konsumsi energi. Diharapkan bahwa kemajuan lebih lanjut dalam teknologi pelumas berbasis nanopartikel akan mampu menetapkan standar baru untuk sistem pelumas yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan di masa mendatang [40].

KEPUSTAKAAN

- [1] F. Dassenoy, "Nanoparticles as additives for the development of high performance and environmentally friendly engine lubricants," *Tribol. Online*, vol. 14, no. 5, pp. 237–253, 2019, doi: 10.2474/trol.14.237.
- [2] F. Du *et al.*, "Research Progress Regarding the

- Use of Metal and Metal Oxide Nanoparticles as Lubricant Additives,” *Lubricants*, vol. 10, no. 8, 2022, doi: 10.3390/lubricants10080196.
- [3] M. Garcia Tobar, R. W. Contreras Urgiles, B. Jimenez Cordero, and J. Guillen Matute, “Nanotechnology in Lubricants: A Systematic Review of the Use of Nanoparticles to Reduce the Friction Coefficient,” *Lubricants*, vol. 12, no. 5, 2024, doi: 10.3390/lubricants12050166.
- [4] A. Morshed, H. Wu, and Z. Jiang, “A comprehensive review of water-based nanolubricants,” 2021. doi: 10.3390/lubricants9090089.
- [5] J. J. Taha-Tijerina, K. Aviña, N. A. Ulloa-Castillo, and D. V. Melo-Maximo, “Thermal Transport and Physical Characteristics of Silver-Reinforced Biodegradable Nanolubricant,” *Sustain.*, vol. 15, no. 11, pp. 1–12, 2023, doi: 10.3390/su15118795.
- [6] R. Raflan and D. Feriyanto, “ANALISIS PENGARUH NANOFLUIDA HEAT TRANSFER OIL (HTO) / SiO₂ DENGAN METODE TAGUCHI PADA PEMBUBUTAN MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL) BAJA ST 37,” *AME (Aplikasi Mek. dan Energi) J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 95–107, 2024, doi: 10.32832/ame.v10i2.825.
- [7] C. Carlucci, L. Degennaro, and R. Luisi, “Titanium dioxide as a catalyst in biodiesel production,” *Catalysts*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.3390/catal9010075.
- [8] S. J. Hettiarachchi, J. Bowen, M. Kershaw, I. A. Baragau, A. Nicolaev, and S. Kellici, “Nanostructured Al₂O₃/graphene additive in bio-based lubricant: A novel approach to improve engine performance,” *Tribol. Int.*, vol. 186, no. March, p. 108619, 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108619.
- [9] R. Khujamberdiev and H. M. Cho, “Evaluation of TiO₂ Nanoparticle-Enhanced Palm and Soybean Biodiesel Blends for Emission Mitigation and Improved Combustion Efficiency,” *Nanomaterials*, vol. 14, no. 19, 2024, doi: 10.3390/nano14191570.
- [10] S. B. Mousavi, S. Z. Heris, and P. Estellé, “Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-62830-1.
- [11] Y. Zhang, Z. Ma, Y. Feng, Z. Diao, and Z. Liu, “The effects of ultra-low viscosity engine oil on mechanical efficiency and fuel economy,” *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021, doi: 10.3390/en14082320.
- [12] R. S. Sandhi, K. R. R. Chebattina, N. R. Sambana, S. Vadapalli, G. Pullagura, and U. C. Pathem, “Evaluation of TiO₂ Nanoparticles as an Additive in Diesel-n-Butanol - Bombax Ceiba Biodiesel Blends for Enhance Performance and Emissions Control of a CI Engine,” *Int. J. Heat Technol.*, vol. 39, no. 6, pp. 1930–1936, 2021, doi: 10.18280/ijht.390630.
- [13] R. Uppar, P. Dinesha, and S. Kumar, *A critical review on vegetable oil-based bio-lubricants: preparation, characterization, and challenges*, vol. 25, no. 9. Springer Netherlands, 2023. doi: 10.1007/s10668-022-02669-w.
- [14] M. J. Nunney, “Engine lubrication,” *Light Heavy Veh. Technol.*, no. p 1556, pp. 80–98, 1988, doi: 10.1016/b978-0-434-91473-9.50008-0.
- [15] D. Berman, “Plant-Based Oils for Sustainable Lubrication Solutions—Review,” *Lubricants*, vol. 12, no. 9, 2024, doi: 10.3390/lubricants12090300.
- [16] D. Lou *et al.*, “Nano Oil Additive Improves Internal Combustion Engine Efficiency and Life Expectancy,” *Lubricants*, vol. 13, no. 10, p. 427, 2025, doi: 10.3390/lubricants13100427.
- [17] M. Bukvić, S. Gajević, A. Skulić, S. Savić, A. Ašonja, and B. Stojanović, “Tribological Application of Nanocomposite Additives in Industrial Oils,” *Lubricants*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.3390/lubricants12010006.
- [18] M. Waqas, R. Zahid, M. U. Bhutta, Z. A. Khan, and A. Saeed, “A review of friction performance of lubricants with nano additives,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216310.
- [19] Y. Chen, P. Renner, and H. Liang, “Dispersion of nanoparticles in lubricating oil: A critical review,” *Lubricants*, vol. 7, no. 1, 2019, doi: 10.3390/lubricants7010007.
- [20] M. Z. Sharif, W. H. Azmi, M. F. Ghazali, N. N. M. Zawawi, and T. Y. Hendrawati, “Stability and Thermal Conductivity of Mono and Hybrid Nanoparticles Dispersion in Double-End Capped PAG Lubricant,” *Lubricants*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.3390/lubricants11010001.
- [21] K. Holmberg and A. Erdemir, “Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions,” *Friction*, vol. 5, no. 3, pp. 263–284, 2017, doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.
- [22] A. B. V. Barboza, P. Dinesha, and M. A. Rosen, “Effect of green fuel and green lubricant with metallic nanoparticles on emissions of HC, CO, NO_x, and smoke for a

- compression ignition engine,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 39, pp. 91344–91354, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-28645-z.
- [23] X. Ye, “Nanoparticle Additives for Improving Lubricant Performance,” *Highlights Sci. Eng. Technol.*, vol. 17, pp. 166–175, 2022, doi: 10.54097/hset.v17i.2580.
- [24] P. Sharma, P. Paramasivam, B. J. Bora, and V. Sivasundar, “Application of nanomaterials for emission reduction from diesel engines powered with waste cooking oil biodiesel,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 18, no. July, pp. 795–801, 2023, doi: 10.1093/ijlct/ctad060.
- [25] Y. Z. N. Htwe, A. S. Al-Janabi, Y. Wadzer, and H. Mamat, “Review of tribological properties of nanoparticle-based lubricants and their hybrids and composites,” *Friction*, vol. 12, no. 4, pp. 569–590, 2024, doi: 10.1007/s40544-023-0774-2.
- [26] S. W. S. Rahardiningrum, Mahreni, R. Reningtyas, and R. H. Gusaptono, “Biopelumas dari Minyak Nabati,” *Eksergi*, vol. 13, no. 2, pp. 14–19, 2016.
- [27] S. Sukadarti, S. Wahyu Murni, and M. M. Azimatun Nur, “Peningkatan Phycocyanin pada *Spirulina Platensis* dengan Media Limbah Virgin Coconut Oil pada Photobioreactor Tertutup,” *Eksergi*, vol. 13, no. 2, p. 1, 2016, doi: 10.31315/e.v13i2.1700.
- [28] M. Scherge, R. Böttcher, D. Kürten, and D. Linsler, “Multi-phase friction and wear reduction by copper nanopartices,” *Lubricants*, vol. 4, no. 4, pp. 1–13, 2016, doi: 10.3390/lubricants4040036.
- [29] I. Wilińska and S. Wilkanowicz, “Advancements in Environmentally Friendly Lubricant Technologies: Towards Sustainable Performance and Efficiency,” *Energies*, vol. 18, no. 15, 2025, doi: 10.3390/en18154006.
- [30] L. Razzaq *et al.*, “Influence of varying concentrations of TiO₂ nanoparticles and engine speed on the performance and emissions of diesel engine operated on waste cooking oil biodiesel blends using response surface methodology,” *Heliyon*, vol. 9, no. 7, p. e17758, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17758.
- [31] A. León *et al.*, “FTIR and raman characterization of TiO₂ nanoparticles coated with polyethylene glycol as carrier for 2-methoxyestradiol,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2017, doi: 10.3390/app7010049.
- [32] G. Pullagura, J. Bikkavolu, S. Vadapalli, K. R. R. Chebattina, and V. Kuchipudi, “Comparative Study of TiO₂ Nanoparticles and Alcoholic Fuel Additives-Biodiesel-Diesel Blend for Combustion, Performance, and Emission Improvements,” *Int. J. Heat Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 1249–1257, 2022, doi: 10.18280/ijht.400517.
- [33] K. E. Ojaomo, S. Samion, and M. Z. M. Yusop, “Nano Bio-Lubricant as a Sustainable Trend in Tribology towards Environmental Stability: Opportunities and Challenges,” *Evergreen*, vol. 11, no. 1, pp. 253–274, 2024, doi: 10.5109/7172279.
- [34] A. Nabhan, A. Rashed, N. M. Ghazaly, J. Abdo, and M. Danish Haneef, “Tribological properties of al₂o₃ nanoparticles as lithium grease additives,” *Lubricants*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3390/lubricants9010009.
- [35] B. H. Babu and D. K. Sahoo, “Study of tribological and thermal properties of engine lubricant by dispersion of aluminium nano additives,” *Rev. des Compos. des Mater. Av.*, vol. 30, no. 2, pp. 103–107, 2020, doi: 10.18280/rcma.300207.
- [36] D. Jaya and E. Soegondo, “Pemanfaatan CPO (Crude Palm Oil) Untuk Desulfurisasi Pada Batubara Menggunakan Metode Flotasi,” *Eksergi*, vol. 13, no. 2, p. 27, 2016, doi: 10.31315/e.v13i2.1699.
- [37] P. Uniyal, P. Gaur, J. Yadav, T. Khan, and O. S. Ahmed, “A Review on the Effect of Metal Oxide Nanoparticles on Tribological Properties of Biolubricants,” *ACS Omega*, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c08279.
- [38] Y. Zhu, Z. Li, and C. Han, “A Study on the Surfactant and Tribological Properties of Water-Based Nano-Rolling Lubricants on Non-Ferrous Metal Surfaces,” *Lubricants*, vol. 13, no. 4, 2025, doi: 10.3390/lubricants13040152.
- [39] G. K. Ghosh *et al.*, “A multi-faceted review on industrial grade nanolubricants: Applications and rheological insights with global market forecast,” *Results Eng.*, vol. 25, no. December 2024, p. 103628, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103628.
- [40] S. Mishra and S. Aggarwal, “A critical review of the effect of nano-lubricant on the performance of hydrodynamic journal bearing,” *Tribologia*, vol. 40, no. 4, pp. 4–20, 2023, doi: 10.30678/fjt.127785.