

REVOLUSI NANO-LUBRICANT: BAGAIMANA NANO PARTIKEL MENGUBAH DUNIA PELUMASAN

¹Ibrahim Ghandi, ¹Maulana Mansur, ¹Setiawan Nur Rizki, ¹M. Ananda Revanza, ¹Habib Farhan Arzi, ²Riny Yolandha Parapat

¹Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung

²Program Studi Teknik Kimia Institut Teknologi Nasional Bandung

²Email : rinyyolandha@itenas.ac.id

Abstrak

Revolusi dalam dunia pelumasan telah dimulai dengan kehadiran nano-lubricant, yang menggunakan nanopartikel sebagai bahan aditif untuk meningkatkan performa pelumas konvensional. Nano-lubricant memainkan peran penting dalam mengurangi gesekan dan keausan, meningkatkan stabilitas termal, viskositas, serta memberikan perlindungan terhadap korosi. Artikel ini membahas konsep dasar nano-lubricant, mulai dari sejarah perkembangan teknologi nano dalam pelumasan hingga keunggulannya dibandingkan pelumas konvensional. Beberapa jenis nanopartikel, seperti TiO₂, ZnO, dan karbon nanotube, dijelaskan dengan mekanisme kerjanya dalam mengoptimalkan pelumasan. Meskipun menawarkan banyak keuntungan, nano-lubricant juga menghadapi tantangan dalam produksi dan biaya, serta risiko potensial terhadap kesehatan dan lingkungan. Upaya regulasi dan penelitian sedang dilakukan untuk mengatasi tantangan ini dan memastikan keamanan penggunaan nano-lubricant di masa depan. Aplikasi nano-lubricant yang luas di berbagai industri, seperti otomotif, industri, dan penerbangan, menunjukkan bahwa teknologi ini mempunyai potensi besar untuk terus berkembang dan membawa dampak signifikan dalam industri pelumasan.

Sejarah Artikel

Submitted: 2 Januari 2025

Accepted: 7 Januari 2025

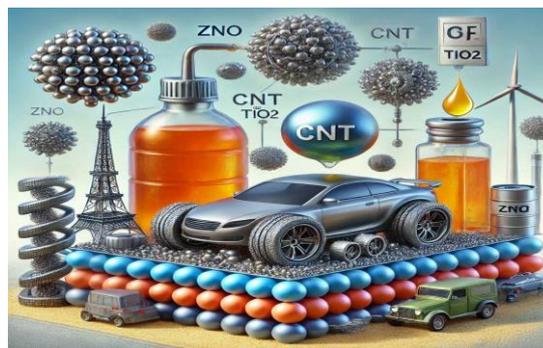
Published: 8 Januari 2025

Kata Kunci

Nano-lubricant, nanopartikel, pelumasan, pengurangan gesekan, keausan, stabilitas termal, viskositas, perlindungan korosi, TiO₂, ZnO, karbon nanotube, dampak lingkungan, regulasi, aplikasi industri, teknologi nano.

PENDAHULUAN

Nanoteknologi adalah cabang ilmu pengetahuan dan penelitian yang berfokus pada manipulasi material pada skala nano (1-100 nanometer). Pada skala ini, karakteristik fisik dan kimiawi material dapat berubah secara signifikan dibandingkan dengan skala makroskopis, sehingga memungkinkan pengembangan inovatif di berbagai bidang. Kata “nano” berasal dari kata Yunani “kecil”, yang menunjukkan area yang sangat kecil yang diukur dengan cara yang sama. Konsep ini mendukung pendekatan “top-down” (ukuran material) dan “bottom-up” (material yang berasal dari molekul individu) untuk menghasilkan material dengan karakteristik yang unik. Partikel nano yang ditemukan dalam pelumas nano dapat dilihat pada Gambar 1. menunjukkan ilustrasi nano partikel yang terdapat pada nano-lubricant (Fahanani, A. F., & Kamajaya, L., 2023)



Gambar 1. Ilustrasi nanopartikel yang digunakan pada nano lubricant

1.1 Mengapa teknologi nano penting

Nanoteknologi memiliki dampak yang signifikan pada banyak bidang kehidupan sehari-hari. Di bidang kesehatan dan pengobatan, nanopartikel seperti liposom digunakan untuk meningkatkan ketersediaan hayati obat, memungkinkan penghantaran yang lebih tepat sasaran ke tubuh, mengurangi efek pengambilan sampel, dan meningkatkan kemanjuran pengobatan.

Di sektor energi, material nano digunakan dalam baterai dan sel surya untuk meningkatkan efisiensi dan daya perangkat. Selain itu, teknologi ini juga sangat penting untuk perlindungan lingkungan, dengan menggunakan material nano untuk mengendalikan polusi dan polusi udara melalui kemampuannya untuk menerapkan desinfeksi secara lebih efektif.

Dalam industri material dan manufaktur, tabung nano karbon memiliki keunggulan di luar bidang ringan, menciptakan peluang untuk inovasi desain yang lebih kreatif.

Di bidang teknologi informasi, material nano memungkinkan pengembangan perangkat elektronik yang lebih ringkas, cepat, dan efisien. Kapasitas teknologi nano untuk menciptakan. (Rao, C.N.R., et al., 2017)

1.2 Konsep nanoteknologi dan hubungannya dengan dunia kuantum

Nanoteknologi adalah cabang ilmu pengetahuan yang berfokus pada manipulasi material pada skala nano (1-100 nm). Pada skala ini, sifat material dapat berbeda secara signifikan dari sifat-sifatnya dalam dimensi makro. Efek kuantum merupakan salah satu fenomena yang mendominasi rentang skala nano karena adanya keterbatasan ruang elektron dalam material, yang dikenal dengan istilah quantum confinement. Hal ini memengaruhi sifat optik, listrik, dan magnetik material.

Dalam konteks mekanika kuantum, prinsip-prinsip seperti teori mekanika kuantum digunakan untuk menjelaskan perilaku partikel pada skala nano. Sebagai contoh, pada nanopartikel emas, panjang gelombang cahaya yang diterapkan dipengaruhi oleh ukuran partikel akibat perubahan energi pita (bandgap) yang disebabkan oleh efek kuantum. Hal ini menjelaskan mengapa nanopartikel emas tidak selalu berwarna biru atau merah tergantung pada lingkungannya, meskipun emas dalam bentuk massal selalu berwarna emas. Nanoteknologi memungkinkan penciptaan material dengan sifat unik melalui. (Ratner, M. A., & Ratner, D., 2003)

1.3 Aplikasi teknologi nano di bidang teknik mesin

Nanopartikel memiliki berbagai aplikasi inovatif dalam teknologi modern, termasuk sebagai bahan tambahan dalam pelumas untuk meningkatkan sifat tribologi. Penggunaan nanopartikel seperti Molybdenum Disulfide (MoS_2), Graphene, dan Titanium Dioxide (TiO_2) membantu mengurangi gesekan dan keausan pada permukaan mesin, sekaligus meningkatkan struktur mikro logam. Hal ini meningkatkan efisiensi energi dan masa pakai mesin, terutama dalam kondisi suhu atau tekanan tinggi. Selain itu, nanopartikel juga digunakan dalam pelapis untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, abrasi, dan suhu ekstrem. Contohnya adalah pelapis berbasis nano keramik atau nanokomposit yang diaplikasikan pada turbin, mesin jet, dan jaringan pipa minyak, yang memungkinkan pelapis tipis dengan sifat unik seperti superhidrofobisitas atau konduktivitas listrik yang tinggi. Dalam industri kedirgantaraan, nanokomposit digunakan sebagai bahan bodi pesawat terbang karena ringan, kuat, dan tahan terhadap deformasi. Material seperti Carbon Nanotube (CNT) dan Graphene. (Xia, Z., et al., 2019)

Selain itu, nanopartikel digunakan sebagai bahan tambahan untuk bahan bakar untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi. Nanopartikel,

seperti titanium oksida atau bubuk nano aluminium. Nanopartikel meningkatkan efisiensi energi pada mesin kendaraan dan aplikasi industri lainnya dengan memperlambat laju pembakaran berkat luas permukaan. Pemanfaatan nanopartikel di berbagai bidang menunjukkan potensi besar nanoteknologi dalam meningkatkan kinerja dan keberlanjutan. (Pradhan, J. P., & Singh, B., 2020)

1.4 Nano *lubricant*

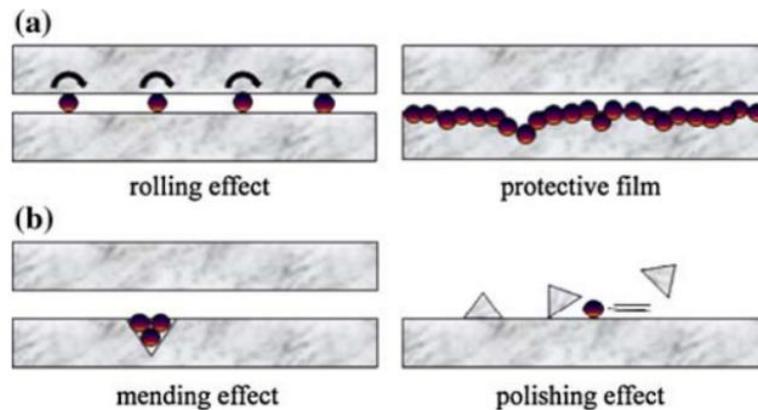
Pelumas nano adalah jenis pelumas yang mengandung partikel nano sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan sifat pelumas. Partikel nano ini, yang biasanya berukuran antara 1 hingga 100 nanometer, dapat dibuat dari berbagai macam bahan, termasuk logam, oksida logam, karbon (seperti graphene atau karbon tabung nano), keramik, atau polimer. Seiring dengan kemajuan nanoteknologi, nanomaterial telah muncul sebagai salah satu zat yang paling kuat dalam fisika, kimia, dan ilmu material. Karena ukurannya yang kecil, material nano dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam area gesekan dan dapat membentuk lapisan pelindung, yang pada gilirannya mengurangi jumlah ruang yang tersedia untuk jalur gesekan. Selain itu, material nano memiliki permukaan yang sangat aktif yang dapat meningkatkan stabilitas lapisan pelindung tribofilm karena efek adsorpsi secara fisika dan/atau kimia. Ada tiga tipe dasar dari aditif nano-*lubricant*: aditif berbasis nanometal, aditif berbasis nanokarbon, dan aditif berbasis nanokomposit (Zhao et al., 2021)

Ada sejumlah besar gesekan dan keausan dalam industri ini, yang menghabiskan banyak energi dan menyebabkan penurunan ekonomi yang tidak berkelanjutan. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan pelumasan. Pelumasan dapat meningkatkan penghematan alat dan mengurangi keausan komponen, terutama di bidang peningkatan keausan. Seiring berjalannya waktu, material nano telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan manusia. Banyak penelitian baru telah dilakukan dengan menggunakan material nano, dan banyak hasil yang cukup signifikan telah dilaporkan. Kinerja pelumasan pelumas telah meningkat secara signifikan. Penjelasannya adalah bahwa nanopartikel dapat menghasilkan efek bola dan film pada permukaan gesekan dan memiliki fungsi kesenangan dan perbaikan diri. (Li et al., 2021)

Banyak elemen mesin yang dilumasi oleh film fluida memiliki permukaan yang tidak sesuai satu sama lain; daerah yang dilumasi kemudian harus bemikul beban. Secara umum, area pelumasan non-konformal lebih kecil daripada pelumasan konformal. Secara umum, daerah pelumasan antara daerah nonkonformal dan konformal lebih besar dan lebih jelas dibandingkan dengan daerah pelumasan antara daerah konformal dan nonkonformal. Contoh lingkungan non-konformal termasuk roda gigi, bubungan dan pengikut, bantalan elemen gelinding, dan jenis beban terkonsentrasi atau beban pemancar lainnya. Pelumasan elastohidrodinamik (EHL) didefinisikan sebagai jenis pelumasan hidrodinamik di mana tekanan antara permukaan kontak sangat tinggi sehingga permukaan kontak berubah bentuk secara elastis ke jumlah yang sebanding dengan ketebalan *film*. Tidak seperti pelumasan hidrodinamik di mana ekspresi untuk ketebalan film dapat ditentukan secara apriori, dalam masalah EHL, distribusi tekanan dan ketebalan film harus ditentukan secara bersamaan (Dom et al., 2013).

Gambar 2 menjelaskan mekanisme kerja nanopartikel sebagai aditif pelumas dalam meningkatkan performa tribologi pada permukaan kontak logam. Pada bagian (a), *rolling effect* menunjukkan bahwa nanopartikel bertindak seperti bola kecil yang mengurangi gesekan dengan membantu permukaan bergerak lebih lancar. Selain itu, *protective film* menunjukkan nanopartikel membentuk lapisan pelindung pada

- permukaan logam, mencegah kontak langsung antar permukaan. Pada bagian (b), mending effect menggambarkan nanopartikel yang mengisi celah atau kerusakan mikro pada permukaan logam, sehingga memperbaiki struktur. Sementara itu, polishing effect menunjukkan bahwa nanopartikel mampu menghaluskan permukaan logam dengan mengikis partikel kasar, menghasilkan permukaan yang lebih rata dan minim gesekan. Kombinasi efek-efek ini meningkatkan umur komponen serta efisiensi energi (Dom et al., 2013).



Gambar 2. Ilustrasi protective film (Shubrajit Bhaumik, 2022)

1.5 Latar belakang

Gesekan dan keausan dalam mesin, bersama dengan perangkat mekanis, mengurangi efisiensi energi hingga 33% pada beberapa sistem, seperti pembakaran internal mesin. Pelumasan yang efektif sangat penting untuk mengurangi gesekan dan memperpanjang usia komponen. Namun, pelumas konvensional sering kali memiliki kekurangan dalam hal kelembapan lingkungan, efisiensi, dan stabilitas termal.

Dalam dua dekade terakhir, penggunaan nanopartikel sebagai aditif pelumas telah menunjukkan potensi yang signifikan untuk meningkatkan sifat tribologi pelumas. Nanopartikel seperti graphene, molibdenum disulfida (MoS_2), dan logam oksida (AlO_3 , TiO_2) telah dikembangkan yang dapat mengurangi koefisien gesekan hingga 4,78% dan meningkatkan ketahanan terhadap keausan hingga 12,96%. Selain itu, pelumas nano memiliki kemampuan unik untuk memperbaiki permukaan mikro yang berkarat dan meningkatkan efisiensi energi pada perangkat berenergi tinggi.

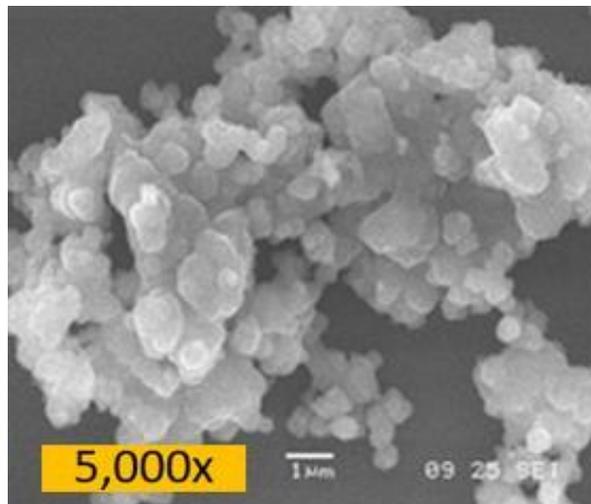
Karena pelumas nano dapat mengurangi emisi karbon melalui konsumsi energi dan umur perangkat, maka pelumas ini dapat mengurangi keberlanjutan. Oleh karena itu, pengembangan pelumas nano tidak hanya didasarkan pada kebutuhan teknis, tetapi juga bertujuan untuk meningkatkan keberlanjutan lingkungan dan efisiensi energi.

1. Jenis-Jenis Nano Partikel yang digunakan dalam Nano- Lubricant

2.1 Nanopartikel TiO_2

Nanopartikel Titanium Dioksida (TiO_2) digunakan secara luas dalam penelitian untuk meningkatkan kinerja tribologi. Karena ukuran partikelnya yang sangat kecil (1-100 nm), TiO_2 dapat dilihat dalam detail mikroskopis di antara permukaan logam yang bergesekan, sehingga mengurangi reaksi yang lambat, gesekan, dan keausan. Selain itu, ukuran kecil ini memungkinkan ruang yang lebih besar, yang membuat interaksi lebih efektif dibandingkan dengan ruang yang lebih besar. Pada pelumas, nanopartikel TiO_2 berperan sebagai agen pelumas padat yang dapat mengurangi gesekan melalui mekanisme rolling effect, dimana partikel berfungsi sebagai bola-bola kecil yang

berguling-guling di antara permukaan logam. Selain itu, TiO_2 dapat memberikan lapisan pelindung pada permukaan logam, melindungi dari keausan yang disebabkan oleh suhu yang tinggi dan ekstrim, dan bahkan memperpanjang umur komponen mekanis. Di antara aplikasinya adalah industri otomotif, di mana pelumas berbasis TiO_2 membantu mengurangi gesekan, meningkatkan usia mesin, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar, serta sektor konstruksi, pertambangan, dan mesin kedirgantaraan, di mana pelumas ini melindungi komponen dari kerusakan parah yang diakibatkan oleh tekanan kerja yang tinggi. Gambar 3 adalah hasil citra mikroskop elektron (SEM) yang memperlihatkan struktur nanopartikel dengan pembesaran 5.000 kali. Nanopartikel pada gambar terlihat sebagai kumpulan partikel kecil dengan ukuran mikrometer atau lebih kecil, memiliki permukaan kasar dan tidak beraturan. Struktur ini mencerminkan karakteristik luas permukaan yang sangat tinggi, yang menjadi salah satu keunggulan nanopartikel dalam aplikasi seperti pelumasan, coating, atau katalisis. Permukaan yang luas memungkinkan interaksi lebih besar dengan medium sekitarnya, meningkatkan efisiensi dalam penggunaannya, misalnya sebagai aditif pelumas untuk mengurangi gesekan dan keausan.



Gambar 3. Hasil karakterisasi dengan SEM dari nanopartikel TiO_2 (M. Nur Aiman U., 2020)

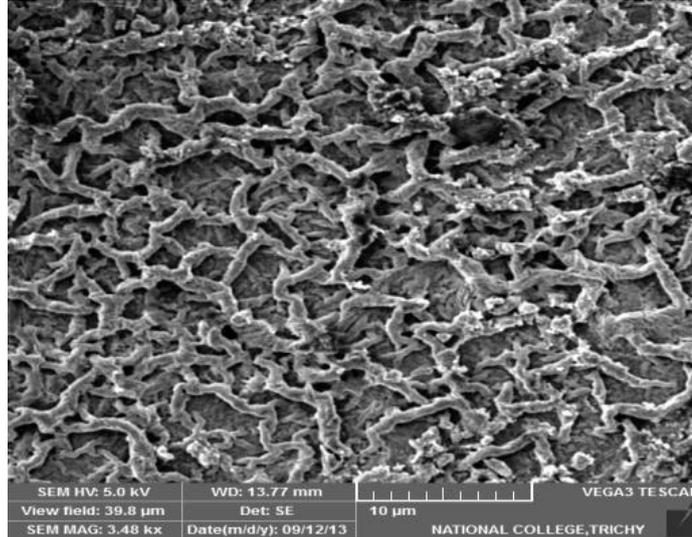
2.2 Nanopartikel ZnO

Nanopartikel *Zinc Oxide* (ZnO) memiliki ukuran yang sangat kecil, antara 1-100 nanometer, memberikan luas permukaan yang jauh lebih besar dibandingkan material makroskopik. Luas permukaan yang besar ini memungkinkan interaksi lebih baik dengan permukaan logam yang dilumasi, sehingga meningkatkan performa pelumas. ZnO juga memiliki sifat tribologis yang unggul, yakni mampu mengurangi gesekan dan keausan antar permukaan logam yang bergerak. Dalam pelumas, ZnO berperan sebagai partikel pelindung atau pengisi mikroskopis, membentuk lapisan pelindung atau bertindak sebagai partikel "guling" untuk mengurangi kontak langsung antar permukaan logam, yang pada akhirnya memperlambat keausan.

Aplikasi nanopartikel ZnO mencakup berbagai industri, seperti otomotif, di mana pelumas berbasis ZnO digunakan untuk mengurangi gesekan pada komponen seperti poros engkol dan transmisi, membantu meningkatkan efisiensi bahan bakar dan memperpanjang umur mesin. Di industri berat dan konstruksi, ZnO melindungi komponen mesin dari keausan dan gesekan berlebih di bawah beban dan suhu ekstrem.

Gambar 4 menunjukkan morfologi permukaan nanopartikel zinc oxide (ZnO) dengan struktur yang tampak seperti jaringan berpori dan bercabang. Morfologi ini sering dihasilkan dari metode sintesis khusus, seperti hidrotermal atau metode presipitasi, yang menciptakan partikel dengan ikatan yang saling terhubung. Pori-pori

- dan cabang pada struktur ini memberikan luas permukaan yang tinggi, menjadikannya ideal untuk aplikasi seperti katalisis, sensor gas, dan fotokatalis. Skala bar 10 μm menunjukkan bahwa fitur-fitur ini berada dalam skala mikrometer, dengan detail halus yang mencerminkan karakteristik nano. Analisis komposisi seperti EDX diperlukan untuk memastikan materialnya adalah ZnO (Tribology Letters, 2021).



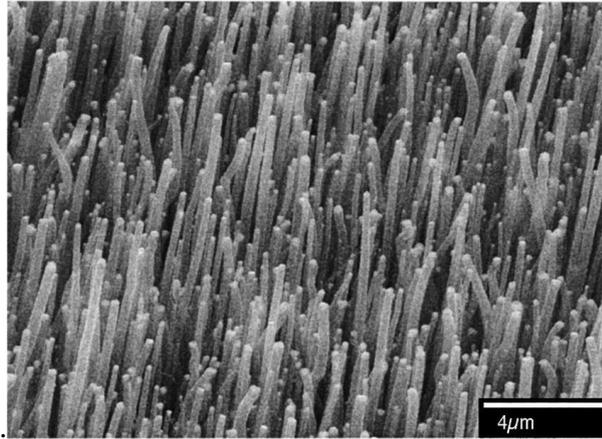
Gambar 4. Hasil karakterisasi dengan SEM dari nanopartikel ZnO (Putri Ditha, 2019)

2.3 Nanopartikel *carbon nanotube* (CNT)

Carbon Nanotubes (CNT) adalah bentuk karbon dengan struktur tabung nano yang memiliki diameter sangat kecil, biasanya di bawah 100 nanometer, dan panjang yang bisa mencapai beberapa mikrometer. Struktur CNT terdiri dari atom karbon yang tersusun dalam pola kisi heksagonal, membentuk silinder. Terdapat dua jenis utama CNT: *Single-Walled* CNT (SWCNT), yang terdiri dari satu lapisan atom karbon, dan *Multi-Walled* CNT (MWCNT), yang terdiri dari beberapa lapisan tabung karbon yang tersusun secara konsentris. CNT memiliki sifat unggul seperti kekuatan mekanis yang sangat tinggi, konduktivitas termal dan listrik yang luar biasa, serta ukuran nano dengan rasio panjang terhadap diameter yang tinggi, yang memungkinkan interaksi efisien dengan permukaan gesekan.

Dalam aplikasi pelumasan, CNT membantu meningkatkan umur komponen mesin dengan mencegah keausan, memberikan stabilitas kinerja pada suhu tinggi, dan meningkatkan efisiensi sistem pelumasan. Dalam industri otomotif, pelumas berbasis CNT digunakan untuk mengurangi gesekan pada komponen seperti poros engkol dan piston, yang berkontribusi pada efisiensi bahan bakar dan umur mesin yang lebih panjang. Di industri penerbangan, CNT meningkatkan keandalan pelumas dalam mesin pesawat yang bekerja pada suhu dan beban tinggi. Selain itu, dalam mesin berat dan konstruksi, pelumas berbasis CNT mampu meningkatkan kinerja dan mengurangi keausan pada komponen vital seperti *gear* dan bantalan, membuatnya ideal untuk lingkungan kerja ekstrem.

Gambar 5 merupakan hasil pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dari struktur karbon *nanotube* (CNT) dengan skala 4 μm . CNT adalah material berbentuk tabung nanometer yang terdiri dari atom karbon dengan struktur grafit. Dalam gambar ini, CNT tampak seperti struktur berbentuk batang panjang yang tersusun secara acak namun tetap rapat. CNT memiliki sifat mekanis, termal, dan elektrik yang sangat unggul, menjadikannya bahan potensial untuk berbagai aplikasi, seperti penguatan komposit, elektronik nano, dan bahan penyerap energi

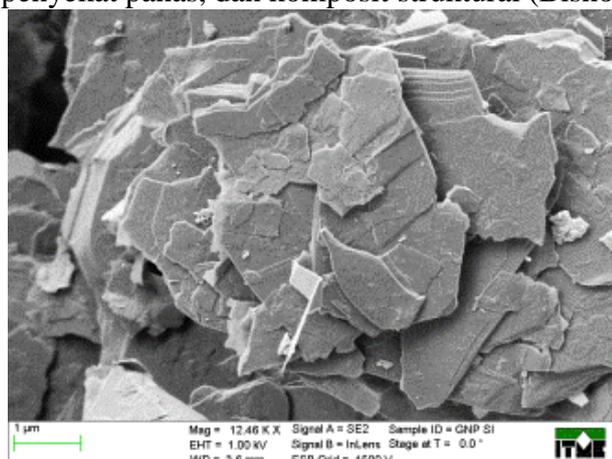


Gambar 5. Hasil karakterisasi dengan SEM dari nanopartikel CNT (Larry Jordan, 2004)

2.4 Nanopartikel *graphene*

Graphene, yang terdiri dari lapisan atom karbon terorganisir dalam struktur dua dimensi, memiliki sifat mekanik dan termal yang sangat unggul. Dalam nano-lubricant, *graphene* berfungsi untuk mengurangi gesekan dan keausan dengan membentuk lapisan tipis yang melindungi permukaan logam. Kemampuannya untuk meningkatkan konduktivitas termal juga membantu dalam menjaga suhu optimal pada komponen mesin, sehingga meningkatkan efisiensi pelumasan dan memperpanjang umur komponen. Berbagai studi menunjukkan bahwa *graphene* dapat meningkatkan kinerja pelumasan dengan signifikan pada aplikasi industri dan otomotif (Sajid et al., 2017).

Gambar 6 menunjukkan hasil pengamatan SEM (Scanning Electron Microscope) dari struktur aluminium oxide (Al_2O_3) dengan skala 4 μm . Aluminium oxide adalah material berbentuk partikel nano dengan struktur kristalin yang stabil dan tahan terhadap suhu tinggi. Dalam gambar ini, partikel Al_2O_3 tampak seperti kristal kecil yang tersebar secara acak, memberikan tampilan permukaan yang kasar dan padat. Al_2O_3 memiliki sifat termal yang sangat baik, ketahanan terhadap oksidasi, serta kekuatan mekanik yang tinggi, menjadikannya bahan yang ideal untuk aplikasi dalam pelumas, material penyekat panas, dan komposit struktural (Bishop et al., 2018).



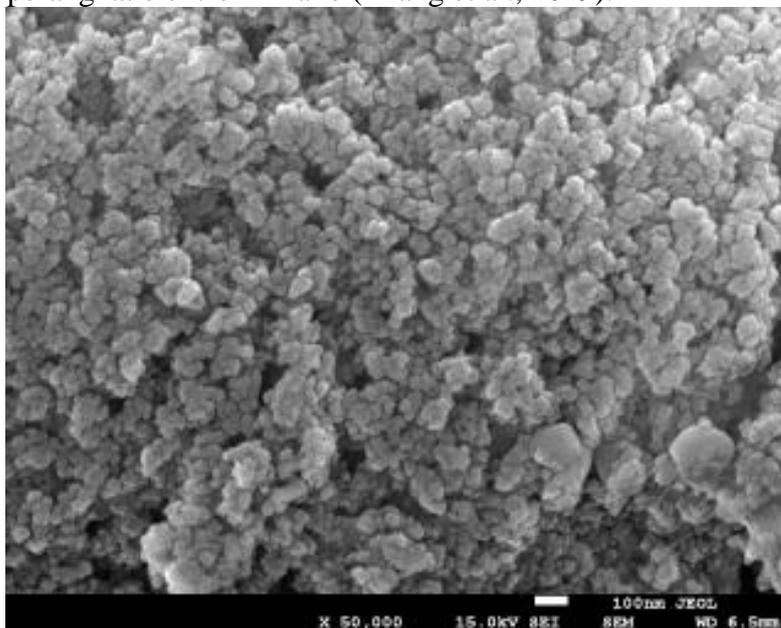
Gambar 6. Hasil karakterisasi dengan SEM dari nanopartikel Graphene (US Reaserch Nanomaterials, 2021)

2.5 Nanopartikel aluminium oxide (Al_2O_3)

Aluminium oxide adalah material nano yang sangat efektif dalam meningkatkan stabilitas termal dan ketahanan terhadap oksidasi dalam pelumas. Partikel Al_2O_3 dapat memperbaiki ketahanan pelumas pada suhu tinggi dan melindungi permukaan logam

- ♦ dari keausan dan korosi. Dalam nanolubrikant, Al_2O_3 juga membantu mengurangi gesekan dan meningkatkan daya tahan terhadap kondisi operasi yang keras. Penggunaannya dalam pelumas terbukti meningkatkan kinerja tribologis dan memperpanjang umur mesin dalam berbagai aplikasi industri (Karthikeyan et al., 2020).

Gambar 7 memperlihatkan hasil pengamatan SEM dari struktur graphene dengan skala 4 μm . Graphene terdiri dari lapisan atom karbon yang terorganisir dalam bentuk dua dimensi, dengan ketebalan hanya satu atom karbon. Dalam gambar ini, graphene terlihat sebagai lapisan tipis yang tersusun rapat namun tetap fleksibel, dengan permukaan halus dan berpotensi untuk membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Graphene memiliki sifat mekanik yang sangat tinggi, konduktivitas termal dan listrik yang luar biasa, menjadikannya bahan yang sangat potensial untuk berbagai aplikasi, termasuk dalam teknologi pelumasan, komposit ringan, dan perangkat elektronik nano (Zhang et al., 2019).



Gambar 7. Hasil karakterisasi dengan SEM dari nanopartikel Al_2O_3 (Sidi Ahmed, 2018)

2. Karakteristik dan peran nano material pada nano-lubricant

3.1 Karakteristik nano material pada nano-lubricant

Nanopartikel berbasis oksida logam, seperti TiO_2 dan ZnO , memiliki struktur kristal kubik atau heksagonal dengan ukuran partikel yang sangat kecil dalam rentang 1-100 nanometer. Ukuran ini memungkinkan mereka masuk ke celah mikroskopis di antara permukaan gesekan dalam mesin, sehingga mampu mengurangi kontak langsung antar permukaan logam. Hal ini membantu menurunkan gesekan dan keausan, sekaligus memberikan konduktivitas termal yang tinggi dan kemampuan untuk memperbaiki mikro-kerusakan pada permukaan selama proses pelumasan. Sementara itu, karbon nanotube (CNT) adalah material berbasis karbon dengan struktur tabung nano berdiameter sangat kecil, biasanya di bawah 100 nanometer, dan panjang beberapa mikrometer. CNT memiliki sifat unggul seperti koefisien gesekan yang sangat rendah, ketahanan terhadap suhu tinggi, dan kemampuannya sebagai pelumas padat, menjadikannya ideal untuk aplikasi suhu ekstrem dan pelumasan halus guna mengurangi kerusakan komponen.

3.2 Peran nano material pada nano-lubricant

Nanopartikel oksida logam, seperti titanium dioksida (TiO_2) dan zinc oksida (ZnO), memainkan peran penting dalam nano lubricant karena sifat uniknya. TiO_2 dikenal memiliki kekuatan tinggi, ketahanan korosi, dan sifat anti-gesekan yang baik. TiO_2 membantu mengurangi gesekan dan keausan komponen mesin, meningkatkan daya tahan serta umur mesin. Selain itu, TiO_2 tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki stabilitas kimiawi yang tinggi, yang membantu menjaga kestabilan pelumas dalam kondisi berat atau korosif. Sementara itu, ZnO memiliki sifat anti-gesekan dan anti-keausan, membentuk lapisan pelindung di permukaan logam untuk mengurangi gesekan dan mencegah keausan berlebih. ZnO juga meningkatkan stabilitas pelumas terhadap oksidasi, terutama pada suhu tinggi, dan memperbaiki kinerja pelumas dalam kondisi berat atau tekanan tinggi. Di sisi lain, karbon nanotube (CNT) memiliki struktur tabung nano dari atom karbon yang tersusun dalam pola heksagonal. CNT mampu mengurangi gesekan melalui mekanisme seperti rol kecil yang mempermudah permukaan logam saling meluncur. Selain itu, CNT memperkuat dan melindungi permukaan logam dari keausan, bertahan dalam suhu tinggi, dan membantu penyebaran panas secara merata berkat konduktivitas termalnya yang tinggi. Semua sifat ini menjadikan CNT, TiO_2 , dan ZnO sebagai material kunci untuk meningkatkan efisiensi dan daya tahan pelumas nano (Jayatissa, Y. X. G. A. H., Yu, Z., Chen, X., & Li, M. 2020).

3. Kelebihan nano material yang digunakan pada nano-lubricant

Nanomaterial dalam nano-lubricant memiliki sifat luar biasa yang meningkatkan efisiensi dan daya tahan pelumasan dibandingkan pelumas konvensional. Material seperti graphene, TiO_2 , ZnO , dan CNTs menawarkan konduktivitas termal tinggi, koefisien gesekan rendah, serta ketahanan terhadap keausan dan suhu ekstrem. Misalnya, graphene memiliki konduktivitas termal $\sim 5000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, sementara TiO_2 dan ZnO mampu mengisi celah mikroskopis, mengurangi gesekan, dan membentuk lapisan pelindung yang memperpanjang umur komponen mesin. Sifat ini menjadikan nano-lubricant ideal untuk aplikasi yang membutuhkan stabilitas pada kondisi berat, seperti mesin otomotif atau industri (Jiang, T., et al., 2020)

Dibandingkan pelumas konvensional, nano-lubricant dengan nanopartikel logam menunjukkan kinerja yang jauh lebih unggul. Nanopartikel seperti TiO_2 dan CNTs tidak hanya membantu mengurangi gesekan dan keausan secara signifikan tetapi juga meningkatkan stabilitas kimia dan ketahanan terhadap oksidasi. Dengan kemampuannya mendistribusikan panas secara merata, nano-lubricant menghindari akumulasi panas yang berlebihan, menjaga efisiensi energi, dan mencegah degradasi pelumas. Selain itu, nanopartikel seperti ZnO dan Al_2O_3 juga memberikan perlindungan terhadap korosi dengan membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam, meningkatkan daya tahan pelumas, dan mengurangi biaya pemeliharaan secara keseluruhan (Aiman, Y., Syahrullail, S., & Kameil, A. H. 2024).

4. Tantangan dan isu lingkungan terkait nano-lubricant

Produksi nano-lubricant menghadapi sejumlah tantangan signifikan, terutama dalam fabrikasi nanopartikel dan pencampurannya ke dalam pelumas. Salah satu kesulitan utama adalah menjaga stabilitas dispersi nanopartikel untuk mencegah aglomerasi, yang membutuhkan surfaktan atau modifikasi permukaan nanopartikel. Meskipun langkah ini membantu meningkatkan performa, biaya produksinya menjadi lebih mahal. Selain itu, teknologi fabrikasi nanopartikel belum sepenuhnya efisien pada skala besar, sehingga

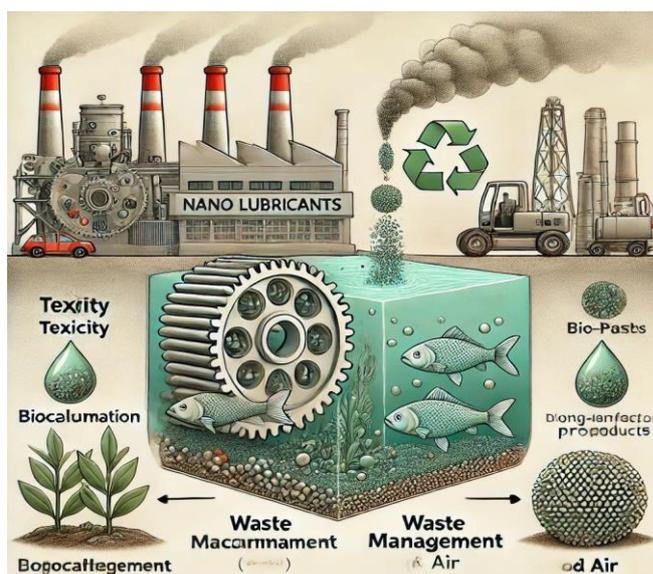
harga *nano-lubricant* masih jauh lebih tinggi dibandingkan pelumas konvensional. Tantangan ini diperburuk oleh kebutuhan akan bahan baku berkualitas tinggi, proses produksi yang rumit, dan penggunaan peralatan canggih seperti homogenizer atau sonikator.

Selain itu memproduksi *nano-lubricant* dalam skala besar menimbulkan tantangan baru dalam mempertahankan kualitas produk. Proses sintesis nanopartikel hingga pencampuran dengan pelumas dasar melibatkan tahapan kompleks yang sulit dioptimalkan tanpa kenaikan biaya yang signifikan. Stabilitas *nano-lubricant* juga menjadi perhatian karena nanopartikel cenderung mengendap jika tidak didukung stabilisasi yang memadai. Upaya penambahan dispersan atau surfaktan untuk mengatasi masalah ini tidak hanya meningkatkan biaya tetapi juga berisiko memengaruhi performa pelumas secara keseluruhan.

Penggunaan nanopartikel seperti titanium dioksida (TiO₂) atau seng oksida (ZnO) menimbulkan potensi risiko kesehatan dan lingkungan. Nanopartikel ini dapat menembus penghalang biologis seperti selaput sel, menimbulkan stres oksidatif, kerusakan DNA, atau bahkan kematian sel. Risiko terhadap lingkungan mencakup bioakumulasi nanopartikel di ekosistem air dan tanah, yang berpotensi merusak rantai makanan dan keanekaragaman hayati. Nanopartikel yang dilepaskan ke lingkungan juga cenderung sulit terurai secara alami, menambah kekhawatiran terhadap dampak jangka panjangnya.

Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai upaya regulasi dan penelitian sedang dilakukan. Organisasi seperti ISO dan OECD mengembangkan standar untuk keamanan nanopartikel, termasuk metode pengujian toksisitas dan pedoman pembuangan limbah. Beberapa negara telah menerapkan regulasi ketat, seperti pelabelan wajib untuk produk yang mengandung nanopartikel dan pengujian toksikologi sebelum produk tersebut dapat dipasarkan. Penelitian juga difokuskan pada pengembangan nanopartikel yang lebih aman untuk mendukung aplikasi *nano-lubricant* yang berkelanjutan (Astari, R. R., Rahman, D. N., Septawendar, R., & Purwasasmita, B. S., 2022).

Gambar 8 menggambarkan dampak dan pengelolaan lingkungan terkait penggunaan *nano-lubricant*. Di bagian atas, terlihat industri yang memproduksi *nano-lubricant* dan sistem transportasi, yang berkontribusi terhadap emisi. Di bagian tengah, ilustrasi menunjukkan peran *nano-lubricant* dalam manajemen limbah, namun juga potensi risiko seperti bioakumulasi dalam makhluk hidup, toksisitas terhadap ekosistem, dan kontaminasi air serta udara. Simbol daur ulang menyoroti pentingnya pengelolaan limbah berkelanjutan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan mendukung praktik produksi yang lebih ramah lingkungan.



Gambar 8. Ilustrasi dampak lingkungan nano-lubricant

KESIMPULAN

Eksplorasi nano teknologi mulai menjarah ke dunia pelumasan/lubricant yang dimana ini menunjukkan menunjukkan kemajuan signifikan. Nano teknologi yang menawarkan efisiensi dan daya tahan yang lebih baik dibandingkan dengan pelumas konvensional. Dengan mengurangi gesekan, keausan, dan degradasi termal secara efektif, nano-pelumas memberikan kinerja yang unggul dalam berbagai aplikasi industri.

Kemajuan dan keuntungan signifikan dari pelumas nano dibandingkan pelumas konvensional, menekankan kemampuannya untuk mengurangi gesekan dan keausan, meningkatkan stabilitas termal, dan meningkatkan kontrol viskositas. Secara keseluruhan, integrasi nanoteknologi dalam sistem pelumasan menghadirkan solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi dan memperpanjang umur komponen mekanis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M.K.A., Fuming, P., Younus, H.A., Abdelkareem, M.A.A., Essa, F.A., Elagouz, A., Xianjun, H., 2018. Fuel economy in gasoline engines using Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials as nanolubricant additives. *Appl. Energy* 211, 461–478. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.013>
- Ali, M.K.A., Xianjun, H., 2015. Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils. *Nanotechnol. Rev.* 4, 347–358. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0031>
- Deepika, 2020. Nanotechnology implications for high performance *lubricants*. *SN Appl. Sci.* 2, 1128. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2916-8>
- Dom, N.C., Ahmad, A.H., Ishak, A.R., Ismail, R., 2013. Assessing the Risk of Dengue Fever based on the Epidemiological, Environmental and Entomological Variables. *Procedia - Soc. Behav. Sci., AicE-Bs 2013 London (Asia Pacific International Conference on Environment-Behaviour Studies)*, 4-6 September 2013 105, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.019>
- Erdi Korkmaz, M., Kumar Gupta, M., 2024. Nano *lubricants* in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend. *J. Mol. Liq.* 407, 125261. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261>

- Hristozov, D., Malsch, I., 2009. Hazards and Risks of Engineered Nanoparticles for the Environment and Human Health. *Sustainability* 1, 1161–1194. <https://doi.org/10.3390/su1041161>
- Li, J., Chen, D., Zhang, H., Jiang, Z., Sun, K., Fan, J., Tang, Y., 2024. The tribological properties of nano-lubricants and their application on bearings: recent research progress. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 134, 3051–3082. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14351-8>
- Li, T., Chen, X., Wang, J., Zhang, L., Wei, X., Zhao, L., Ma, M., 2021. Research progress of nano lubricating additives. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 680, 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/680/1/012084>
- Liao, V.H.-C., 2023. Nanoparticles in the Environment and Nanotoxicology. *Nanomaterials* 13, 1053. <https://doi.org/10.3390/nano13061053>
- Morshed, A., Wu, H., Jiang, Z., 2021. A Comprehensive Review of Water-Based Nanolubricants. *Lubricants* 9, 89. <https://doi.org/10.3390/lubricants9090089>
- Sadiq, I.O., Suhaimi, M.A., Sharif, S., Mohd Yusof, N., Hisam, M.J., 2022. Enhanced performance of bio-lubricant properties with nano-additives for sustainable lubrication. *Ind. Lubr. Tribol.* 74, 995–1006. <https://doi.org/10.1108/ILT-08-2021-0348>
- Sanukrishna, S.S., Shafi, M., Murukan, M., Jose Prakash, M., 2019. Effect of SiO₂ nanoparticles on the heat transfer characteristics of refrigerant and tribological behaviour of lubricant. *Powder Technol.* 356, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.083>
- Srivyas, P.D., Charoo, M.S., 2018a. A Review on Tribological Characterization of Lubricants with Nano Additives for Automotive Applications. *Tribol. Ind.* 40, 594–623. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.08>
- Srivyas, P.D., Charoo, M.S., 2018b. A Review on Tribological Characterization of Lubricants with Nano Additives for Automotive Applications. *Tribol. Ind.* 40, 594–623. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.08>
- Teh, J.L., Walvekar, R., Nagarajan, T., Said, Z., Khalid, M., Mubarak, N.M., 2022. A review on the properties and tribological performance of recent non-aqueous miscible lubricants. *J. Mol. Liq.* 366, 120274. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120274>
- Zadafiya, K., Shah, P., Shokrani, A., Khanna, N., 2021. Recent advancements in nano-lubrication strategies for machining processes considering their health and environmental impacts. *J. Manuf. Process.* 68, 481–511. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.056>
- Zhao, J., Gao, T., Li, Y., He, Y., Shi, Y., 2021. Two-dimensional (2D) graphene nanosheets as advanced lubricant additives: A critical review and prospect. *Mater. Today Commun.* 29, 102755. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102755>
- Ratner, M. A., & Ratner, D. (2003). *Nanotechnology: A gentle introduction to the next big idea*. Prentice Hall Professional.
- Gupta, U., & Rao, C. N. R. (2017). Hydrogen generation by water splitting using MoS₂ and other transition metal dichalcogenides. *Nano energy*, 41, 49-65.
- JAYATISSA, Yong X. Gan Ahalapitiya H., et al. Hydrothermal synthesis of nanomaterials. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 2019: NA-NA.