



## Pengaruh Aditif Pelumas Hexagonal Boron Nitride terhadap Keausan Mesin Diesel B30 dalam Uji Durabilitas 200 Jam

M Faizur Rijal Azhad<sup>1\*</sup>, Parman<sup>2</sup>, Immanuel Freddy Augustino<sup>3</sup>,  
Rahmat Basya Shahrys Tsany<sup>4</sup>, Dicki Nizar Zulfika<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia

<sup>3,4,5</sup> Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia

### Riwayat Artikel:

Diajukan: 03/12/2025

Diterima: 22/22/2025

Daring: 30/12/2025

Terbit: 30/12/2025

### Kata Kunci:

Biodiesel

Gesekan

Nanopartikel

Performa Mesin

Tribologi

### Keywords:

Biodiesel

Engine Performance

Friction

Nanoparticle

Tribology

### Abstrak

Nanopartikel boron nitride hexagonal (hBN) telah muncul sebagai aditif pelumas yang menjanjikan untuk mengurangi gesekan dan keausan pada mesin pembakaran internal. Penelitian ini menyajikan investigasi eksperimental komprehensif mengenai nanopartikel hBN tereksfoliasi sebagai aditif pelumas pada mesin diesel empat langkah satu silinder yang beroperasi dengan bahan bakar biodiesel B30. Pengujian durabilitas selama 200 jam dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pelumas beraditif hBN terhadap karakteristik keausan mesin dan parameter kinerja, meliputi torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, dan daya rem. Analisis keausan dilakukan pada komponen mesin kritis untuk mengukur mekanisme pengurangan keausan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel hBN tereksfoliasi secara efektif mengurangi laju keausan pada mesin diesel berbahan bakar B30, berkontribusi pada peningkatan kinerja tribologi dan perpanjangan durabilitas mesin. Selain itu, pelumas beraditif menunjukkan efisiensi bahan bakar yang lebih baik tanpa mengorbankan kinerja mesin. Penelitian ini mengisi kesenjangan signifikan dalam literatur tribologi terkait efikasi nano-aditif dalam sistem pembakaran biodiesel dan memberikan wawasan praktis untuk operasi mesin berkelanjutan. Temuan ini menekankan potensi hBN sebagai nano-aditif fungsional dalam mendukung efisiensi dan keberlanjutan lingkungan dari mesin pembakaran internal berbasis bahan bakar nabati.

### Abstract

Hexagonal boron nitride (hBN) nanoparticles have emerged as a promising lubricant additive to mitigate friction and wear in internal combustion engines. This study presents a comprehensive experimental investigation of exfoliated hBN nanoparticles as a lubricant additive for a single-cylinder four-stroke diesel engine operating on B30 biodiesel fuel. A prolonged 200-hour durability test was conducted to evaluate the effects of hBN-additivated lubricant on engine wear characteristics and performance parameters, including torque, specific fuel consumption, and brake power. Wear analysis was performed on critical engine components to quantify wear reduction mechanisms. The results demonstrate that exfoliated hBN nanoparticles effectively reduce wear rates in B30-fueled diesel engines, contributing to enhanced tribological performance and extended engine durability. Furthermore, the additivated lubricant exhibited improved fuel efficiency without compromising engine performance. This work addresses a significant gap in the tribological literature regarding nano-additive efficacy in biodiesel combustion systems and provides practical insights for sustainable engine operation. The findings underscore the potential of hBN as a functional nano-additive in supporting both efficiency and environmental sustainability of biofuel-based internal combustion engines.

\* korespondensi: [faizur.rijal@ppns.ac.id](mailto:faizur.rijal@ppns.ac.id)



## Pendahuluan

Mesin pembakaran dalam atau *Internal combustion engines* (ICE) berbahan bakar fosil adalah pembangkit daya yang masih paling umum pada kendaraan. ICE dinilai membutuhkan kemajuan sesegera mungkin untuk meningkatkan kinerja, efisiensi dan mengurangi emisi gas buang seiring dengan kenaikan harga minyak dan peraturan emisi yang diperketat [1]. Seperlima dari total konsumsi energi dunia (sekitar 103 exajoule) digunakan untuk mengatasi gesekan [2], [3]. Teknologi material dan pelumasan terus dikembangkan untuk mengurangi gesekan dan memberi perlindungan keausan pada mesin, peralatan, dan mekanisme lainnya secara global. Kehilangan energi akibat gesekan dan keausan skala global berpotensi dapat dikurangi sebesar 40% dalam jangka 15 tahun, atau dapat dihitung 18% dalam jangka 8 tahun. Penghematan ini juga akan mengurangi emisi CO<sub>2</sub> secara global sebanyak 1.460 MtCO<sub>2</sub> dan dapat menjadi 3.140 MtCO<sub>2</sub> dalam jangka panjang [2], [3]. Sekitar 40 juta ton minyak pelumas digunakan untuk berbagai keperluan meminimalisir gesekan dalam skala global per tahunnya, dengan estimasi biaya sebesar 200 miliar USD [4]. Dari permasalahan tersebut, pelumasan yang efisien adalah salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah efisiensi dan emisi pada motor bakar [5].

Pelumas berbahan dasar minyak dapat meningkatkan kinerja tribologis dari dua sliding surfaces dengan menghasilkan film tipis di antara keduanya. Pelumas sendiri merupakan campuran multikomponen dari berbagai bahan dasar minyak dan bahan tambahan (aditif) [6] dalam konsentrasi rasio umumnya 9:1 antara minyak dasar dan aditif (Liñeira del Río, López dan Fernández, 2021) atau hingga 25% kandungan aditif [7]. Berbagai jenis nanopartikel sering didispersikan sebagai aditif minyak pelumas untuk mengurangi gesekan dan keausan [8 - 10]. Menurut ulasan terbaru, mekanisme pelumasan partikel nano sebagian besar dipengaruhi oleh ukuran dan bentuknya [18], [19]. Tidak seperti pelumas intrinsik padat, yang dapat melumasi karena bidang kristalografi gesernya yang rendah, nanopartikel padat dapat melumasi melalui sliding, exfoliation, and rolling, serta melalui pembentukan layer body ketiga, yang mengurangi kontak antara dua permukaan geser [17], [20], [21]. Nanopartikel logam lunak (Cu, Ni, Fe, Sn, Ag, Pd) dapat membentuk lapisan pelindung, mengurangi gesekan dan keausan, sedangkan nanopartikel logam keras dapat mengisolasi dua permukaan geser dan meningkatkan kapasitas dukung bebannya [22], [23], [24]. Mekanisme mending juga dapat dimasukkan sebagai mekanisme antiwear untuk meningkatkan keandalan komponen mesin [25], [26], [27]. Dengan sifat pelumasan yang baik, pengenceran biodiesel dari pelumas mesin diharapkan dapat meningkatkan kinerja tribological sepanjang kontak ring-liner piston.

Hexagonal boron nitrida (hBN) adalah material lamellar dengan gaya van der Waals antara dua lembar atom boron dan nitrogen yang terikat secara kovalen [28]. Karena sifatnya yang unik, hBN dijadikan sebagai alternatif komponen performance-enhancer yang layak untuk pelumas padat anorganik. Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menentukan pengaruh aditif nanopartikel hBN pada minyak pelumas ICE. Pencampuran hBN dengan oli mesin, dapat menghasilkan emisi gas buang yang lebih rendah dan kinerja mesin yang lebih efisien [29], [30], [31]. Dalam studi tribologi yang lebih luas, selain sebagai peredam gesekan, hBN nanopartikel juga bertindak sebagai aditif anti-wear [12], [14], [26], [28]. hBN juga memiliki kombinasi sifat fisik dan mekanik yang baik, seperti konduktivitas termal yang tinggi, dan stabilitas kimia dan termal yang lebih baik dibandingkan dengan graphene atau jenis logam transisi lainnya. Meskipun banyak studi telah menguji efek hBN pada mesin diesel, kebanyakan berfokus pada pengujian jangka pendek dan menggunakan bahan bakar diesel konvensional. Pengaruhnya terhadap durabilitas mesin dalam kondisi operasional jangka panjang menggunakan bahan bakar nabati seperti B30 masih belum banyak dieksplorasi secara mendalam.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah menyajikan analisis komprehensif mengenai pengaruh penambahan nanopartikel hexagonal boron nitride (hBN) yang telah dieksfoliasi sebagai aditif pelumas terhadap keausan mesin diesel empat langkah satu silinder berbahan bakar biodiesel B30. Fokus utama mencakup evaluasi perubahan torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, dan daya mesin selama pengujian durabilitas. Kebaruan dari studi ini terletak pada pendekatan eksperimental jangka panjang selama 200 jam yang secara simultan mengevaluasi efek eksfoliasi hBN terhadap keausan mesin diesel B30 sebuah topik yang masih jarang dibahas dalam literatur tribologi dan pelumasan baik nasional maupun internasional. Temuan ini diharapkan dapat memperkaya wacana terkait pemanfaatan aditif nanopartikel dalam mendukung efisiensi dan keberlanjutan sistem pembakaran berbahan bakar nabati.

## Metodologi

### Persiapan Bahan

Bahan bakar yang digunakan merupakan minyak solar produk dari Pertamina dengan kandungan biodiesel 30%. Mengacu pada SK Dirjen Migas No. 0234.K/10/DJM.S/2019 tanggal 11 November 2019 tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Solar Campuran Biodiesel 30% (B-30) yang Dipasarkan di Dalam Negeri, spesifikasi bahan bakar B30 dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Spesifikasi Biosolar B30

| No | Karakteristik                            | Satuan             | Batasan min     | Batasan max           | Metode uji                 |
|----|--|--------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| 1  | Angka Setana, atau                       | -                  | 48              | -                     | ASTM D613                  |
| 2  | Indeks Setana                            | -                  | 45              | -                     | ASTM D4737                 |
| 3  | Berat Jenis (pada suhu 15 °C)            | kg/m <sup>3</sup>  | 815             | 880                   | ASTM D4052 / D1298         |
| 4  | Viskositas (pada suhu 40 °C)             | mm <sup>2</sup> /s | 2.0             | 5.0                   | ASTM D445                  |
| 5  | Kandungan Sulfur                         | % m/m              | -               | 0.25                  | ASTM D4294 / D5453 / D2622 |
| 6  | Distilasi 90% vol penguapan              | °C                 | -               | 370                   | ASTM D86                   |
| 7  | Titik Nyala                              | °C                 | 52              | -                     | ASTM D93                   |
| 8  | Titik Kabut, atau                        | °C                 | -               | 18                    | ASTM D2500 / D5773         |
| 9  | Titik Tuang                              | °C                 | -               | 18                    | ASTM D97 / D5949           |
| 10 | Residu Karbon                            | % m/m              | -               | 0.1                   | ASTM D189 / D4530          |
| 11 | Kandungan Air                            | mg/kg              | -               | 425 dan<br>dilaporkan | ASTM D6304 / D1744         |
| 12 | Kandungan FAME                           | % v/v              | 30              | -                     | ASTM D7806 / D7371         |
| 13 | Korosi Bilah Tembaga                     | kelas              | -               | Kelas 1               | ASTM D130                  |
| 14 | Kandungan Abu                            | % m/m              | -               | 0.01                  | ASTM D482                  |
| 15 | Kandungan Sedimen                        | % m/m              | -               | 0.01                  | ASTM D473                  |
| 16 | Bilangan Asam Kuat                       | mg<br>KOH/g        | 0               | -                     | ASTM D664                  |
| 17 | Bilangan Asam Total                      | mg<br>KOH/g        | -               | 0.6                   | ASTM D664                  |
| 18 | Penampilan Visual                        |                    | Jernih & Terang |                       | Visual                     |
| 19 | Warna                                    | No.<br>ASTM        | -               | 3                     | ASTM D1500                 |
| 20 | Lubrisitas (HFRR wear scar dia. @ 60 °C) | micron             | -               | 460                   | ASTM D6079                 |
| 21 | Kestabilan Oksidasi                      | jam                | 35              | -                     | EN 15751                   |
| 22 | Kestabilan Oksidasi                      | menit              | 45              | -                     | EN D7545 / EN 16091        |

### Persiapan Mesin Uji

Langkah *engine set up* dilakukan sebelum dilakukan *running* mesin. Dilakukan pembersihan ruang bakar dan pergantian ring piston beserta *journal bearing* untuk setiap *running* 200 jam berdasarkan variabel-nya. Mesin yang digunakan merupakan mesin diesel 1 silinder Yanmar TF 85 MH dengan spesifikasi lengkap pada **Tabel 2**. Mesin ini menggerakkan generator listrik dengan *dummy load* berupa susunan lampu halogen 100 watt hingga 50 buah (variasi pembebanan).

Uji performa mesin sebelum uji *running* didapatkan daya tertinggi pada putaran mesin 2200 rpm dicapai pada beban 3500 Watt dengan daya mesin sebesar 6.4 HP. Pembebanan lebih besar dari 3500 kW mengakibatkan mesin tidak dapat berputar hingga 2200 rpm. Untuk rated power continous kami tentukan berada pada putaran 2200 rpm dengan SFOC terendah. Titik rated power berada pada putaran 2200 rpm pada pembebanan 3000 Watt dengan SFOC 373 gram/kWh dengan daya mesin 5.68 HP. Torsi tertinggi dari hasil uji performa dan kalkulasi didapatkan pada putaran mesin 1800 rpm pada pembebanan 4500 Watt.

**Tabel 2.** Spesifikasi Yanmar TF 85 MH [36]

| Karakteristik                   | Spesifikasi   |
|---------------------------------|---|
| Type of Engine                  | Water cooled 4 stroke horizontal diesel motor                                   |
| Combustion System               | Direct Injection  |
| Number of Cylinder              | One Cylinder  |
| Bore × Stroke                   | 85 mm × 87 mm   |
| Volume of Cylinder              | 493 cc  |
| Continous Power                 | 7,5 dk / 2200 rpm   |
| Momentary Maximum Power         | 8,5 dk / 2200 rpm   |
| Torque Maximum                  | 3,44 kg.m / 1600 rpm  |
| Compression Ratio               | 18  |
| Fuel Consumption                | 171 gr / dk.hour  |
| Pressure Injector               | 200 kg/cm <sup>2</sup>  |
| Lubrication System              | Forced lubrication using pumps and hydraulic regulator valves (type Trochoidal) |
| Lubricating Oil Capacity        | 2,2 liter   |
| Type of Lubricating Oil         | SAE 40 Class CC or CD   |
| Dimension of Engine (P × L × T) | 672 mm × 330,5 mm × 496 mm  |
| Empty Weight                    | 93 kg   |

### Uji Running Mesin

Percobaan yang dilakukan menggunakan mesin diesel Yanmar TF 85 MH dengan bahan bakar biodiesel B30. Percobaan dilakukan dengan variasi putaran mesin dan pembebanan. Pada tahun 1982, *Engine Manufacture Association* (EMA) telah menentukan bahwa untuk menguji daya tahan mesin diesel adalah dengan menggunakan metode uji mesin selama 200 jam dengan menggunakan bahan bakar alternatif. Pengujian mesin selama 200 jam dilakukan dengan variasi dan waktu pembebanan yang telah ditentukan sebagai berikut: [37 - 40]

- *Low idle*, mesin dioperasikan pada putaran 1000 rpm tanpa beban dan dilakukan selama 30 menit.
- *High idle*, mesin dioperasikan pada putaran 1980 rpm (90% dari *rated power*) dengan pembebanan 1125 Watt (25% dari torsi maksimum) dan dilakukan selama 30 menit.
  - *Rated power*, mesin dioperasikan pada putaran 2200 rpm dengan pembebanan 3000 Watt dan dilakukan selama 60 menit.
  - *Maximum torque*, mesin dioperasikan pada putaran 1800 rpm dengan pembebanan 4500 Watt dan dilakukan selama 60 menit.

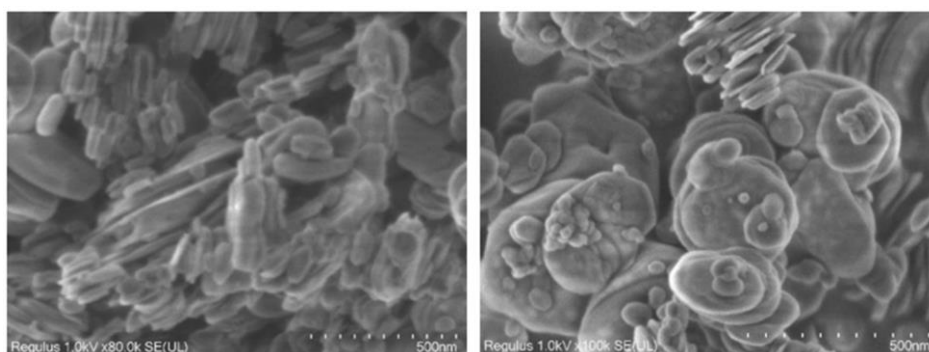
### Persiapan Aditif Pelumas

Minyak pelumas mesin yang digunakan merupakan produk Pertamina dengan *base oil* mineral *single-grade* SAE 40. Nanopartikel hBN didapatkan melalui pembelian secara impor dari Shanghai, China dengan spesifikasi diameter partikel 0.5 micron. Selanjutnya aditif didispersikan terhadap minyak pelumas mineral SAE 40. Dilakukan eksfoliasi partikel untuk merubah diameter partikel menjadi nano dengan langkah sebagai berikut:

- Dilakukan pencampuran antara hBN dan KOH dengan perbandingan mol 1:2.5
- *Magnetic stirring* selama 2 jam dengan suhu tinggi 180°C
- Sonikasi selama 30 menit
- Sentrifugasi untuk memisahkan hBN dengan pelarut
- Pencucian dengan aquades, lalu dilakukan penyaringan
- Endapan dikeringkan

**Gambar 1** menggambarkan hasil FESEM untuk nanopartikel serbuk hBN hasil eksfoliasi pelarut KOH. Setelah proses eksfoliasi, serbuk hBN didispersikan kepada minyak pelumas dengan melalui tahapan pengadukan dengan magnetic stirrer selama 30 menit dan sonikasi selama 30 menit. Setelah dilakukan pencampuran, dilakukan pengamatan stabilitas pada minyak pelumas dengan tambahan hBN sebesar 0.5% massa dan didapat tidak ada endapan yang terbentuk setelah 7 hari pengamatan. Eksperimen pada penelitian ini dibagi menjadi 2 variabel bebas, yaitu :

- hBN 0%, minyak pelumas baru tanpa aditif hBN
- hBN 0.5%, minyak pelumas baru sebanyak 99.5% dengan tambahan 0.5% aditif hBN



**Gambar 1.** Hasil FESEM hBN sebelum eksfoliasi (kiri) dan setelah eksfoliasi (kanan)

### Pengamatan keausan Komponen Mesin

Akan dilakukan analisis lab terkait kandungan logam serta sifat sifat fisika pada minyak pelumas sebelum dan sesudah uji running mesin. Data massa dan data gambar komponen sebelum dan sesudah pengujian pada setiap variabel juga diamati secara visual sebagai data penunjang keausan. Penimbangan komponen ring piston dan bantalan dilakukan dengan menggunakan timbangan analis. Timbangan analis produksi Ohaus tipe explorer memiliki beban maksimum 220 gram dengan ketelitian hingga 0.0001 gram.

Sampel pelumas 150 ml untuk tiap variabel dikirimkan ke PT. Petrolab untuk pengujian kandungan logam keausan pada minyak pelumas. Kandungan logam pada minyak pelumas dapat berupa aditif dan dapat juga berupa logam dari keausan komponen mesin. Selain minyak dasar penyusun pelumas, terdapat kandungan aditif untuk mendukung fungsi pelumasan pada minyak pelumas mesin. Aditif ini dapat berupa elemen logam yang terkandung didalam pelumas. Seiring waktu operasi mesin,

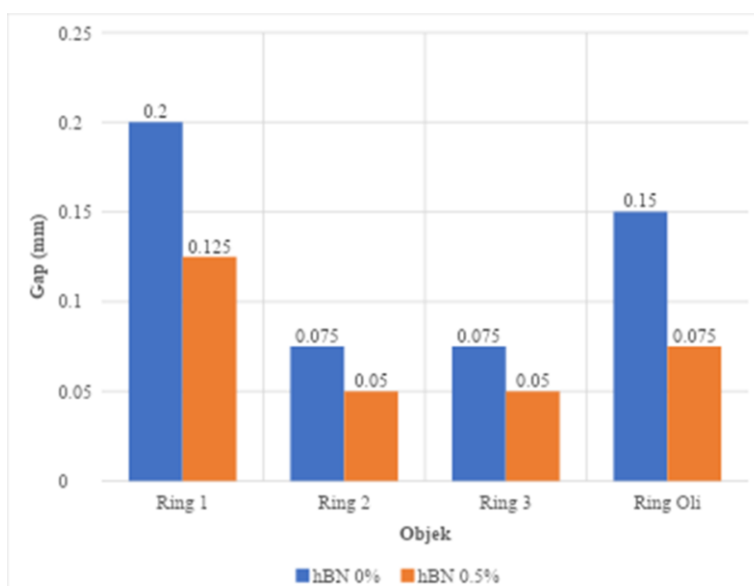
keausan pada komponen berupa logam akan disapu dan menjadi kandungan pada minyak pelumas. Kontaminan berupa debu atau penyusun cairan pendingin dapat juga terkandung pada minyak pelumas. Elemen elemen ini dibagi dan dijabarkan sumbernya pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Sumber Kandungan Elemen pada Pelumas [40], [41], [42]

| Elemen/Symbol |    | Sumber Kontaminasi |             |            |            |          |             |          |
|---------------|----|--------------------|-------------|------------|------------|----------|-------------|----------|
| Besi          | Fe | Liner Silinder     | Piston      | Gir        | Perporosan | Katup    | Bantalan    | Karat    |
| Krom          | Cr | Liner Silinder     | Ring Piston | Coating    | Perporosan | Coolant  | Bantalan    |          |
| Nikel         | Ni | Coating            | Ring Piston | Gir        | Katup      | Bantalan | Bahan Bakar |          |
| Molibdenum    | Mo | Aditif Oli         | Ring Piston | Gemuk      | Coolant    |          |             |          |
| Vanadium      | V  | Katup              | Bahan Bakar |            |            |          |             |          |
| Mangan        | Mn | Katup              | Perporosan  | Bantalan   | Debu       |          |             |          |
| Titanium      | Ti | Katup              | Pegas       | Debu       |            |          |             |          |
| Alumunium     | Al | Piston             | Bantalan    | Bushing    | Pompa      | Gemuk    | Debu        |          |
| Tembaga       | Cu | Aditif Oli         | Bantalan    | Bushing    | Piston     | Coolant  | Kuningan    | Gir Worm |
| Tin           | Sn | Bantalan           | Solder      | Coolant    |            |          |             |          |
| Timah         | Pb | Aditif Oli         | Bantalan    | Bushing    | Coolant    | Solder   | Bahan Bakar |          |
| Magnesium     | Mg | Aditif Oli         | Coating     | Blok Mesin | Air Laut   |          |             |          |
| Kalsium       | Ca | Aditif Oli         | Gemuk       | Air Laut   |            |          |             |          |
| Zinc          | Zn | Aditif Oli         | Kuningan    | Coolant    |            |          |             |          |
| Fosfor        | P  | Aditif Oli         | Kuningan    |            |            |          |             |          |
| Sulfur        | S  | Aditif Oli         | Pelumas     |            |            |          |             |          |
| Barium        | Ba | Aditif Oli         |             |            |            |          |             |          |
| Boron         | B  | Aditif Oli         | Coolant     |            |            |          |             |          |
| Lithium       | Li | Gemuk              |             |            |            |          |             |          |
| Sodium        | Na | Aditif Oli         | Coolant     | Debu       | Gemuk      | Air Laut |             |          |
| Silikon       | Si | Aditif Oli         | Coolant     | Debu       | Gemuk      | Piston   |             |          |

### Hasil dan Pembahasan

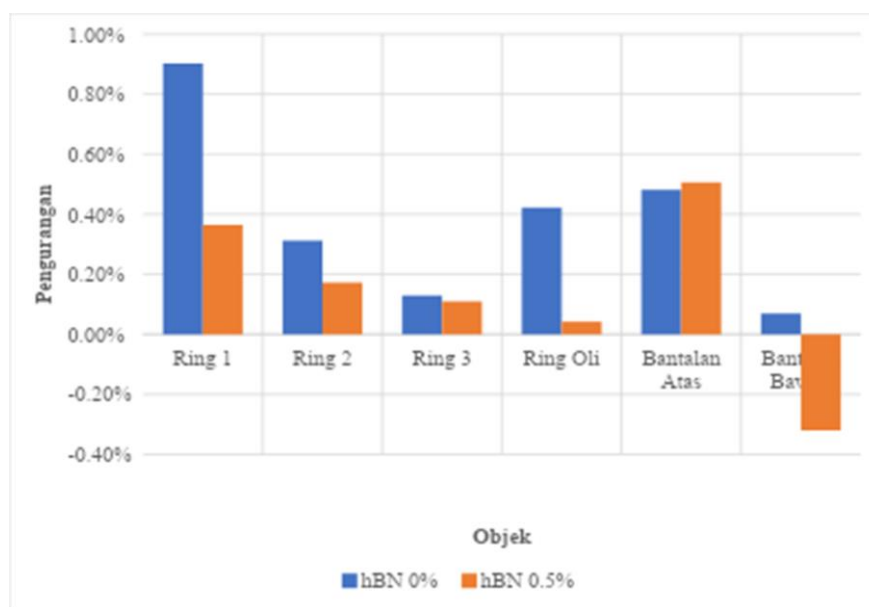
Dilakukan pengambilan data gap ring piston baik sebelum dan sesudah uji durabilitas sebagai salah satu parameter keausan yang terjadi pada ring piston. Perubahan gap ring piston didapatkan dengan pengurangan antara gap saat sebelum uji dengan gap setelah uji durabilitas 200 jam yang dapat dilihat pada **Gambar 2**. Data rata rata perubahan gap ring piston antara kondisi TMA dan TMB digunakan sebagai pembandingan untuk dilakukan analisis. Perubahan gap ring piston pada kondisi hBN 0.5% lebih rendah dibanding dengan tanpa aditif hBN. Pada ring kompresi 1, perubahan gap ring piston hBN 0.5% didapatkan 0.075 mm atau 37.5% lebih rendah dibanding perubahan gap pada uji tanpa aditif hBN.



**Gambar 2.** Grafik perbandingan perubahan gap ring piston uji durabilitas hBN 0% dengan hBN 0.5%

Pada ring kompresi 2 dan 3, perubahan gap ring piston hBN 0.5% didapatkan 0.025 mm atau 33.3% lebih rendah dibanding perubahan gap pada uji tanpa aditif hBN. Pada ring ke-empat atau *oil scrapper*, perubahan gap ring piston hBN 0.5% didapatkan 0.075 mm atau 50% lebih rendah dibanding perubahan gap pada uji tanpa aditif hBN. Data gap ring piston yang didapatkan masih dibawah batas pergantian 1.5 mm dari manual servis mesin seri TF oleh pabrikan Yanmar, namun untuk kondisi baru telah melewati standar pada ring piston kompresi 1, dimana standar Yanmar menuliskan gap sebesar 0.2 hingga 0.4 mm [44].

Dilakukan penimbangan untuk mendapatkan massa komponen ring piston, dan *journal bearing* baik sebelum dan sesudah uji durabilitas sebagai salah satu parameter keausan pada komponen



**Gambar 3.** Grafik perbandingan perubahan massa komponen pada uji durabilitas hBN 0% dengan hBN 0.5%

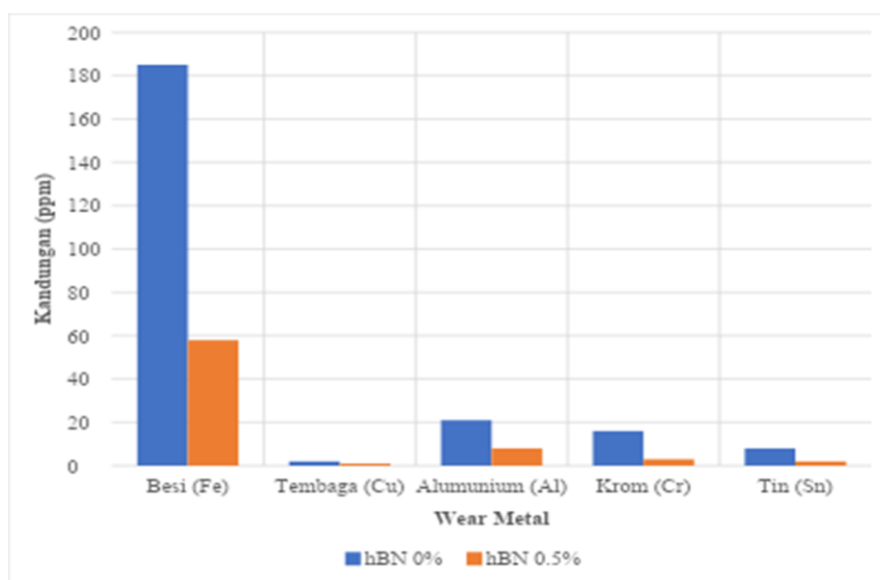
mesin. Data penimbangan diilustrasikan pada **Gambar 3**. Pengurangan massa ring piston pada uji dengan aditif hBN 0.5% yang terjadi lebih rendah dibanding dengan uji tanpa aditif hBN. Perubahan massa komponen didapatkan dengan pengurangan antara massa komponen saat sebelum uji dengan massa komponen setelah uji durabilitas 200 jam. Perubahan massa komponen ring kompresi 1, ring kompresi 2, ring kompresi 3, dan ring *oil scrapper* pada kondisi hBN 0.5% masing masing didapatkan 60%, 45%, 15%, dan 90% lebih rendah dibanding perubahan gap pada uji tanpa aditif hBN. Untuk perubahan massa komponen *journal bearing* atas pada kondisi hBN 0.5% didapatkan 5% lebih tinggi dibanding kondisi hBN 0%, dan terjadi kenaikan massa pada *bearing* bawah dengan aditif hBN 0.5%.

Terjadi pertambahan massa pada bantalan bawah setelah uji durabilitas dengan aditif hBN 0.5% sebesar 0.0538 gram atau 0.32% dari massa awal sebelum uji durabilitas. Fenomena yang terjadi merupakan efek "*mending*" dari nanopartikel boron terhadap permukaan gesek. Efek *mending* mengacu pada deposisi nanopartikel yang "mengisi" ceruk keausan pada permukaan yang berinteraksi, sehingga kemungkinan penambahan massa bantalan diakibatkan oleh penambahan hBN didalam bantalan (Diilustrasikan pada **Gambar 5 C**) [34], [45].

Degradasi komponen utama mesin diesel juga dapat dilihat dari kualitas minyak pelumas yang telah digunakan. Pada minyak pelumas bekas juga terkandung unsur logam pada komponen mesin diesel akibat keausan abrasi [40]. Batas maksimum uji kandungan logam didasarkan pada standar ASTM D5185-18 : *Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry*. Kandungan logam keausan atau *wear metal* minyak pelumas sebelum uji relatif sama baik tanpa dan dengan aditif hBN. Perbedaan signifikan dapat terlihat antara kandungan logam setelah uji tanpa aditif hBN dan dengan aditif hBN sebanyak 0.5% massa, dimana kandungan logam setelah uji dengan tanpa aditif hBN lebih tinggi. Kandungan logam Besi (Fe), dan Krom (Cr) pada pelumas tanpa aditif hBN telah melewati batas maksimum standar, dimana dapat dikatakan bahwa mesin mengalami keausan yang berat. Jika dibandingkan, sampel pelumas setelah uji durabilitas dengan aditif hBN sebanyak 0.5% massa memiliki kandungan logam Besi (Fe) 127 ppm atau 69% lebih rendah, Tembaga (Cu) 1 ppm atau 50% lebih rendah, Aluminium (Al) 13 ppm atau 62% lebih rendah, Krom (Cr) 13 ppm atau 81% lebih rendah, dan Tin (Sn) 6 ppm atau 75% lebih rendah dibanding dengan sampel pelumas setelah uji durabilitas

tanpa aditif hBN. Data kandungan logam dalam pelumas sebelum dan setelah uji durabilitas diilustrasikan pada grafik **Gambar 4**.

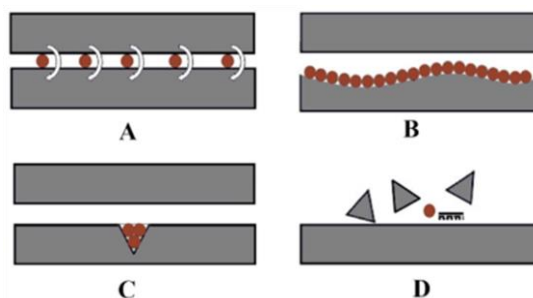
Lebih tingginya keausan pada ring piston pada kondisi tanpa aditif hBN mengakibatkan kandungan unsur besi (Fe), tembaga (Cu), dan krom (Cr) pada hasil uji sampel pelumas tanpa aditif hBN lebih tinggi dibanding dengan pelumas dengan tambahan aditif hBN sebesar 0.5% massa. Kandungan besi (Fe) juga dapat menandakan keausan dinding silinder lebih tinggi pada uji tanpa aditif hBN. Tingginya kandungan unsur Tin (Sn), dan tembaga (Cu) menunjukkan bahwa keausan *journal bearing* lebih tinggi pada sampel uji tanpa aditif hBN. Dari data kandungan unsur aluminium menunjukkan bahwa terjadi keausan komponen piston lebih tinggi pada uji tanpa aditif hBN. Lebih rendahnya keausan komponen-komponen mesin pada uji durabilitas dengan tambahan aditif hBN pada minyak pelumas mesin diakibatkan oleh terbentuknya *protective film* nanopartikel. Dengan mengubah gesekan *sliding* / geser menjadi gesekan *rolling* / bergulir (diilustrasikan pada **Gambar 5 A**), Nanopartikel hBN yang ditambahkan mencegah kontak langsung dengan menjadi lapisan pelindung antara-permukaan gesek saat bersirkulasi [45]. Jika dibandingkan dengan beberapa nanopartikel lainnya, hBN memiliki sifat anti-wear lebih baik berdasarkan beberapa studi seperti PTFE [12], dan Aluminium Oksida [46]. Grafik perbandingan ini menunjukkan pengaruh konsentrasi NbN (Niobium Nitride) terhadap



**Gambar 4.** Grafik perbandingan kandungan *wear metal* setelah uji durabilitas pada kondisi hBN 0% dengan hBN 0.5%

kekerasan permukaan berbagai logam mulia dan industri. Data mengindikasikan bahwa pada konsentrasi 0% (tanpa NbN), besi (Fe) menunjukkan kekerasan tertinggi sebesar 183  $\mu\text{m}$  dengan penurunan signifikan menjadi 55  $\mu\text{m}$  pada konsentrasi NbN 0,5%, sementara logam-logam lainnya seperti tembaga (Cu), aluminium (Al), krom (Cr), dan timah (Sn) menampilkan kekerasan yang relatif rendah dan konsisten pada kedua konsentrasi, masing-masing berkisar antara 5-20  $\mu\text{m}$ . Pola ini mengungkapkan bahwa penambahan NbN berpengaruh dramatis terhadap besi dengan mengurangi kekerasan permukaannya secara substansial, mungkin disebabkan oleh mekanisme pengerasan presipitat yang mengubah struktur mikro logam induk, sedangkan efek minimal pada logam-logam lain mencerminkan sifat material yang berbeda dan interaksi kimia yang kurang responsif terhadap penambahan fasa niobium nitride pada sistem coating atau komposit tersebut.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel heksagonal boron nitrida (hBN) sebesar 0,5% massa pada minyak pelumas SAE 40 memberikan efek protektif yang signifikan terhadap durabilitas mesin diesel satu silinder berbahan bakar biodiesel B30 selama operasi 200 jam.



**Gambar 5.** Mekanisme pelumasan nanopartikel

Mekanisme perlindungan keausan terjadi melalui pembentukan lapisan film pelindung (protective film) yang mengubah karakteristik gesekan dari sliding friction menjadi rolling friction, sehingga meminimalkan kontak langsung antara permukaan yang bergesekan. Fenomena "mending effect" yang diobservasi pada permukaan bantalan dan dinding silinder berindikasikan bahwa nanopartikel hBN mampu mengisi dan meratakan ceruk-ceruk akibat keausan, menciptakan lapisan pelindung yang lebih halus dan kohesif. Data kuantitatif dari analisis kandungan wear metal menunjukkan pengurangan signifikan pada kandungan besi (Fe) sebesar 69%, krom (Cr) 81%, dan tin (Sn) 75% pada sampel minyak pelumas dengan aditif hBN, sementara pengukuran perubahan gap ring piston dan massa komponen mesin mengkonfirmasi keausan yang lebih rendah pada semua jenis ring piston.

### Kesimpulan

Penelitian ini secara konsisten mendemonstrasikan bahwa penambahan nanopartikel hexagonal boron nitride (hBN) tereksfoliasi sebagai aditif pelumas memberikan kontribusi signifikan dalam mitigasi keausan komponen mesin diesel berbahan bakar biodiesel B30 selama pengujian durabilitas jangka panjang. Data empiris dari 200 jam operasi menunjukkan bahwa mekanisme pelumasan nano-aditif hBN bekerja melalui pembentukan lapisan pelindung pada permukaan gesekan, yang secara simultan mereduksi laju keausan, meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar, dan mempertahankan stabilitas parameter kinerja mesin. Temuan ini memperkuat hipotesis bahwa eksfoliasi hBN menghasilkan nanopartikel dengan rasio aspek tinggi yang optimal untuk penetrasi ke dalam celah tribologi dan pembentukan film anti-wear yang robust. Implikasi praktis dari penelitian ini tidak hanya relevan bagi industri manufaktur mesin diesel nasional dan internasional, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan teknologi bahan bakar nabati berkelanjutan dengan efisiensi operasional yang lebih tinggi. Penelitian lebih lanjut direkomendasikan untuk mengeksplorasi komposisi optimal hBN dan interaksi sinergis dengan aditif pelumas konvensional guna memaksimalkan performa tribologi dalam berbagai kondisi operasi ekstrem.

### Daftar Pustaka

- [1] H. I. Kim, J. Shon, and K. Lee, "A study of fuel economy and exhaust emission according to engine coolant and oil temperature," *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 255–268, 2013, doi: 10.1299/jtst.8.255.
- [2] K. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions," Sep. 01, 2017, Tsinghua University Press. doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.
- [3] K. Holmberg and A. Erdemir, "The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars," *Tribol Int*, vol. 135, pp. 389–396, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.024.
- [4] J. Luo and X. Zhou, "Superlubricative engineering—Future industry nearly getting rid of wear and frictional energy consumption," Aug. 01, 2020, Tsinghua University Press. doi: 10.1007/s40544-020-0393-0.
- [5] G. Vaitkunaite, C. Espejo, B. Thiebaut, A. Neville, and A. Morina, "Low friction tribofilm formation and distribution on an engine cylinder tested with MoDTC-containing low viscosity engine lubricants," *Tribol Int*, vol. 171, p. 107551, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107551.
- [6] L. Guan, X. L. Feng, G. Xiong, and J. A. Xie, "Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring," *Sens Actuators A Phys*, vol. 168, no. 1, pp. 22–29, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.03.033.
- [7] Theo. Mang and Wilfried. Dresel, *Lubricants and lubrication*. Wiley-VCH, 2007.
- [8] M. S. Charoo and M. F. Wani, "Tribology in Industry Tribological Properties of IF-MoS 2 Nanoparticles as Lubricant Additive on Cylinder Liner and Piston Ring Tribo-pair," 2016. [Online]. Available: www.tribology.fink.rs
- [9] W. Ahmed Abdalgilil Mustafa, F. Dassenoy, M. Sarno, and A. Senatore, "A review on potentials and challenges of nanolubricants as promising lubricants for electric vehicles," *Lubrication Science*, vol. 34, no. 1, pp. 1–29, Jan. 2022, doi: 10.1002/lis.1568.



- [10] A. Devaraj, M. Nagappan, D. Yogaraj, O. Prakash, Y. A. Rao, and A. Sharma, "Influence of nano-additives on engine behaviour using diesel-biodiesel blend," *Mater Today Proc*, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.598.
- [11] J. Zhao, Y. Huang, Y. He, and Y. Shi, "Nanolubricant additives: A review," Oct. 01, 2021, Tsinghua University. doi: 10.1007/s40544-020-0450-8.
- [12] P. Gangwani, M. K. Gupta, and J. Bijwe, "Synergism between particles of PTFE and hBN to enhance the performance of oils," *Wear*, vol. 384–385, pp. 169–177, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.01.053.
- [13] A. v. Bondarev, A. Fraile, T. Polcar, and D. v. Shtansky, "Mechanisms of friction and wear reduction by h-BN nanosheet and spherical W nanoparticle additives to base oil: Experimental study and molecular dynamics simulation," *Tribol Int*, vol. 151, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106493.
- [14] M. I. H. C. Abdullah, M. F. bin Abdollah, H. Amiruddin, N. Tamaldin, and N. R. M. Nuri, "Optimization of tribological performance of hBN/AL2O3 nanoparticles as engine oil additives," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 313–319. doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.185.
- [15] S. Shahnazar, S. Bagheri, and S. B. Abd Hamid, "Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives," Jan. 30, 2016, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.
- [16] A. Kotia, K. Chowdary, I. Srivastava, S. K. Ghosh, and M. K. A. Ali, "Carbon nanomaterials as friction modifiers in automotive engines: Recent progress and perspectives," Jul. 15, 2020, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.molliq.2020.113200.
- [17] A. Tomala et al., "Synergisms and antagonisms between MoS2 nanotubes and representative oil additives under various contact conditions," *Tribol Int*, vol. 129, pp. 137–150, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.005.
- [18] S. Shahnazar, S. Bagheri, and S. B. Abd Hamid, "Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 3153–3170, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.
- [19] W. Dai, B. Kheireddin, H. Gao, and H. Liang, "Roles of nanoparticles in oil lubrication," *Tribol Int*, vol. 102, pp. 88–98, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
- [20] O. Tevet, P. Von-Huth, R. Popovitz-Biro, R. Rosentsveig, H. D. Wagner, and R. Tenne, "Friction mechanism of individual multilayered nanoparticles," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108, no. 50, pp. 19901–19906, Dec. 2011, doi: 10.1073/pnas.1106553108.
- [21] M. Kalin, J. Kogovšek, and M. Remškar, "Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS2 nanotubes as potential oil additives," *Wear*, vol. 280–281, pp. 36–45, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.wear.2012.01.011.
- [22] C. Kumara, D. N. Leonard, H. M. Meyer, H. Luo, B. L. Armstrong, and J. Qu, "Palladium Nanoparticle-Enabled Ultrathick Tribofilm with Unique Composition," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 10, no. 37, pp. 31804–31812, Sep. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b11213.
- [23] S. Zhang, L. Hu, D. Feng, and H. Wang, "Anti-wear and friction-reduction mechanism of Sn and Fe nanoparticles as additives of multialkylated cyclopentanes under vacuum condition," *Vacuum*, vol. 87, pp. 75–80, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.vacuum.2012.07.009.
- [24] J. Padgurskas, R. Rukuiza, I. Prosyčevs, and R. Kreivaitis, "Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles," *Tribol Int*, vol. 60, pp. 224–232, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.triboint.2012.10.024.
- [25] J. M. Liñeira del Río, E. R. López, and J. Fernández, "Synergy between boron nitride or graphene nanoplatelets and tri(isobutyl)ethylphosphonium diethylphosphate ionic liquid as lubricant additives of triisotridecyltrimellitate oil," *J Mol Liq*, vol. 301, p. 112442, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.112442.
- [26] J. M. Liñeira del Río, E. R. López, and J. Fernández, "Tribological properties of graphene nanoplatelets or boron nitride nanoparticles as additives of a polyalphaolefin base oil," *J Mol Liq*, vol. 333, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.molliq.2021.115911.
- [27] O. N. Çelik, N. Ay, and Y. Göncü, "Effect of Nano Hexagonal Boron Nitride Lubricant Additives on the Friction and Wear Properties of AISI 4140 Steel," *Particulate Science and Technology*, vol. 31, no. 5, pp. 501–506, Sep. 2013, doi: 10.1080/02726351.2013.779336.
- [28] Y. Wang, Z. Wan, L. Lu, Z. Zhang, and Y. Tang, "Friction and wear mechanisms of castor oil with addition of hexagonal boron nitride nanoparticles," *Tribol Int*, vol. 124, pp. 10–22, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.03.035.
- [29] H. Baş and Y. E. Karabacak, "Investigation of the Effects of Boron Additives on the Performance of Engine Oil," *Tribology Transactions*, vol. 57, no. 4, pp. 740–748, Jul. 2014, doi: 10.1080/10402004.2014.909549.
- [30] T. Akbiyik, N. Kahraman, and T. Taner, "Investigation of the effect of boron additive to lubricating oil on engine performance, exhaust, and emissions," *Fuel*, vol. 312, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122931.
- [31] M. Ilman Hakimi Chua Abdullah, M. Fadzli Bin Abdollah, H. Amiruddin, N. Tamaldin, N. Rashid Mat Nuri, and A. Rafeq Saleman, "The hBN Nanoparticles as an Effective Engine Oil Additive to Enhance the Durability and Performance of a Small Diesel Engine," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 103–112, 2017.
- [32] N. Thachnatharen, M. Khalid, A. Arulraj, and N. Sridewi, "Tribological performance of hexagonal boron nitride (hBN) as nano-additives in military grade diesel engine oil," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 70–73. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.145.
- [33] N. Nomède-Martyr, M. Vitulin, H. Joseph, and P. Thomas, "Moringa oil with graphite and hexagonal boron nitride particles as additives for lubrication," *Diam Relat Mater*, vol. 124, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.diamond.2022.108930.
- [34] Q. Wan, Y. Jin, P. Sun, and Y. Ding, "Tribological behaviour of a lubricant oil containing boron nitride nanoparticles," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 1038–1045. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.226.
- [35] S. Senyk, A. Chodkiewicz, K. Gocman, B. Szcześniak, and T. Kaldowski, "Hexagonal Nano and Micro Boron Nitride: Properties and Lubrication Applications," *Materials*, vol. 15, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/ma15030955.
- [36] Yanmar, "Yanmar TF Series." Accessed: Dec. 30, 2022. [Online]. Available: [https://www.yanmar.com/en\\_id/engine/products/diesel/h\\_watercooled/tfseries/](https://www.yanmar.com/en_id/engine/products/diesel/h_watercooled/tfseries/)

- [37] Y. Ali and M. A. Hanna, "Durability Testing of A Diesel Fuel, Methyl Tallowate, And Ethanol Blend In a Cummins N14-410 Diesel Engine," Transactions of the ASAE, vol. Vol. 39(3), pp. 793–797, 1996.
- [38] C. L. Peterson, J. C. Thompson, and J. S. Taberski, "One-Thousand-Hour Engine Durability Test With Hysee And Using A 5x-EMA Test Cycle," Transactions of the ASAE, vol. VOL. 42(1), pp. 23–30, 1999.
- [39] S. Sae, M. Ziejewski, H. J. Goettler, H. Haines, and C. Huang, "EMA Durability Tests on High Oleic Sunflower and Safflower Oils in Diesel Engines," 2018.
- [40] A. Z. M. Fathallah and F. Pinto, "The Influence of NaCl dissolved on biodiesel of used cooking oil on performance and its degradation of main components of diesel engine," IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 972, no. 1, p. 012030, Jan. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/972/1/012030.
- [41] K. Nantha Gopal and R. Thundil Karuppa Raj, "Effect of pongamia oil methyl ester-diesel blend on lubricating oil degradation of di compression ignition engine," Fuel, vol. 165, pp. 105–114, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.031.
- [42] J. S. Evans, "Where Does All That Metal Come From?," WearCheck Technical Bulletin Issue 47, 2010.
- [43] A. Kotia, S. Borkakoti, and S. K. Ghosh, "Wear and performance analysis of a 4-stroke diesel engine employing nanolubricants," Particuology, vol. 37, pp. 54–63, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.partic.2017.05.016.
- [44] Yanmar, Yanmar Service Manual: TF Series. Tokyo. Accessed: Dec. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.yanmar.com/media/id/com/maintenance/catalog/100495.pdf>
- [45] Bureau for Chemical Substances, "CLH Report For Boric Acid," Lodz, Poland, 2013.
- [46] M. Waqas, R. Zahid, M. U. Bhutta, Z. A. Khan, and A. Saeed, "A review of friction performance of lubricants with nano additives," Nov. 01, 2021, MDPI. doi: 10.3390/ma14216310.

### **Ucapan penghargaan**

*"Tidak tersedia"*

### **Pernyataan Penulis**

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini. Semua penulis menyetujui penerbitan artikel ini.

### **Lampiran**

*"Tidak tersedia"*