

Evaluasi Kinerja Mesin Diesel B30 Dengan Nano Aditif Hexagonal Boron Nitrida (hBN) Hasil Eksfoliasi

M Faizur Rijal Azhad^{1*}, Parman², Friska Intan Sukarno³, Rahmat Basya Shahryts Tsany⁴

^{1,2,3}Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia

⁴Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia

*Corresponding Author: faizurrazhad@ppns.ac.id

Riwayat Artikel

Diserahkan: 18 November 2025

Direvisi: 9 Januari 2026

Diterima: 9 Februari 2026

Dipublikasi: 31 Mei 2026

Abstrak

Gesekan internal pada mesin pembakaran dalam berkontribusi besar terhadap kehilangan energi dan peningkatan konsumsi bahan bakar. Untuk meningkatkan efisiensi energi dan mendukung pemanfaatan biodiesel B30, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan nanopartikel Hexagonal Boron Nitride (hBN) hasil eksfoliasi sebesar 0,5% massa sebagai aditif pelumas. Pengujian dilakukan pada mesin diesel satu silinder menggunakan Durability Test selama 200 jam mengikuti siklus Engine Manufacturers Association (EMA), dengan perbandingan pelumas tanpa aditif (hBN 0%) dan pelumas dengan aditif (hBN 0,5%). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan hBN meningkatkan performa termomekanis mesin, ditunjukkan oleh kenaikan rata-rata daya sebesar 1,56% dan peningkatan torsi maksimum sebesar 3,6%. Temuan utama penelitian ini adalah penurunan rata-rata Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) sebesar 6,36% pada kondisi rated power. Perbedaan kinerja tersebut terkonfirmasi signifikan secara statistik ($p < 0,05$), dengan deviasi data yang berada dalam batas pengulangan pengujian. Peningkatan efisiensi ini dikaitkan dengan mekanisme pelumasan rolling nano dari partikel hBN yang efektif menurunkan gesekan internal. Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa aditif hBN berpotensi meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mendukung keberlanjutan operasional mesin diesel berbahan bakar biodiesel B30.

Kata kunci: Hexagonal Boron Nitrida; Aditif Pelumas; Performa Mesin; Uji Diesel.

Abstract

Internal friction in internal combustion engines is a major contributor to energy losses and increased fuel consumption. To improve energy efficiency and support the utilization of B30 biodiesel, this study aims to evaluate the effect of adding exfoliated Hexagonal Boron Nitride (hBN) nanoparticles at 0.5 wt.% as a lubricant additive. Experiments were conducted on a single-cylinder diesel engine using a 200-hour Durability Test based on the Engine Manufacturers Association (EMA) cycle, comparing base oil without additives (hBN 0%) and oil with hBN additives (hBN 0.5%). The results show that hBN addition enhances engine thermo-mechanical performance, indicated by an average increase in engine power of 1.56% and a maximum torque improvement of 3.6%. The most significant outcome is an average reduction in Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) of 6.36% at rated power conditions. These improvements are statistically significant ($p < 0.05$).

with data dispersion remaining within acceptable experimental uncertainty. The efficiency gains are attributed to the nano-rolling lubrication mechanism of hBN particles, which effectively reduces internal friction. Overall, the findings confirm the strong potential of hBN as an anti-friction lubricant additive to improve fuel efficiency and support the sustainable operation of B30-fueled diesel engines.

Keywords: Hexagonal Boron Nitride; Nanolubricant; Engine Performance; Durability Test; Diesel Engine.

1. 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 Exa Joule) 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 CO₂ secara global sebanyak 1.460 MtCO₂ dan dapat menjadi 3.140 MtCO₂ 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 *tribology* dari dua sliding surfaces dengan menghasilkan film tipis di antara keduanya. Pelumas sendiri merupakan campuran multikomponen dari berbagai bahan

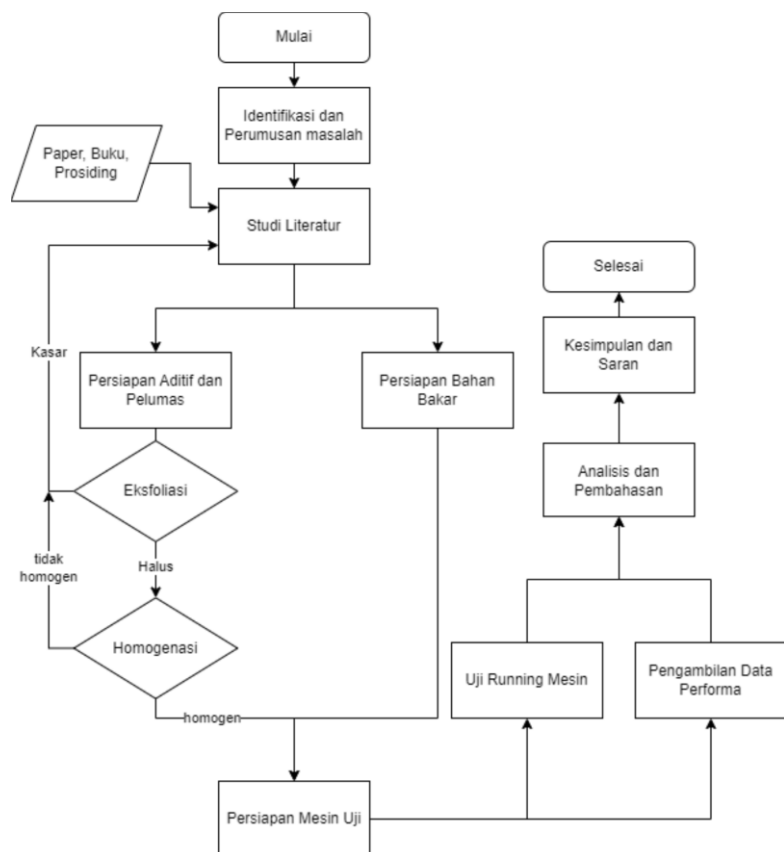
dasar minyak dan bahan tambahan (aditif) [6] dalam konsentrasi rasio umumnya 9:1 antara minyak dasar dan aditif (Liñeira del Río, López dan Fernández, 2021) atau hingga 25% kandungan aditif [7]. Berbagai jenis nanopartikel sering didispersikan sebagai aditif minyak pelumas untuk mengurangi gesekan dan keausan [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. 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], [32], [33], [34], [35]. 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

bakar nabati seperti B30 masih belum banyak dieksplorasi secara mendalam.

Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa nanopartikel hexagonal boron nitride (hBN) efektif menurunkan gesekan dan meningkatkan performa mesin diesel, namun sebagian besar kajian tersebut masih terbatas pada pengujian jangka pendek, menggunakan bahan bakar diesel konvensional, serta belum mengevaluasi perilaku pelumas dalam pengujian durabilitas jangka panjang. Hingga saat ini, kajian yang secara sistematis meneliti pengaruh aditif hBN hasil eksfoliasi terhadap performa dan konsumsi bahan bakar mesin diesel berbahan bakar biodiesel B30



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

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

dalam uji durabilitas berbasis siklus Engine Manufacturers Association (EMA) masih sangat terbatas. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan uji durabilitas 200 jam berbasis siklus EMA untuk mengevaluasi kinerja mesin diesel satu silinder berbahan bakar B30 yang menggunakan pelumas dengan aditif

nanopartikel hBN hasil eksfoliasi, dengan fokus tidak hanya pada peningkatan daya dan torsi, tetapi juga pada analisis stabilitas Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) selama operasi jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan 0,5% massa nanopartikel hBN hasil eksfoliasi sebagai aditif pelumas terhadap performa termomekanis dan efisiensi bahan bakar mesin diesel berbahan bakar B30 selama pengujian durabilitas jangka panjang.

2. Metode

Persiapan Bahan Bakar

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 Bio Solar B30

Karakteristik	Satuan	Min	Max	Metode Uji
Angka Setana, atau	-	48	-	ASTM D613
Indeks Setana	-	45	-	ASTM D4737
Berat Jenis (pada suhu 15 °C)	kg/m ³	815	880	ASTM D4052 / D1298
Viskositas (pada suhu 40 °C)	mm ² /s	2.0	5.0	ASTM D445
Kandungan Sulfur	% m/m	-	0.25	ASTM D4294 / D5453 / D2622
Distilasi 90% vol penguapan	°C	-	370	ASTM D86
Titik Nyala	°C	52	-	ASTM D93
Titik Kabut, atau	°C	-	18	ASTM D2500 / D5773
Titik Tuang	°C	-	18	ASTM D97 / D5949
Residu Karbon	% m/m	-	0.1	ASTM D189 / D4530
Kandungan Air	mg/kg	-	425 dan dilaporkan	ASTM D6304 / D1744
Kandungan FAME	% v/v	30	-	ASTM D7806 / D7371
Korosi Bilah Tembaga	kelas	-	Kelas 1	ASTM D130
Kandungan Abu	% m/m	-	0.01	ASTM D482
Kandungan Sedimen	% m/m	-	0.01	ASTM D473
Bilangan Asam Kuat	mg KOH/g	0	-	ASTM D664
Bilangan Asam Total	mg KOH/g	-	0.6	ASTM D664
Penampilan Visual		Jernih & Terang		Visual
Warna	No. ASTM	-	3	ASTM D1500
Lubrisitas (HFRR wear scar dia. @ 60 °C)	micron	-	460	ASTM D6079
Kestabilan Oksidasi	jam	35	-	EN 15751
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 penggantian 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 100Watt hingga 50 buah

(variasi pembebanan), Dimana diilustrasikan pada Gambar 2.

Uji performa mesin sebelum uji *running* didapatkan daya tertinggi pada putaran mesin 2200 rpm dicapai pada beban 3500Watt 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 3000Watt 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.

Uji Running Mesin

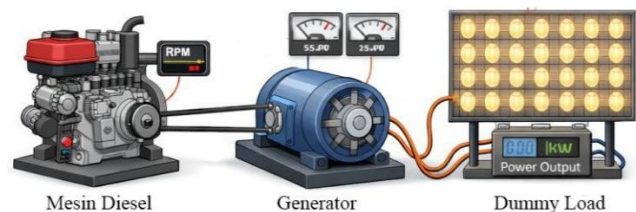
Percobaan yang dilakukan menggunakan mesin diesel Yanmar TF 85 MH dengan bahan bakar biodiesel B30. Percobaan dilakukan dengan variasi putaran mesin dan pembebanan. Pada tahun 1982, Engine Manufacture Association (EMA) telah menentukan bahwa untuk menguji daya tahan mesin diesel adalah dengan menggunakan 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 ([37], [38], [39], [40]), sebagai berikut:

- *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 1125Watt (25% dari torsi maksimum) dan dilakukan selama 30 menit.
- *Rated power*, mesin dioperasikan pada putaran 2200 rpm dengan pembebanan 3000Watt dan dilakukan selama 60 menit.
- *Maximum torque*, mesin dioperasikan pada putaran 1800 rpm dengan pembebanan 4500Watt dan dilakukan selama 60 menit.

Tabel 2. Spesifikasi Yanmar TF 85 MH

Karakteristik	Spesifikasi
Type of Engine	Water cooled 4 stroke horizontal diesel motor
Combustion System	Direct Injection
Number of Cylinder	One Cylinder
Bore x Stroke	85 mm x 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 ²

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 x L x T)	672 mm x 330,5 mm x 496 mm
Empty Weight	93 kg
Type of Engine	Water cooled 4 stroke horizontal diesel motor
Combustion System	Direct Injection
Number of Cylinder	One Cylinder
Bore x Stroke	85 mm x 87 mm
Volume of Cylinder	493 cc



Gambar 2. Ilustrasi Rangkaian Uji Mesin

Pengambilan Data Performa

Waktu untuk menghabiskan spesifik bahan bakar, tegangan, voltase, dan putaran generator diukur pada setiap siklus uji EMA. Pengumpulan data tersebut sebagai penunjang yang digunakan untuk menganalisis kinerja pada mesin diesel satu silinder empat langkah. Temperatur ruangan, knalpot, beserta pendingin juga diambil sebagai data tambahan. Alat yang digunakan dalam pengambilan data berupa:

- Gelas ukur, untuk mengukur konsumsi bahan bakar.
- Multimeter digital, untuk mengukur tegangan beserta voltase output generator.
- Tachometer, untuk mengukur putaran mesin beserta putaran generator.
- Susunan lampu halogen 100Watt hingga 50 buah sebagai variasi pembebanan.

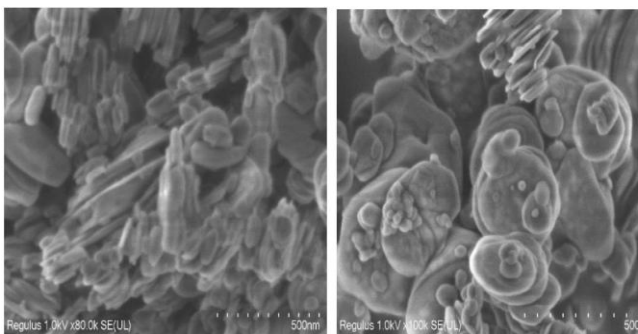
Persiapan Aditif dan Pelumas

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 180oC
- Sonikasi selama 30 menit
- Sentrifugasi untuk memisahkan hBN dengan pelarut
- Pencucian dengan aquades, lalu dilakukan penyaringan
- Endapan dikeringkan

Gambar 3 memperlihatkan 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. Pengujian dibagi menjadi 2 variabel bebas, yaitu minyak pelumas baru tanpa aditif HBN (hBN 0%) dan minyak pelumas baru sebanyak 99.5% dengan tambahan 0.5% aditif hBN (hBN 0.5%)



Gambar 3. Hasil FESEM hBN sebelum eksfoliasi (kiri) dan setelah eksfoliasi (kanan)

Kinerja Mesin Diesel

Kinerja mesin erat hubungannya dengan daya mesin yang dihasilkan serta daya guna dari mesin tersebut. Kinerja dari suatu mesin kendaraan umumnya ditunjukkan dalam tiga besaran, yaitu tenaga yang dapat dihasilkan, torsi yang dihasilkan, dan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi. Untuk menghitung daya mesin diesel *four stroke* menggunakan formula persamaan (1), sementara itu untuk menghitung μ_{belt} adalah dengan persamaan (2).

$$P = \frac{V \times l \times \cos\theta}{\mu_{Generator} \times \mu_{Belt}} \quad (1)$$

$$\mu_{Belt} = \frac{\text{Putaran Nyata Generator}}{\text{Putaran Teori Generator}} \quad (2)$$

Untuk menghitung torsi dapat menggunakan rumus persamaan (3),

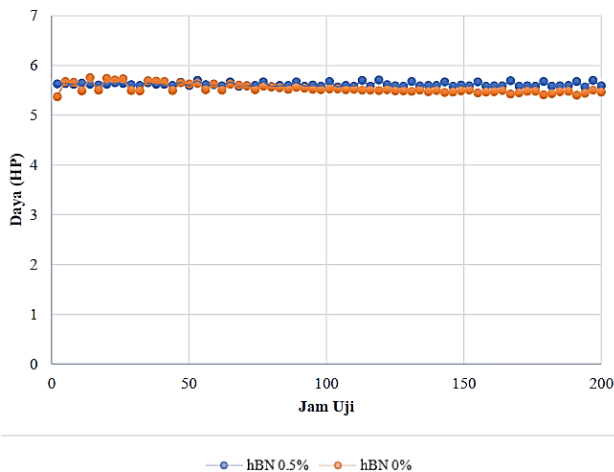
$$T = \frac{P}{2\pi \times Rps} \quad (3)$$

sehingga untuk menghitung *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) dapat menerapkan persamaan (4).

$$SFOC = 3600 \times \frac{Mb}{BHP} \times t = \frac{\text{Bahan Bakar (kg)}}{HP \times \text{jam}} \quad (4)$$

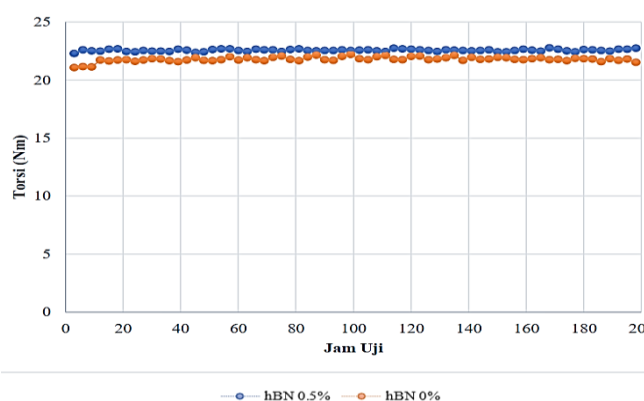
3. Hasil dan Pembahasan

Saat uji durabilitas EMA, didapatkan data pengujian putaran mesin, putaran generator, *Fuel Oil Consumption* (FOC), pembebanan, tegangan output generator, dan arus output generator pada pengujian. Data efisiensi belt didapatkan melalui perhitungan dengan meninjau data putaran mesin dan putaran generator (Persamaan 2). Data daya mesin didapatkan melalui perhitungan dengan meninjau data tegangan dan arus output generator generator (Persamaan 1). Data torsi mesin didapatkan melalui perhitungan dengan meninjau data putaran mesin dan daya mesin (Persamaan 3). Data SFOC didapatkan melalui perhitungan dengan meninjau data FOC dan daya mesin (Persamaan 4).



Gambar 4. Grafik daya mesin terhadap jam uji

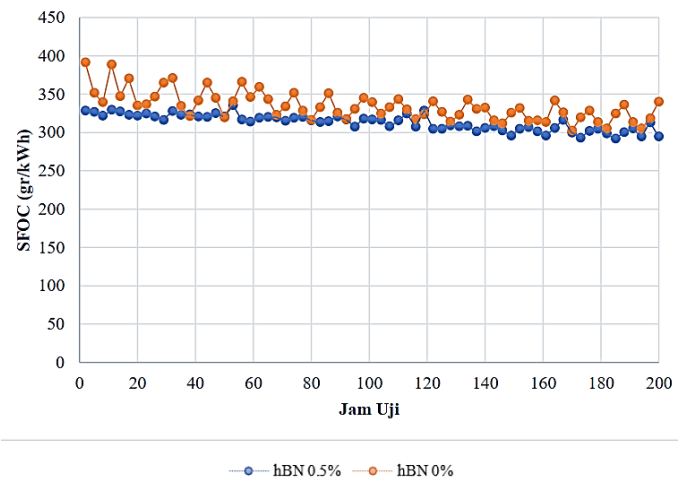
Berdasarkan grafik pada Gambar 4 didapatkan data daya mesin selama 200 jam. Pada uji pertama dengan kondisi minyak pelumas tanpa aditif Boron (hBN 0%), didapatkan daya kalkulasi rata rata sebesar 5.53 HP, daya terendah sebesar 5.37 HP pada jam ke-2, dan daya tertinggi sebesar 5.75 HP pada jam ke-14. Pada uji kedua didapatkan daya kalkulasi rata rata sebesar 5.62 HP, daya terendah sebesar 5.56 HP pada jam ke-68, dan daya tertinggi sebesar 5.71 HP pada jam ke-167. Perbandingan daya pada grafik Gambar 2 ini didapatkan pada kondisi daya rated standar uji durabilitas EMA. Performa mesin dengan aditif hBN memiliki daya mesin rata rata sebesar 1.56% lebih tinggi dibandingkan tanpa aditif hBN.



Gambar 5. Grafik daya mesin terhadap jam uji

Di grafik pada Gambar 5 didapatkan data torsi mesin selama 200 jam cenderung stabil selama uji durabilitas pertama (tanpa aditif

hBN). Pada running pertama dengan kondisi minyak pelumas tanpa aditif Boron, didapatkan torsi kalkulasi rata rata sebesar 21.78 Nm, torsi terendah sebesar 21.07 Nm pada jam ke-2, dan torsi tertinggi sebesar 22.21 Nm pada jam ke-99. Pada uji kedua didapatkan torsi kalkulasi rata rata sebesar 22.55 Nm, torsi terendah sebesar 22.29 Nm pada jam ke-2, dan torsi tertinggi sebesar 22.77 Nm pada jam ke-198. Perbandingan torsi pada Gambar 3 ini didapatkan pada kondisi torsi maksimum standar uji durabilitas EMA. Performa mesin dengan aditif hBN memiliki torsi maksimum rata rata sebesar 3.6% lebih tinggi dibandingkan tanpa aditif hBN.

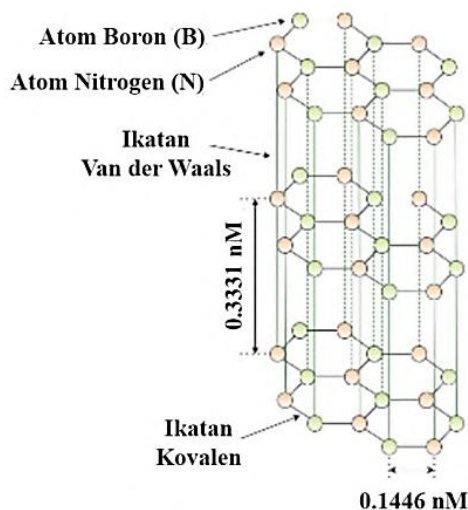


Gambar 6. Grafik SFOC terhadap jam uji

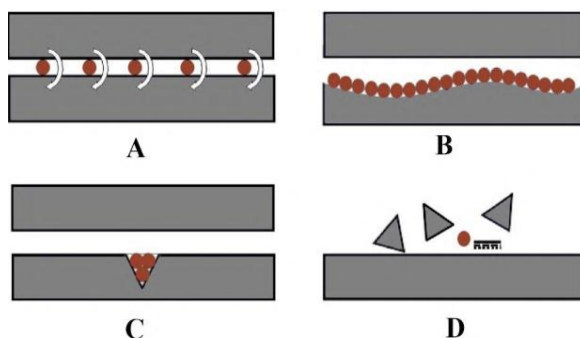
Pada data dengan generator pertama, output tegangan dan arus cenderung lebih rendah saat mulai running, lalu meningkat setelah siklus EMA pertama (3 jam). Hal ini terjadi pada putaran mesin yang sama (2200 rpm). Pada running pertama dengan kondisi minyak pelumas tanpa aditif Boron, didapatkan SFOC kalkulasi rata rata sebesar 334.35 gr/kWh, SFOC terendah sebesar 302.15 gr/kWh pada jam ke-182, dan SFOC tertinggi sebesar 391.16 gr/kWh pada jam ke-2. Pada uji kedua dengan tambahan aditif Boron sebesar 0.5% massa, didapatkan SFOC kalkulasi rata rata sebesar 313.08 gr/kWh, SFOC terendah sebesar 291.98 gr/kWh pada jam ke-185, dan SFOC tertinggi sebesar 335.53 gr/kWh pada jam ke-53.

Perbandingan SFOC pada grafik Gambar 6 ini didapatkan pada kondisi daya rated standar uji durabilitas EMA. Performa mesin dengan aditif hBN memiliki daya mesin rata rata sebesar 6.36% lebih rendah dibandingkan tanpa aditif hBN.

SFOC cenderung lebih tinggi pada saat mesin dingin (awal pengujian pada pagi hari), dan viskositas minyak pelumas menurun dengan meningkatnya temperatur [41]. Namun terjadi fenomena dimana dalam 4 siklus EMA (12 jam), SFOC pada siklus ke-4 cenderung meningkat. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya, dimana gaya gesek komponen mesin akan kembali meningkat setelah suhu minyak pelumas melwati nilai tertentu [1]. Fluktuasi daya pada Gambar 2 mempengaruhi grafik SFOC pada Gambar 6.

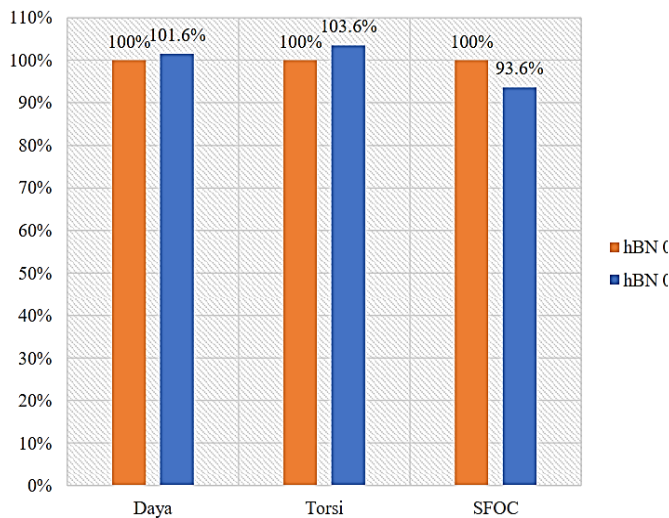


Gambar 7. Ilustrasi struktur laminar hBN [42],[43],[44]



Gambar 8. Mekanisme Pelumasan Nanopartikel [42]

Kinerja mesin dengan tambahan hBN 0.5% massa sebagai aditif pelumas meningkat sebesar 1.56% untuk daya rated rata rata, 3.6% untuk torsi maksimum rata rata, dan terjadi penurunan sebesar 6.36% untuk SFOC rated rata rata dibanding dengan kinerja mesin tanpa tambahan aditif hBN. Perbandingan kinerja secara persentase diilustrasikan pada Gambar 9. Penambahan hBN pada minyak pelumas dengan kadar 0.5% massa menjadikan SFOC mesin cenderung lebih stabil selama uji durabilitas. SFOC lebih rendah dengan penambahan hBN sbagai aditif pelumas disebabkan oleh partikel hBN yang mengubah efek sliding / geser antara pelumas dan permukaan logam komponen mesin menjadi efek bantalan roda (rolling) nano dengan ilustrasi pada Gambar 8 [45]. Jika dilihat pada Gambar 7, terdapat jarak interplanar antara lapisan yang berdekatan dari hBN, sehingga hanya terjadi interaksi lemah antara atom-atom lapisan ini berupa gaya Van Der Waals. Hal ini menyebabkan pergeseran (sliding) antar-layer nanopartikel yang baik dan tahanan gesek internal yang rendah [46], [47]. Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penambahan nanopartikel hBN pada minyak pelumas dapat menurunkan COF pelumas itu sendiri [13], [25], [26], [31], [32], [34]. Dengan injeksi volume bahan bakar yang sama, mesin dengan gesekan internal lebih rendah akan menghasilkan daya yang lebih baik [31]. Grafik Gambar 4 menunjukkan efek rolling ini lebih signifikan pada awal siklus uji EMA, dimana perbedaan SFOC antara pelumas hBN0% dan hBN 0.5% lebih signifikan pada awal siklus EMA, dan lebih rendah pada siklus ke-3 dan ke-4 EMA. Lebih rendahnya gesekan internal komponen mesin juga berpengaruh pada kinerja berupa torsi dan daya mesin, namun dengan pembebanan dan putaran mesin yang relatif sama antara uji hBN 0% dengan hBN 0.5%, sehingga pengaruh rendahnya COF ini lebih signifikan pada SFOC.



Gambar 9. Grafik persentase kinerja mesin rata-rata antara hBN 0% dengan hBN 0.5%

Hasil uji durabilitas yang komprehensif ini secara meyakinkan menunjukkan bahwa penambahan 0.5% massa Hexagonal Boron Nitride (hBN) sebagai aditif pada minyak pelumas memberikan peningkatan kinerja yang signifikan pada mesin. Peningkatan daya mesin rata-rata sebesar 1.56% dan torsi maksimum rata-rata sebesar 3.6% menegaskan peran hBN dalam mengurangi gesekan internal, yang pada gilirannya mengoptimalkan transfer energi. Temuan yang paling menonjol adalah penurunan SFOC rata-rata sebesar 6.36%. Penurunan ini—bersama dengan stabilisasi SFOC selama periode pengujian, terutama pada kondisi daya rated—secara langsung membuktikan efektivitas nanopartikel hBN. Mekanisme pelumasan rolling nano, seperti yang diilustrasikan oleh struktur lamelar hBN yang memfasilitasi pergeseran antar-lapisan dengan hambatan gesek rendah, berfungsi sebagai kunci untuk efisiensi termal dan mekanik yang lebih baik. Implikasi dari temuan ini sangat besar, menawarkan jalur yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan daya tahan mesin pada aplikasi nyata, sekaligus mendukung praktik operasional yang lebih berkelanjutan.

Meskipun telah terbukti efektif pada konsentrasi 0.5% massa, penelitian ini membuka pintu untuk eksplorasi lebih lanjut. Penting untuk menyelidiki secara mendalam stabilitas jangka

panjang dan karakteristik viskositas minyak pelumas yang diperkaya hBN pada berbagai kondisi operasional, termasuk variasi temperatur dan beban yang lebih ekstrem. Penelitian di masa depan dapat berfokus pada pengujian konsentrasi hBN yang berbeda untuk mengidentifikasi titik optimal antara peningkatan kinerja dan potensi aglomerasi nanopartikel. Selain itu, analisis aus pada komponen mesin, seperti liner silinder dan ring piston, pasca-uji durabilitas akan memberikan wawasan kuantitatif mengenai sejauh mana sifat anti-aus hBN berkontribusi terhadap perpanjangan usia pakai mesin. Dengan memanfaatkan pemahaman yang lebih dalam tentang interaksi *tribology* ini, komunitas ilmiah dan industri dapat mempercepat pengembangan pelumas berkinerja tinggi yang tidak hanya meningkatkan daya dan efisiensi, tetapi juga secara fundamental mengubah paradigma ketahanan mesin.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel hexagonal boron nitride (hBN) hasil eksfoliasi sebesar 0,5% massa ke dalam minyak pelumas memberikan peningkatan kinerja yang konsisten pada mesin diesel satu silinder berbahan bakar biodiesel B30 selama uji durabilitas 200 jam berbasis siklus Engine Manufacturers Association (EMA). Hasil pengujian menunjukkan peningkatan rata-rata daya sebesar 1,56% pada kondisi rated power dan peningkatan torsi maksimum sebesar 3,6%, serta penurunan rata-rata Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) sebesar 6,36% dibandingkan pelumas tanpa aditif. Temuan ini menegaskan kontribusi ilmiah utama penelitian, yaitu pembuktian bahwa hBN hasil eksfoliasi berfungsi efektif sebagai nano-lubricant dalam menurunkan gesekan internal dan meningkatkan efisiensi termomekanis mesin diesel berbahan bakar biodiesel, tidak hanya pada pengujian sesaat tetapi juga dalam operasi jangka panjang. Dengan demikian, penelitian ini memberikan

dasar eksperimental yang kuat bagi pemanfaatan nano-lubrication berbasis hBN untuk mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan sistem pembakaran berbahan bakar nabati. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi hBN terhadap kinerja dan stabilitas pelumas, serta melakukan analisis keausan komponen mesin seperti ring piston, liner silinder, dan bearing guna menilai dampak jangka panjang aditif hBN terhadap umur pakai mesin.

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 Abdalglil 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/ls.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. Prosyčėvas, 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(butyl)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. Szczeńniak, and T. Kałdoński, “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/
- [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] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Second. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [42] Ramteke, S. M., & Chelladurai, H. (2020). Effects of hexagonal boron nitride based nanofluid on the tribological and performance, emission characteristics of a diesel engine: An experimental study. *Engineering Reports*, 2(8). <https://doi.org/10.1002/eng2.12216>
- [43] Senyk, S., Chodkiewicz, A., Gocman, K., Szczeńśniak, B., & Kałdoński, T. (2022). Hexagonal Nano and Micro Boron Nitride: Properties and Lubrication Applications. *Materials*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15030955>
- [44] Thachnatharen, N., Khalid, M., Arulraj, A., & Sridewi, N. (2021). Tribological performance of hexagonal boron nitride (hBN) as nano-additives in military grade diesel engine oil. *Materials Today: Proceedings*, 50, 70–73. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.145>
- [45] 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.
- [46] S. Mahathanabodee, T. Palathai, S. Raadnui, R. Tong Sri, and N. Sombatsompop, “Effects of hexagonal boron nitride and sintering temperature on mechanical and tribological properties of SS316L/h-BN composites,” *Mater Des*, vol. 46, pp. 588–597, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.11.038.
- [47] J. Wang, F. Ma, and M. Sun, “Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications,” *RSC Adv*, vol. 7, no. 27, pp. 16801–16822, 2017, doi: 10.1039/C7RA00260B.