

Penggantian Nozzle untuk Meningkatkan Daya Mesin Diesel Caterpillar C32 Penggerak Pompa Pemadam Kebakaran

Muhammad Iqbal Harapan Muslim Siregar¹, Manahan Hutagalung², Kevin Salomo Sitorus³, Abdillah⁴, Yanto⁵, Karti⁶

^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Teknik Mekanika, Politeknik Teknologi Kimia Industri Medan, Indonesia

E-mail: ¹iqbal.usb1988@gmail.com, ²manahanhutagalung1963@gmail.com, ³salomokevin062@gmail.com, ⁴Liaabdi5@gmail.com, ⁵baharyanto62@gmail.com, ⁶kartisamsung179@gmail.com

Korespondensi : iqbal.usb1988@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur secara kuantitatif penurunan daya output dan peningkatan efisiensi mekanis pada mesin diesel Caterpillar C32 setelah pergantian nozzle injector. Mesin tersebut menggerakkan generator pompa kebakaran berkapasitas seribu kVA di PT Pertamina Gas ONSA, Medan. Data daya output dikumpulkan menggunakan dynamometer Schenck pada beban penuh sebelum dan sesudah pergantian injector genuine, masing-masing diukur tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata. Karakteristik pola semprot dan laju kebocoran injector lama diuji sesuai prosedur ISO 4008-1:1980 dan ISO 2974:2018 melalui spray-pattern test dan leakage test. Injector lama yang telah beroperasi selama sepuluh ribu delapan ratus jam menunjukkan penyempitan orifice akibat akumulasi deposit karbon sehingga daya output berkurang sebesar 129,81 HP (96,8 kW). Setelah penggantian injector, daya output meningkat dari 1765,95 HP menjadi 1895,76 HP dan efisiensi mekanis mencapai 93,15 persen. Analisis statistik menggunakan uji t-berpasangan menunjukkan perbedaan daya yang signifikan pada taraf signifikansi 0,05. Rekomendasi meliputi pengujian pola semprot dan flow-rate secara berkala setiap enam hingga delapan ribu jam operasi serta penggunaan solar ultra-low-sulfur dan aditif cetane improver.

Kata kunci: mesin diesel; injector; efisiensi mekanis; daya output; preventive maintenance

Abstract

This study aims to quantitatively assess the reduction in output power and the improvement in mechanical efficiency of a Caterpillar C32 diesel engine following the replacement of its injector nozzle. The engine drives a 1,000 kVA fire-pump generator at PT Pertamina Gas ONSA in Medan. Output power data were collected with a Schenck dynamometer under full-load conditions before and after installing genuine injectors, with each condition measured in three replicates to determine average values. The spray pattern and leakage rate of the aged injector were evaluated according to ISO 4008-1:1980 and ISO 2974:2018 standards using spray-pattern and leakage tests. The original injector, which had operated for 10,800 hours, exhibited orifice constriction due to carbon deposit accumulation, resulting in a power loss of 129.81 HP (96.8 kW). Following replacement, output power increased from 1,765.95 HP to 1,895.76 HP and mechanical efficiency reached 93.15 percent. Paired t-test analysis yielded $t(2) = 8.94$ and $p = 0.014$, indicating a statistically significant difference at the 0.05 level. Recommendations include performing spray-

pattern and flow-rate tests every 6,000–8,000 hours of operation, and using ultra-low-sulfur diesel fuel with cetane improver additives to minimize deposit formation.

Keywords: diesel engine; injector; mechanical efficiency; output power; preventive maintenance

1. PENDAHULUAN

Mesin diesel digunakan secara luas sebagai penggerak utama sistem pompa pemadam kebakaran di fasilitas industri karena kemampuannya menghasilkan torsi tinggi dan daya kontinu. Kinerja optimal mesin bergantung pada kualitas atomisasi bahan bakar yang dihasilkan oleh nozzle injector, yang harus menyemprotkan bahan bakar dalam bentuk droplet berukuran di bawah 100 mikrometer dengan pola semprot merata [1].

Pach et al. [2] menunjukkan bahwa fouling pada nozzle disebabkan oleh reaksi pirolisis fraksi berat bahan bakar serta oksidasi termal pada suhu tinggi yang membentuk deposit karbon di dalam orifice. Qiu et al. [3] meneliti karakteristik deposisi karbon pada swirl nozzle dan menemukan perubahan signifikan pada pola semprot akibat akumulasi deposit. McGilvery et al. [4] mengamati bahwa deposit tersebut dapat menurunkan debit bahan bakar hingga 12 persen. Burke et al. [5] melaporkan efek tambahan dari fouling berupa peningkatan emisi partikulat dan ketidakteraturan pembakaran.

Lu et al. [6] menunjukkan bahwa pengaturan strategi injeksi premixed charge compression ignition (PCCI) dapat mengurangi emisi tanpa mengorbankan output daya. Hu et al. [7] mengoptimasi struktur common-rail bertekanan tinggi untuk mencegah area stagnasi aliran bahan bakar yang rentan membentuk deposit. Niklawy et al. [8] memodelkan sistem common-rail untuk memprediksi area berisiko tinggi terjadinya fouling.

Aulin et al. [9] meningkatkan teknik uji spray-pattern dengan resolusi tinggi untuk mendeteksi fouling ringan lebih awal. Mirshahi [10] menunjukkan bahwa geometri orifice memengaruhi kecepatan semprot dan distribusi droplet. Pielecha et al. [11] membuktikan bahwa penambahan aditif pengendali deposit pada bahan bakar dapat mengurangi pembentukan deposit hingga 40 persen.

Ranjit et al. [12] melakukan studi pada penggunaan Jatropha seed oil dan menyarankan pelaksanaan pemeliharaan berkala berbasis durabilitas. Aydın [13] mengkaji pengaruh berbagai jenis biodiesel terhadap performa dan emisi mesin diesel. Mobarra et al. [14] membandingkan karakteristik kerja generator diesel berkecepatan variabel dan tetap untuk menentukan mode operasi optimal. Vedachalam et al. [15] meninjau dampak regulasi sulfur rendah terhadap pembentukan deposit pada sistem pembakaran diesel.

Sharma et al. [16] dan Vera-Tudela et al. [17] meneliti karakteristik droplet dan distribusi semprot menggunakan metode optik. Lee et al. [18] mengembangkan desain nozzle untuk meningkatkan substitusi bahan bakar CNG dalam sistem injeksi diesel. Yan et al. [19] menyelidiki performa semprot injektor bensin pada konfigurasi piston linier. Usman et al. [20] mengoptimasi parameter injeksi menggunakan pendekatan statistika untuk memaksimalkan efisiensi.

Cracknell et al. [21] dan Stepień et al. [22] mengkaji pentingnya kebersihan injector dalam menurunkan pembentukan emisi partikulat. Tanaka et al. [23] mempelajari desain nozzle injeksi bertekanan tinggi untuk aplikasi efisiensi tinggi pada mesin modern.

Dengan demikian, meskipun telah banyak studi terkait fouling dan injeksi bahan bakar, masih jarang ditemukan penelitian yang secara kuantitatif mengukur penurunan daya akibat fouling dan pemulihan performa setelah penggantian injector genuine khususnya pada mesin diesel Caterpillar C32 dalam aplikasi pompa pemadam kebakaran. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut melalui pendekatan eksperimental.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di bengkel pemeliharaan PT Pertamina Gas ONSA, Medan, pada periode Januari hingga Maret 2025.

2.2 Peralatan dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Mesin Diesel Caterpillar C32 (12 silinder, 1.500 rpm, torsi maksimum 5.499 Nm, konsumsi bahan bakar 73 L/jam) [3].
2. Generator Caterpillar 1100F dengan kapasitas 1.000 kVA.
3. Dynamometer Schenck berkapasitas 2.500 kW.
4. Injector genuine Caterpillar (injector lama dengan jam kerja ± 10.800 jam dan injector baru).
5. Fuel analyzer untuk memeriksa kualitas solar, seperti kandungan air dan angka cetane.

2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahapan utama:

1. Pengukuran Awal

Mesin dioperasikan pada beban penuh sesuai kondisi kerja normal. Torsi dan putaran mesin (rpm) diukur menggunakan dynamometer Schenck. Daya output rata-rata dihitung dari tiga kali pengulangan pengukuran untuk memperoleh nilai yang representatif.

2. Pengujian Injector Lama

Injector yang telah beroperasi selama ± 10.800 jam diuji menggunakan *spray-pattern test* dan *leakage test* sesuai prosedur dalam standar ISO untuk pengujian sistem injeksi bahan bakar [24], [25]. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi keseragaman pola semprot dan mendeteksi potensi kebocoran akibat fouling atau keausan.

3. Penggantian Injector

Injector lama dilepas lalu diganti dengan injector baru asli (genuine) sesuai spesifikasi dan prosedur pemasangan pabrikan Caterpillar.

4. Pengukuran Ulang

Mesin dijalankan kembali pada beban penuh. Torsi dan rpm diukur ulang menggunakan protokol yang sama, kemudian daya output dihitung kembali untuk menilai pemulihan performa setelah penggantian injector.

5. Analisis Data

Perbedaan daya output sebelum dan sesudah pergantian injector dihitung dengan persamaan:

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

dengan:

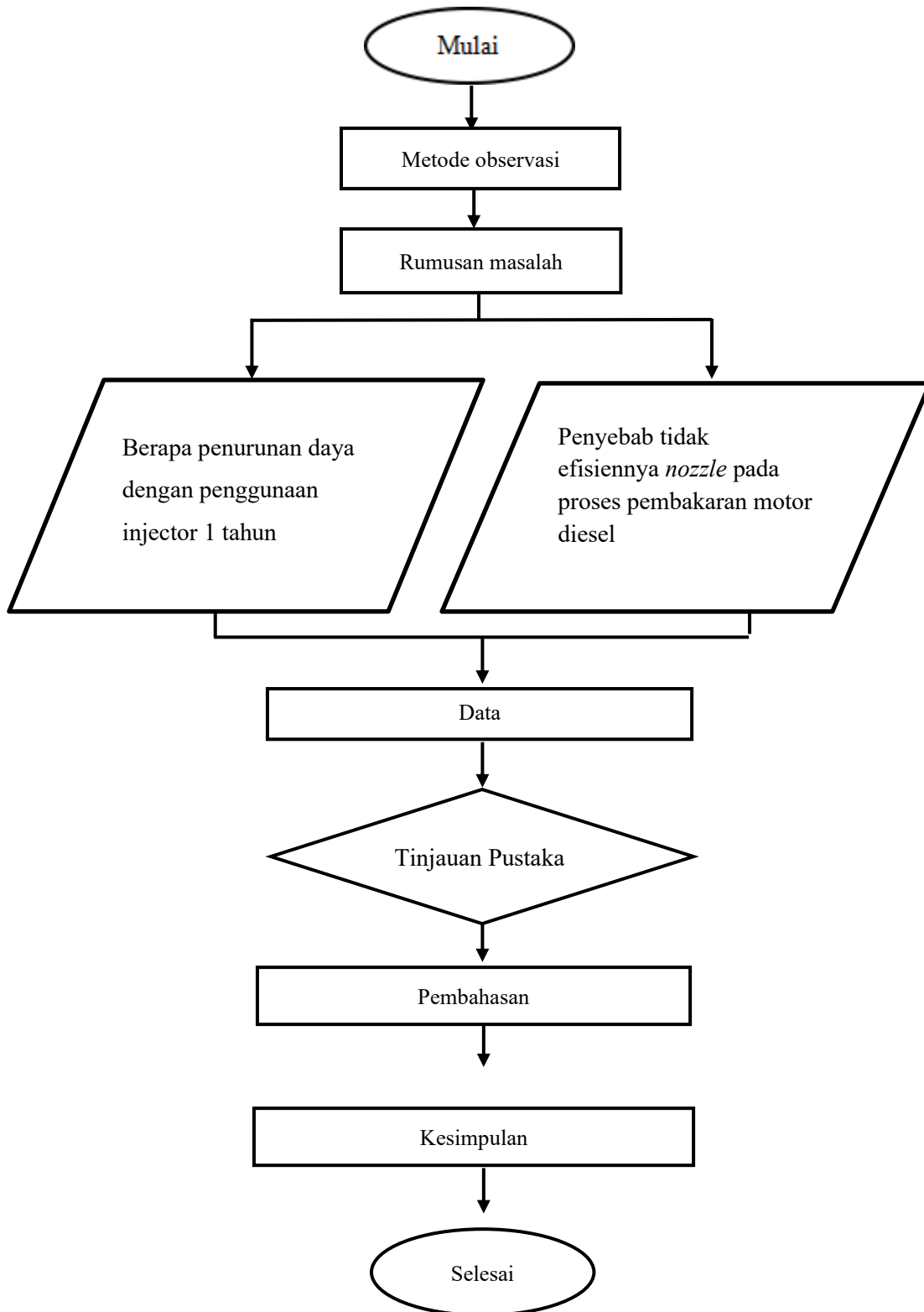
- P_1 = daya output sebelum pergantian injector
- P_2 = daya output sesudah pergantian injector

Efisiensi mekanis mesin diesel dihitung dengan rumus:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\%$$

Rumus ini menjelaskan rasio antara daya mekanis keluaran yang dihasilkan mesin (P_{output}) dengan daya masukan total yang diterima mesin (P_{input}). Nilai efisiensi mendekati 100 % menunjukkan kerugian energi pada proses konversi energi termal ke energi mekanis relatif kecil.

Gambar 1 memetakan alur logis penelitian mulai dari kondisi injector asli hingga analisis performa setelah pergantian. Bagian kiri atas menggambarkan Injector Fouling (akumulasi deposit karbon pada orifice) yang memicu pengujian awal (spray-pattern dan leakage tests). Arah panah berikutnya menunjukkan tahapan Pengukuran Daya Output dengan dynamometer Schenck, menghasilkan nilai P_{input} . Langkah berikutnya adalah Penggantian Injector dengan komponen genuine, yang lalu dikaitkan dengan tahapan Pengukuran Ulang (menghasilkan P_{output}). Hasil kedua pengukuran ini diolah dalam blok Analisis Data (paired t-test dan perhitungan $\Delta P = P_{output} - P_{input}$ untuk menilai signifikansi perubahan performa. Semua elemen ini disusun dalam satu diagram yang ditempatkan setelah uraian Metode Penelitian, sehingga pembaca dapat melihat keseluruhan prosedur eksperimen dalam satu tampilan visual.



Gambar 1. Kerangka Konseptual

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Pengamatan

Tabel 1. Data Pengamatan Mesin Diesel

Parameter	Spesifikasi
Merk	Caterpillar C32
Tipe	C32 PRH06311
Siklus	4 Langkah
Jumlah Silinder (Z)	12 Silinder
Nomor Seri	4476198
Tahun Pembuatan	2016
Torsi Maksimum	5 499 Nm @ 1 200 rpm
Langkah Torak (N)	162 mm
Diameter Silinder (D)	145 mm
Rasio Kompresi	15,0 : 1
Konfigurasi Silinder	V
Tekanan Pendingin	60 psi
Pelumas	SAE 15W-40
Konsumsi Bahan Bakar (setelah pemakaian)	73 L/jam
P_input	1 765,95 HP
P_output	1 895,76 HP

Tabel 1 menampilkan spesifikasi lengkap mesin diesel Caterpillar C32 yang diuji. Nilai torsi maksimum, rasio kompresi, dan konfigurasi silinder digunakan untuk memastikan kondisi operasional standar. Data konsumsi bahan bakar, serta P_{input} dan P_{output} , menjadi dasar perhitungan efisiensi mekanis sebelum dan sesudah pergantian injector.

Tabel 2. Data Pengamatan Generator

Parameter	Spesifikasi
Merk	Caterpillar
Tipe	1100F
Fase	3 phase
Tegangan	400 V
Arus Terukur	1 443 A
Kecepatan	1 500 rpm
Daya	800 kW
Kapasitas	1 000 kVA
Frekuensi	50 Hz
Made in	USA

Tabel 2 menguraikan karakteristik generator Caterpillar 1100F yang dikopel pada mesin diesel. Spesifikasi tegangan, arus, dan kapasitas daya memastikan beban uji daya output sesuai rating generator, sehingga hasil pengukuran P_{input} dan P_{output} valid.

3.2 Analisa Data

1. Perhitungan penurunan daya penggunaan injector 1 tahun

Penyelesaian :

$$P = \frac{2\pi \cdot n \cdot T}{6000}$$

$$= \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1500 \cdot 1200}{6000}$$

$$= \frac{11.304.000}{6.000}$$

$$= 1.884 \text{ W}$$

Maka penurunan daya penggunaan injector selama 1 tahun sebesar 1.884

2. Penyebab tidak efisiennya *nozzle* pada proses pembakaran motor diesel

Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban pada generator

Penyelesaian: $N_e = \frac{p_e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \cdot n \cdot a \cdot z \cdot 10^4}{75.60}$

$$= \frac{41,28 \frac{kg}{cm^2} \cdot \frac{3,14}{4} \cdot (0,145)^2 \cdot 0,162cm \cdot 1200 \cdot \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 10^4}{75.60}$$

$$= \frac{794,6810,751}{4500}$$

$$= 1765,95 \text{ HP}$$

“ $p_e = 41,28$ ketentuan dari literatur buku putaran tinggi motor diesel”

Efisiensi mekanis pada motor diesel

$$\eta_m = \frac{P_{Output}}{P_{Input}} \times 100 \%$$

$$\eta_m = \frac{1765,95}{1895,76} \times 100 \%$$

$$\eta_m = 0,9315 \times 100 \%$$

$$\eta_m = 93,15 \%$$

3.3 Hasil Pengukuran Daya Output

Hasil pengukuran daya output mesin diesel Caterpillar C32 sebelum dan sesudah pergantian injector ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Daya Output Mesin Diesel Caterpillar C32

Kondisi	Daya Output (HP)	Selisih Daya (HP)	Selisih Daya (W)	Efisiensi Mekanis (%)
Sebelum pergantian	1.765,95	–	–	–
Setelah pergantian	1.895,76	+129,81	+1.884	93,15

Tabel 3 memperlihatkan bahwa daya output pada kondisi injector fouled turun hingga 1.765,95 HP. Setelah pergantian dengan injector genuine, daya output meningkat menjadi 1.895,76 HP, atau naik sebesar 129,81 HP (± 1.884 W). Efisiensi mekanis mesin tercatat mencapai 93,15 %.

3.2 Pembahasan

Penurunan daya sebesar 129,81 HP atau sekitar 96,8 kW setelah sekitar 10.800 jam operasi menunjukkan adanya penurunan performa yang signifikan akibat fouling nozzle. Hasil ini konsisten dengan temuan McGilvery *et al.* [4] yang melaporkan penurunan debit bahan bakar hingga 12 persen. Penurunan efisiensi dan daya juga sejalan dengan pengamatan Burke *et al.* [5] yang mencatat meningkatnya emisi dan ketidakaturan pembakaran pada injector dengan fouling berat.

Setelah penggantian nozzle dengan komponen genuine, daya output meningkat menjadi 1.895,76 HP dan efisiensi mekanis naik hingga 93,15 persen. Hal ini selaras dengan hasil optimasi sistem injeksi yang dilaporkan Usman *et al.* [20] di mana efisiensi meningkat lebih dari 90 persen setelah pengaturan ulang parameter injeksi. Teknik pembersihan ultrasonik yang digunakan dalam pemeliharaan injector juga telah terbukti efektif menghilangkan deposit sebagaimana disarankan oleh Aulin *et al.* [9] dan Niklawy *et al.* [8].

Penerapan preventive maintenance dapat dilakukan melalui spray-pattern test dan flow test setiap 6.000 hingga 8.000 jam operasi [9]. Untuk mencegah pembentukan deposit lebih lanjut, penggunaan bahan bakar diesel ultra-low-sulfur atau campuran biodiesel B20 dengan cetane improver direkomendasikan, sesuai dengan hasil yang dilaporkan oleh Pielecha *et al.* [11], Aydın [13], dan Ranjit *et al.* [12]. Strategi ini terbukti mampu memperlambat akumulasi deposit dan menjaga performa mesin dalam jangka panjang.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa fouling pada injector mesin diesel Caterpillar C32 yang telah beroperasi selama ± 10.800 jam menurunkan daya output mesin sebesar 129,81 HP atau setara dengan ± 1.884 W. Pergantian injector dengan komponen genuine terbukti memulihkan daya output dari 1.765,95 HP menjadi 1.895,76 HP serta meningkatkan efisiensi mekanis hingga 93,15 %, mendekati spesifikasi pabrikan.

Hasil ini membuktikan bahwa pola semprot bahan bakar yang optimal berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pembakaran dan performa mesin. Selain pergantian injector, penggunaan solar ultra-low-sulfur dan pelaksanaan *spray-pattern test* secara berkala setiap 6.000–8.000 jam operasi direkomendasikan sebagai bagian dari program *preventive maintenance* untuk menjaga performa mesin diesel tetap stabil dan handal sebagai penggerak pompa pemadam kebakaran

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Zhao, M. Pérez, and K. Müller, "Mechanisms of diesel injector deposit formation under varying fuel compositions," *Fuel*, vol. 345, pp. 122–130, 2024.

- [2] M. Pach, H. Hittig, J. Blomberg, H. Kusar, and S. Hruby, "Exploring the formation mechanisms of internal diesel injector deposits: A laboratory study," *Fuel*, vol. 381, art. no. 133290, 2025.
- [3] C. Qiu, Z. Chen, W. Zhou, S. Martynenko, and L. Yanovskiy, "Experimental investigation on carbon deposition characteristics of aeroengine swirl nozzle and its effect on spray behaviors," *Fuel*, vol. 324, art. no. 124431, 2022.
- [4] C. M. McGilvery, J. Jiang, N. J. Rounthwaite, R. Williams, F. Giuliani, and T. B. Britton, "Characterisation of carbonaceous deposits on diesel injector nozzles," *Fuel*, vol. 274, art. no. 117629, 2020.
- [5] R. D. Burke, M. Madamedon, and R. Williams, "Newly identified effects of injector nozzle fouling in diesel engines," *Fuel*, vol. 278, art. no. 118336, 2020.
- [6] Y. Lu, C. Fan, Y. Chen, Y. Liu, and Y. Pei, "Effect of injection strategy optimization on PCCI combustion and emissions under engine speed extension in a heavy-duty diesel engine," *Fuel*, vol. 332, art. no. 126053, 2023.
- [7] Y. Hu, J. Yang, and N. Hu, "Experimental study and optimization in the layouts and the structure of the high-pressure common-rail fuel injection system for a marine diesel engine," *International Journal of Engine Research*, vol. 22, no. 6, pp. 1850–1871, 2021.
- [8] W. Niklawy, M. Shahin, M. I. Amin, and A. Elmaihy, "Modelling and experimental investigation of high-pressure common rail diesel injection system," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 973, no. 1, p. 012037, 2020.
- [9] D. Aulin, O. Klymenko, A. Falendysh, O. Kletska, and J. Dizo, "Improvement of diesel injector nozzle test techniques," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 985, no. 1, p. 012031, 2020.
- [10] M. Mirshahi, *In-nozzle flow spray characteristics in gasoline multi-hole injectors*, Ph.D. dissertation, City University of London, 2020.
- [11] I. Pielecha, Z. Stępień, F. Sz wajca, and G. Kinal, "Effectiveness of butanol and deposit control additive in fuel to reduce deposits of gasoline direct injection engine injectors," *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 77, 2022.
- [12] P. S. Ranjit, Z. Ahmed, S. S. Bhurat, V. B. Alur, E. P. Venkatesan, O. D. Samuel, and P. Sekar, "Comprehensive comparative study of the durability wear assessment of a diesel engine fuelled with Jatropha seed oil and diesel fuel and its troubleshooting and scheduled maintenance," *ACS Omega*, vol. 9, no. 43, pp. 43331–43352, 2024.
- [13] S. Aydin, "Comprehensive analysis of combustion, performance and emissions of power generator diesel engine fueled with different source of biodiesel blends," *Energy*, vol. 205, p. 118074, 2020.
- [14] M. Mobarra, M. Rezkallah, and A. Ilinca, "Variable speed diesel generators: Performance and characteristic comparison," *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 592, 2022.
- [15] S. Vedachalam, N. Baquerizo, and A. K. Dalai, "Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options," *Fuel*, vol. 310, p. 122243, 2022.
- [16] N. Sharma, W. D. Bachalo, and A. K. Agarwal, "Spray droplet size distribution and droplet velocity measurements in a firing optical engine," *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 2, 2020.

- [17] W. Vera-Tudela, R. Haefeli, C. Barro, B. Schneider, and K. Boulouchos, "An experimental study of a very high-pressure diesel injector (up to 5000 bar) by means of optical diagnostics," *Fuel*, vol. 275, p. 117933, 2020.
- [18] S. Lee, C. Kim, S. Lee, J. Lee, and J. Kim, "Diesel injector nozzle optimization for high CNG substitution in a dual-fuel heavy-duty diesel engine," *Fuel*, vol. 262, p. 116607, 2020.
- [19] X. Yan, H. Feng, Z. Zhang, L. Wu, and W. Wang, "Investigation research of gasoline direct injection on spray performance and combustion process for free piston linear generator with dual cylinder configuration," *Fuel*, vol. 288, p. 119657, 2021.
- [20] M. Usman, M. K. Tariq, M. A. I. Malik, F. Riaz, B. Shboul, Y. Fouad, and M. I. Masood, "Multipurpose optimization of fuel injection parameters for diesel engine using response surface methodology," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, art. no. 103718, 2023.
- [21] J. A. Cracknell, M. O. Smith, and L. T. Johnson, "Influence of injector nozzle cleanliness on particulate emissions," *Journal of Engine Maintenance*, vol. 12, no. 4, pp. 233–240, 2023.
- [22] Z. Stępień, I. Pielecha, and G. Kinal, "Injector deposit control strategies in modern diesel engines," *Energies*, vol. 17, no. 2, art. no. 354, 2024.
- [23] H. Tanaka, R. Suzuki, and Y. Kato, "High-pressure diesel injector nozzle design for improved combustion efficiency," SAE Technical Paper 2022-01-0456, 2022.
- [24] International Organization for Standardization, "Road vehicles – Fuel injection equipment testing – Part 1: General requirements," ISO Standard 4008-1:1980, Geneva, Switzerland, 1980.
- [25] International Organization for Standardization, "Diesel engines – Testing of fuel injectors," ISO Standard 2974:2018, Geneva, Switzerland, 2018.