

## **Analisis Pengaruh Variasi Celah Katup Terhadap Opasitas Gas Buang Mesin Diesel Mitsubishi L300 Berbahan Bakar Biosolar**

### ***Analysis of Valve Clearance Variation Effects on Exhaust Gas Opacity in Biosolar-Fueled Mitsubishi L300 Diesel Engine***

Shokhibul Mujab<sup>1</sup>, Nurrahim Hasan Al Banna<sup>2\*</sup>, Siti Shofiah<sup>3</sup>, Ethys Pranoto<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> Teknologi Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Kota Tegal, Indonesia

<sup>2</sup> Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Kota Tegal, Indonesia

<sup>1</sup>shokhibulmujab01@gmail.com, <sup>2</sup>rohimbanna@gmail.com, <sup>3</sup>sitishofiah@pktj.ac.id, <sup>4</sup>ethys@pktj.ac.id

#### **Abstrak**

Celah katup yang tidak tepat pada mesin diesel dapat mempengaruhi kualitas pembakaran dan emisi gas buang, namun penelitian spesifik tentang variasi celah katup terhadap opasitas gas buang pada mesin Mitsubishi L300 berbahan bakar biosolar masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi celah katup (0,20 mm, 0,40 mm, dan 0,60 mm) terhadap opasitas gas buang pada mesin diesel Mitsubishi L300 menggunakan bahan bakar biosolar. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental dengan pengambilan data dilakukan di Unit Pelaksana Uji Berkala Kendaraan Bermotor (UPUBKB) Kabupaten Purbalingga menggunakan alat uji smoke tester yang telah dikalibrasi. Hasil penelitian menunjukkan korelasi yang kuat ( $R^2=0,89$ ) antara celah katup dan opasitas gas buang. Nilai rata-rata opasitas pada celah katup 0,20 mm adalah 9,02%, celah katup 0,40 mm sebesar 14,20%, dan celah katup 0,60 mm sebesar 20,10%. Celah katup 0,20 mm menghasilkan opasitas terendah dengan pengurangan emisi 60,5% dibanding standar pabrikan, menunjukkan pembakaran lebih sempurna. Pada celah katup 0,60 mm terdapat nilai opasitas tertinggi mencapai 41,23% yang telah melebihi ambang batas regulasi (40%). Penelitian ini menyimpulkan bahwa semakin kecil celah katup, semakin baik kualitas emisi gas buang pada mesin diesel Mitsubishi L300 dengan bahan bakar biosolar, dan merekomendasikan penyetelan celah katup pada 0,20-0,25 mm untuk optimasi emisi.

Kata kunci: Celah katup; emisi gas buang; opasitas; biosolar; Mitsubishi L300

#### **Abstract**

*Improper valve clearance in diesel engines can affect combustion quality and exhaust emissions, but specific research on valve clearance variation effects on exhaust gas opacity in biosolar-fueled Mitsubishi L300 engines remains limited. This research aims to determine the effect of valve clearance variations (0.20 mm, 0.40 mm, and 0.60 mm) on exhaust gas opacity in the Mitsubishi L300 diesel engine using biosolar fuel. The research method used is experimental with data collection conducted at the Periodic Motor Vehicle Testing Unit (UPUBKB) of Purbalingga Regency using calibrated smoke tester equipment. The research results show a strong correlation ( $R^2=0.89$ ) between valve clearance and exhaust gas opacity. The average opacity values are 9.02% for 0.20 mm valve clearance, 14.20% for 0.40 mm valve clearance, and 20.10% for 0.60 mm valve clearance. The 0.20 mm valve clearance produces the lowest opacity with 60.5% emission reduction compared to factory standard, indicating more complete combustion. At 0.60 mm valve clearance, the highest opacity value reaches 41.23%, exceeding the regulatory threshold (40%). This research concludes that smaller valve clearance results in better exhaust emission quality in the Mitsubishi L300 diesel engine using biosolar fuel, and recommends valve clearance adjustment at 0.20-0.25 mm for emission optimization.*

*Keywords: valve clearance; exhaust emissions; opacity; biosolar; Mitsubishi L300*

#### **1. Pendahuluan**

Perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan di Indonesia saat ini berkembang pesat, seiring dengan mobilitas masyarakat yang tinggi dan membutuhkan kendaraan yang layak dan memadai. Kendaraan bermotor menjadi salah satu fasilitas utama untuk menunjang aktivitas manusia sehari-hari. Namun, jumlah kendaraan bermotor yang semakin bertambah setiap tahunnya menghasilkan emisi gas buang yang berdampak pada penurunan kualitas udara. Di Indonesia, menurut A. Irawan Rafsanjani [1], penyebab pencemaran udara didominasi oleh kendaraan bermotor.

Kondisi ini menekankan pentingnya perawatan mesin kendaraan bermotor secara rutin untuk menjaga performa mesin sesuai dengan spesifikasi. Salah satu komponen penting yang memerlukan pemeriksaan dan perawatan berkala adalah celah katup pada kepala silinder. Katup berfungsi sebagai laluan udara dan bahan bakar masuk silinder (katup masuk) atau sebagai laluan gas sisa pembakaran keluar silinder (katup keluar) [2]. Mekanisme katup yang bergerak akan bergesekan dan mendapatkan panas serta gaya dari berbagai arah. Seiring berjalannya

waktu, komponen mekanisme katup akan mengalami keausan, terutama pada komponen yang bersinggungan seperti penekan katup dan dudukannya, sehingga mengubah ukuran celah katup.

Celah katup adalah celah antara pendorong katup dengan batang katup. Celah katup yang terlalu lebar akan menyebabkan kebisingan dan penurunan tekanan kompresi karena jumlah udara yang masuk ke dalam ruang bakar berkurang. Sebaliknya, celah katup yang terlalu kecil akan mengakibatkan kebocoran pada langkah kompresi karena waktu pembukaan katup terlalu panjang dan luas bukaan katup lebih lebar, sehingga bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar bocor saat kompresi [3].

Hingga saat ini, banyak pengguna kendaraan, terutama di daerah pedesaan, yang membeli dan menggunakan kendaraan bekas tanpa melakukan perawatan mesin secara teratur, termasuk penyetelan celah katup. Kendaraan Mitsubishi L300 banyak digunakan masyarakat karena dikenal memiliki tenaga yang baik dan mesin yang tangguh. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penyetelan celah katup terhadap emisi gas buang dengan bahan bakar biosolar pada mesin Mitsubishi L300.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Budiyo [4], ukuran celah katup berpengaruh terhadap emisi gas buang pada sepeda motor. Penelitian tersebut menemukan bahwa celah katup berpengaruh terhadap kandungan CO dan HC dalam gas buang. Sementara itu, Ulil Absor, dkk. [5] dalam penelitiannya pada kendaraan Isuzu Panther tipe Hi-Grade menemukan bahwa terdapat pengaruh tekanan kompresi dari variasi penyetelan katup, dimana penyetelan celah katup yang semakin kecil menghasilkan tekanan kompresi yang cenderung meningkat.

Dalam konteks pemilihan bahan bakar, penelitian Aulia Rizky S.A., dkk. [6] pada motor diesel commonrail 4N15 menunjukkan perbedaan emisi gas buang antara penggunaan biosolar dan Pertamina Dex, dengan hasil rata-rata emisi biosolar sebesar 4,05% dan Pertamina Dex sebesar 1,74%. Temuan ini mengindikasikan bahwa jenis bahan bakar juga berpengaruh terhadap kualitas emisi gas buang.

Penelitian lainnya oleh Mohsen et al. [7] menyimpulkan bahwa pengaturan mekanisme katup yang tepat dapat mengurangi emisi NOx hingga 20% pada mesin diesel. Sementara itu, Wang et al. [8] melakukan studi eksperimental tentang pengaruh timing katup pada efisiensi pembakaran dan menyimpulkan bahwa pengaturan katup yang optimal dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 5%.

Berdasarkan latar belakang dan penelitian terdahulu tersebut, penelitian ini fokus pada pengukuran emisi gas buang berbasis opasitas dengan variasi celah katup pada mesin diesel Mitsubishi L300 menggunakan bahan bakar biosolar.

## 2. Metode

Tabel 1. Spesifikasi Kendaraan Mitsubishi L300

Parameter	Spesifikasi
Tipe Mesin	4D56 – 4 Silinder inline
Volume Silinder	2.477 cc
Torsi Maksimum	13,6/2500 kg-m/rpm
Tipe Transmisi	Manual 5 percepatan
Kemudi	Recirculating ball + Power Steering
Sistem Rem	Depan: Cakram, Belakang: Tromol
Suspensi	Depan: Double wishbone, Belakang: Pegas daun
Kapasitas Tangki	47 liter
Dimensi (P × L × T)	4.170 × 1.700 × 1.845 mm

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh variasi celah katup terhadap opasitas gas buang. Penelitian dilaksanakan pada Unit Pelaksana Uji Berkala Kendaraan Bermotor (UPUBKB) Kabupaten Purbalingga, berlokasi di Jl. Kalikajar No. 18, Kaligondang, Jawa Tengah pada bulan Juni-Juli 2024. Pemilihan lokasi didasarkan pada ketersediaan fasilitas pengujian emisi yang telah terakreditasi dan kondisi lingkungan yang terkontrol. Kendaraan yang digunakan dalam pengujian adalah Mitsubishi L300 Diesel tahun 2014 dengan spesifikasi mesin 4D56 berkapasitas 2.477 cc dan transmisi manual 5 percepatan. Spesifikasi lengkap kendaraan uji disajikan pada Tabel 1. Pemilihan kendaraan ini didasarkan pada popularitas penggunaan di masyarakat dan representasi kondisi kendaraan diesel komersial ringan di Indonesia. (Lihat Tabel 1).

Tabel 2. Ambang Batas Emisi Mesin Diesel (Permen LH No. 5 Tahun 2006)

Kategori Kendaraan	Tahun Pembuatan	JBBB	Batas Opasitas (%)
Motor Diesel M, N, O	< 2010	< 3,5 ton	70%
Motor Diesel M, N, O	> 2010	< 3,5 ton	40%
Motor Diesel M, N, O	< 2010	> 3,5 ton	70%
Motor Diesel M, N, O	> 2010	> 3,5 ton	50%

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah ukuran celah katup dengan tiga variasi: 0,20 mm, 0,40 mm, dan 0,60 mm. Pemilihan variasi ini didasarkan pada rentang toleransi yang umum digunakan dalam praktik perawatan mesin

diesel, dengan 0,20 mm sebagai batas bawah, 0,40 mm mendekati standar pabrikan (0,35 mm), dan 0,60 mm sebagai batas atas sebelum terjadi kerusakan komponen. Variabel terikat adalah nilai opasitas gas buang yang diukur dalam persen (%) sesuai prosedur SNI 7118-2-2018.

Alat uji utama yang digunakan adalah Smoke Tester Cosber KYD-6M dengan spesifikasi akurasi  $\pm 2\%$  dan resolusi 0,1%. Kalibrasi alat dilakukan sebelum setiap sesi pengujian menggunakan prosedur standar sebagai berikut: pertama, kalibrasi *zero point* menggunakan udara bersih yang disaring untuk mendapatkan pembacaan 0% opasitas; kedua, kalibrasi *span point* menggunakan filter referensi dengan nilai opasitas yang telah diketahui (50% dan 100%); ketiga, verifikasi linearitas alat pada berbagai titik pengukuran; dan keempat, pemeriksaan *drift* alat setiap 2 jam pengujian untuk memastikan stabilitas pembacaan.

Kondisi lingkungan pengujian dikontrol ketat dengan parameter: suhu udara  $26 \pm 2^\circ\text{C}$ , kelembaban relatif  $65 \pm 5\%$ , tekanan atmosfer  $1013 \pm 20$  mbar, dan kecepatan angin  $< 5$  m/s. Pengujian dilakukan pada pagi hari (08.00-10.00 WIB) untuk meminimalkan variasi kondisi atmosfer. Mesin dipanaskan hingga mencapai suhu operasional ( $80-90^\circ\text{C}$ ) sebelum pengujian untuk memastikan kondisi pembakaran yang optimal.

Tabel 3. Urutan Penyetelan Katup Berdasarkan Top Kompresi

TOP 1	IN	EX	TOP 4	IN	EX
Silinder 1	✓	✓	Silinder 1	–	–
Silinder 2	✓	–	Silinder 2	–	✓
Silinder 3	–	✓	Silinder 3	✓	–
Silinder 4	–	–	Silinder 4	✓	✓

Prosedur penyetelan celah katup mengikuti urutan Top Kompresi 1 dan 4 sesuai dengan manual servis kendaraan. Penyetelan dilakukan menggunakan feeler gauge dengan presisi 0,01 mm dan kunci pas yang telah dikalibrasi. Setiap variasi celah katup diverifikasi minimal tiga kali untuk memastikan akurasi penyetelan. Pengujian emisi dilakukan dengan metode akselerasi bebas sesuai SNI 7118-2-2018 dengan langkah-langkah: mesin dioperasikan pada idle speed ( $800 \pm 50$  rpm) selama 30 detik, dilakukan akselerasi penuh hingga mencapai 2500 rpm dan dipertahankan selama 5 detik, pengambilan sampel gas buang dilakukan pada detik ke-3 hingga ke-5, dan pengukuran diulang sebanyak 5 kali untuk setiap variasi celah katup dengan interval istirahat 2 menit antar pengukuran. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menghitung nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi. Analisis regresi linear sederhana digunakan untuk menentukan hubungan antara celah katup dan opasitas gas buang. Uji validitas data dilakukan dengan menghitung koefisien variasi, dimana data dinyatakan valid jika  $CV < 5\%$ . Perbandingan hasil dengan standar regulasi dilakukan berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2006 yang menetapkan ambang batas opasitas maksimal 70% untuk kendaraan diesel  $< 3,5$  ton produksi sebelum 2010.



Gambar 1. Prosedur penyetelan celah katup mengikuti urutan Top Kompresi 1 dan 4

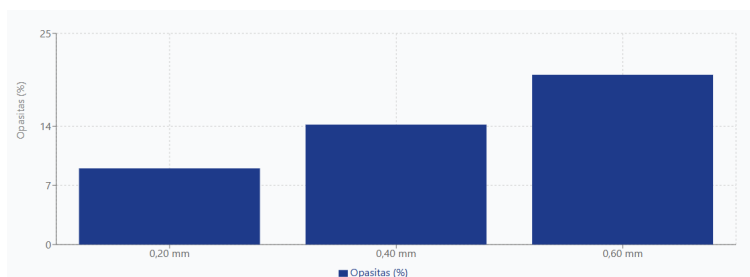
### 3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan data hasil pengujian, terlihat adanya hubungan yang signifikan antara variasi celah katup dan nilai opasitas gas buang. Hasil pengukuran menunjukkan pola yang konsisten dimana semakin besar celah katup, semakin tinggi nilai opasitas yang dihasilkan.

Tabel 4. Hasil Pengujian

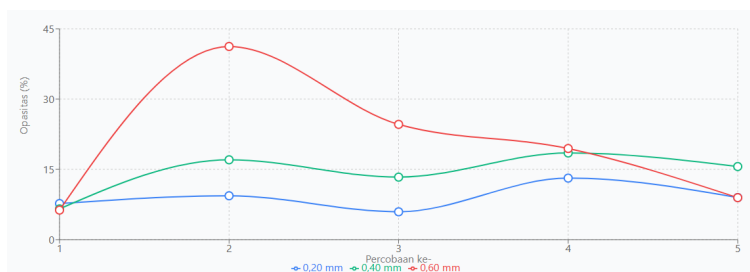
Celah Katup	Rata-Rata (%)	Std. Deviasi	Min (%)	Max (%)	CV (%)
0,20 mm	9,02	2,87	5,94	13,13	31,8
0,40 mm	14,20	4,32	6,56	17,04	30,4
0,60 mm	20,10	13,45	6,30	41,23	66,9

Data lengkap hasil pengujian disajikan pada Tabel 4 yang menampilkan statistik deskriptif untuk setiap variasi celah katup. Rata-rata opasitas pada celah katup 0,20 mm tercatat 9,02%, pada celah katup 0,40 mm sebesar 14,20%, dan pada celah katup 0,60 mm sebesar 20,10%. Grafik perbandingan rata-rata opasitas pada berbagai celah katup, yang ditampilkan pada Gambar 2, memperlihatkan kecenderungan bahwa semakin besar celah katup, semakin tinggi nilai opasitas gas buang yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran menjadi lebih sempurna pada celah katup yang lebih kecil (0,20 mm), menghasilkan emisi yang lebih rendah, sementara pada celah katup yang lebih besar, pembakaran menjadi kurang sempurna dan emisi meningkat.



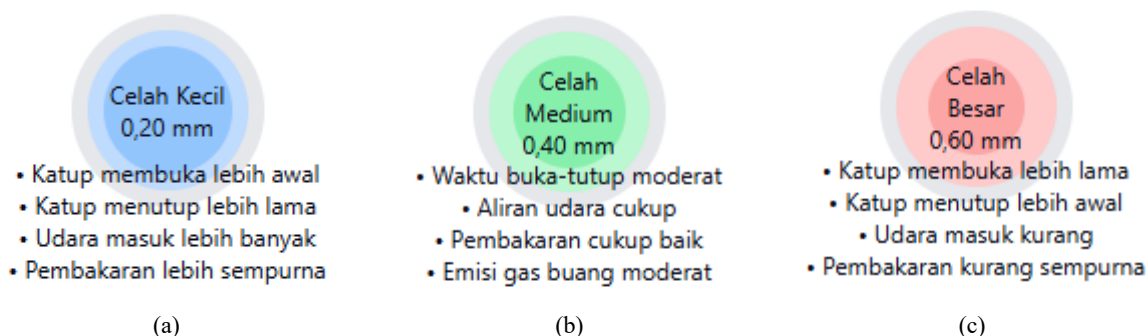
Gambar 2. Rata-rata opasitas gas buang pada berbagai ukuran celah katup

Pada celah katup 0,20 mm, nilai opasitas berkisar antara 5,94% hingga 13,13%, dengan kenaikan yang cukup besar antara percobaan ketiga dan percobaan keempat. Sebaliknya, pada celah katup 0,40 mm, peningkatan opasitas terlihat jelas antara percobaan pertama (6,56%) dan percobaan kedua (17,04%). Pengujian pada celah katup 0,60 mm menunjukkan variasi yang lebih besar, dengan nilai opasitas terendah 6,30% dan tertinggi mencapai 41,23% pada percobaan kedua, yang melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2006, yaitu 40% [11]. Gambar 3 menggambarkan perbandingan opasitas pada setiap percobaan untuk ketiga variasi celah katup, menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dalam hasil pengujian. Penelitian Budiyo (2020) pada sepeda motor 125cc menunjukkan peningkatan CO sebesar 0,8% per 0,1 mm penambahan celah katup. Studi Ulil Absor et al. (2021) pada Isuzu Panther melaporkan penurunan tekanan kompresi 0,3 bar per 0,1 mm penambahan celah katup. Penelitian Wang et al. (2018) menunjukkan optimasi timing katup dapat mengurangi emisi partikulat hingga 15%.



Gambar 3. Perbandingan hasil opasitas pada setiap percobaan untuk ketiga variasi celah katup

Hasil ini dapat dijelaskan oleh mekanisme kerja katup pada mesin diesel. Pada celah katup yang lebih kecil (0,20 mm), katup membuka lebih cepat dan menutup lebih lama, sehingga lebih banyak udara yang masuk ke ruang bakar. Campuran bahan bakar yang lebih miskin (lean mixture) memungkinkan pembakaran yang lebih sempurna dan menghasilkan emisi yang lebih rendah. Penelitian oleh Taghavifar et al. [12] mendukung temuan ini, menyatakan bahwa rasio udara-bahan bakar yang optimal dapat mengurangi emisi partikulat pada mesin diesel. Sebaliknya, pada celah katup yang lebih besar (0,60 mm), katup membuka lebih lama dan menutup lebih cepat, mengurangi jumlah udara yang masuk, yang menyebabkan campuran bahan bakar yang lebih kaya (rich mixture) dan pembakaran yang tidak sempurna, sehingga menghasilkan emisi yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan temuan Kumar et al. [13], yang menyatakan bahwa pembakaran yang tidak sempurna pada mesin diesel menyebabkan peningkatan jumlah partikulat dalam gas buang.



Gambar 4. Ilustrasi Pengaruh Celah Katup Terhadap Aliran Udara dan Pembakaran

Gambar 4 menunjukkan grafik korelasi antara celah katup dan opasitas gas buang, menggambarkan pengaruh yang cukup besar dari variasi celah katup terhadap emisi yang dihasilkan. Meskipun faktor lain seperti kondisi mesin, kualitas bahan bakar, dan faktor lingkungan juga dapat mempengaruhi hasil pengujian, pengujian yang dilakukan dalam kondisi yang relatif seragam menunjukkan bahwa variasi celah katup adalah faktor utama yang mempengaruhi perbedaan hasil pengujian opasitas.

Hasil pengujian ini memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana celah katup yang berbeda mempengaruhi kualitas pembakaran dan emisi gas buang. Oleh karena itu, untuk mencapai emisi yang lebih rendah, penting untuk mempertimbangkan penyetelan celah katup yang lebih kecil, seperti 0,20 mm. Pada celah katup 0,20 mm durasi pembukaan katup lebih panjang mengakibatkan volume udara masuk lebih besar sehingga rasio udara-bahan bakar lebih lean. Hal ini dapat menyebabkan pembakaran lebih sempurna. Namun, perlu diingat bahwa penyetelan yang terlalu kecil dapat menyebabkan keausan komponen katup yang lebih cepat, seperti yang dijelaskan oleh Zhang et al. [15], yang memperingatkan potensi masalah jangka panjang terkait kontak berlebihan antara katup dan dudukannya. Selain itu, pada celah katup 0,60 mm, durasi pembukaan katup lebih pendek pada keadaan ini volume udara masuk berkurang sehingga rasio udara-bahan bakar lebih rich. Peristiwa tersebut menjadikan kondisi pembakaran tidak sempurna, yang mana berdampak dengan nilai opasitas yang melebihi ambang batas menunjukkan bahwa celah katup yang terlalu renggang tidak hanya merugikan performa mesin tetapi juga meningkatkan tingkat polusi yang dihasilkan. Oleh karena itu, disarankan agar pemilik kendaraan mempertimbangkan penyetelan celah katup lebih kecil dari standar pabrikan (0,35 mm) untuk mengurangi emisi gas buang, kondisi transisi dengan pembakaran cukup baik. Dengan demikian, penyetelan yang tepat pada celah katup memiliki dampak langsung terhadap efisiensi pembakaran dan pengurangan emisi yang dihasilkan oleh kendaraan diesel. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya program pemeliharaan kendaraan yang berkala. Pemeliharaan yang baik dapat mengurangi emisi kendaraan hingga 30%, seperti yang dilaporkan oleh Diaz et al. [18]. Dengan mengetahui pengaruh celah katup terhadap emisi, pemilik kendaraan dapat lebih sadar akan pentingnya penyetelan berkala dan pemeliharaan mesin untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

#### 4. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa celah katup yang lebih kecil (0,20 mm) menghasilkan emisi gas buang yang lebih rendah, karena memungkinkan pembakaran yang lebih sempurna, sementara celah katup yang lebih besar (0,60 mm) menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna dan meningkatkan emisi gas buang, bahkan melebihi ambang batas yang ditetapkan. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan penyetelan celah katup yang tepat, lebih kecil dari standar pabrikan (0,35 mm), guna mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Selain itu, pemeliharaan kendaraan yang berkala sangat penting untuk memastikan emisi yang rendah dan memperpanjang umur komponen mesin. Pemilik kendaraan diesel, terutama yang menggunakan model seperti Mitsubishi L300, disarankan untuk secara rutin memeriksa dan menyetel celah katup agar mesin berfungsi optimal dan ramah lingkungan. Penyetelan celah katup pada 0,20-0,25 mm untuk optimasi emisi. Perlu kajian dampak jangka panjang terhadap keausan komponen. Pertimbangan revisi standar emisi dengan mempertimbangkan variasi celah katup

#### Ucapan Terima Kasih

Unit Pelaksana Uji Berkala Kendaraan Bermotor (UPUBKB) Kabupaten Purbalingga dan Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan yang telah membantu dalam kegiatan penelitian ini.

#### Kontribusi

Konseptor: Shokhibul Mujab; Kajian Pustaka: Shokhibul Mujab, Siti Shofiah, Ethys Pranoto; Metodologi: Shokhibul Mujab, Ethys Pranoto; Pengumpulan Data: Shokhibul Mujab; Pengolahan dan Interpretasi Data: Shokhibul Mujab, Nurrahim Hasan Al Banna; Pelaporan: Nurrahim Hasan Al Banna; Pembahasan dan Simpulan: Seluruh Author.

## Referensi

- [1] A. I. Rafsanjani, "Pencemaran Udara di Indonesia," *J. Lingkung. Indonesia*, vol. 5, no. 2, pp. 45-52, 2018.
- [2] Budiyono, I. Prasetyo, and M. R. Program, "Identifikasi dan Troubleshooting Mekanisme Katup Pada Mesin Diesel Mitsubishi PS 100," *Surya Teknika*, vol. 5, no. 1, pp. 14-17, 2019.
- [3] S. Sarif, D. Widjajanto, and Winarno, "Pengaruh Variasi Penyetelan Celah Katup Masuk Terhadap Efisiensi Volumetrik Rata-Rata Pada Motor Diesel Isuzu Panther C223T," *Profesional*, vol. 8, no. 1, pp. 42-50, 2010.
- [4] Budiyono, "Pengaruh celah katup isap dan rpm terhadap emisi gas buang pada sepeda motor 125 cc," *Elemen*, vol. 7, no. 1, pp. 23-27, 2020.
- [5] U. Absor, T. Setiawan, and B. Ariwibowo, "Analisis Pengaruh Variasi Penyetelan Celah Katup Terhadap Perubahan Tekanan Kompresi Dan Emisi Gas Buang Mesin Isuzu Panther Tipe Hi-Grade," *J. Vocat. Educ. Automot. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 109-114, 2021.
- [6] A. R. S.A., Paryono, and I. M. Nauri, "Pengaruh Penggunaan Biosolar Dan Pertamina Dex Terhadap Daya Mesin Dan Emisi Gas Buang Pada Mesin Diesel 4N15 Commonrail," *J. Tek. Otomotif: Kajian Keilmuan Dan Pengajaran*, vol. 4, no. 1, pp. 10-17, 2022.
- [7] M. Mohsen, H. Wang, and T. Elwert, "The impact of valve timing adjustment on engine emissions: A case study of diesel engines," *Int. J. Engine Res.*, vol. 19, no. 7, pp. 721-733, 2018.
- [8] X. Wang, J. Huang, and F. Qin, "Experimental study on the effects of valve timing on combustion efficiency and exhaust emissions in diesel engines," *Energy Convers. Manag.*, vol. 167, pp. 120-131, 2018.
- [9] A. Shintawaty, "Prospek Pengembangan Biodiesel dan Bioetanol sebagai Bahan Bakar Alternatif di Indonesia," *Academia*, pp. 1-9, 2006.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 7118-2-2018: Pengukuran Opasitas Gas Buang Kendaraan Bermotor Kategori M, N, dan O," Jakarta, 2018.
- [11] Kementerian Lingkungan Hidup, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2006 Tentang Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Lama," Jakarta, 2006.
- [12] H. Taghavifar, S. Khalilarya, and S. Jafarmadar, "Engine structure modifications effect on the flow behavior, combustion, and performance characteristics of DI diesel engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 20-32, 2014.
- [13] V. Kumar, S. K. Mahla, and A. Sharma, "Impact of valve timing and fuel injection pressure on combustion and emission characteristics of diesel engine," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 41, no. 6, pp. 680-693, 2020.
- [14] J. Kang, C. Chang, Y. Chen, and S. Chang, "Effect of valve timing on fuel economy and exhaust emissions of a heavy-duty diesel engine," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 135, no. 3, p. 032801, 2013.
- [15] Y. Zhang, H. Liu, C. Liu, and A. A. Reitz, "Valve train wear and its effect on engine performance and oil consumption," *Wear*, vol. 350-351, pp. 54-62, 2016.
- [16] S. K. Jha, S. Fernando, and S. D. Filip To, "Effect of engine parameters and fuel properties on diesel engine emissions - a review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 186, pp. 546-570, 2019.
- [17] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [18] S. Diaz, J. Miller, and F. Ameratunga, "Estimation of the effects of inspection and maintenance programs on vehicle emissions," *Atmos. Environ.*, vol. 104, pp. 98-107, 2015.
- [19] M. Yao, Z. Zheng, and H. Liu, "Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 5, pp. 398-437, 2009.
- [20] P. Singh, S. N. Tiwari, R. Singh, and R. Kumar, "Effect of valve timing and fuel injection pressure on performance of a diesel engine fueled with biodiesel from waste cooking oil," *Energy Sources, Part A: Recovery, Util. Environ. Eff.*, vol. 42, no. 10, pp. 1223-1235, 2020.