

Studi Simulasi Pengaruh Variasi Waktu Injeksi Terhadap Karakteristik Pembakaran dan Emisi Gas Buang Mesin Diesel 1 Silinder Berbahan Bakar Biodiesel B30

Yoga Arob Wicaksono^{1*}, Ahmad Arbi Trihatmojo¹, Berto Yusuf Nugroho¹,
Kuntang Winangun²

¹Prodi Pemeliharaan Kendaraan Ringan, Akademi Komunitas Negeri Pacitan
Jl. Walanda Maramis 4A Pacitan, Jawa Timur, Indonesia

²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jl. Budi Utomo 10 Ponorogo, Jawa Timur, Indonesia

*Corresponding author: yoga.arob@aknpacitan.ac.id

Abstract

Diesel engines that use biodiesel fuel require adjustment of engine operating parameters to obtain optimal engine performance and exhaust emissions. Injection time is one of the parameters that has a big influence on engine performance, combustion and exhaust emissions of diesel engines. This research was conducted to predict the effect of injection time on combustion characteristic and exhaust emissions of diesel engines using B30 biodiesel fuel. The simulation performed at six injection timings (13°, 15°, 17°, 19°, 21°, and 23° crank angle (CA) before Top Dead Center (bTDC). The simulation was carried out using ANSYS FORTE CFD software. The results showed that by advancing injection timing can increase combustion pressure, heat release and cylinder temperature. Meanwhile exhaust gas emissions of CO, HC and smoke particles have decreased significantly, but there has been an increase in NOx emissions.

Keywords: diesel, simulation, biodiesel, injection timing, combustion, emission

Abstrak

Mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel membutuhkan penyesuaian parameter operasi mesin untuk mendapatkan performa mesin dan emisi gas buang yang optimal. Waktu injeksi adalah salah satu parameter yang berpengaruh besar terhadap performa mesin, pembakaran dan emisi gas buang mesin diesel. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi pengaruh waktu injeksi terhadap karakteristik pembakaran dan emisi gas buang mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel B30. Simulasi dilakukan pada enam waktu injeksi (13°, 15°, 17°, 19°, 21°, dan 23° *crank angle (CA) before Top Dead Center (bTDC)*). Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS FORTE CFD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan memajukan waktu injeksi mampu meningkatkan tekanan pembakaran, pelepasan panas dan temperatur silinder. Sedangkan emisi gas buang CO, HC dan partikel asap menurun signifikan, namun terjadi peningkatan emisi NO_x.

Kata kunci: mesin, simulasi, biodiesel, waktu injeksi, pembakaran, emisi

1. Pendahuluan

Mesin diesel banyak digunakan di berbagai sector seperti transportasi dan pembangkit karena ketahanannya dan efisiensi termal yang lebih tinggi. Ada dua masalah utama yang difokuskan pada penerapan mesin diesel, salah satunya terkait dengan kenaikan biaya bahan bakar diesel, dan pengendalian dua polutan penting; nitrogen oksida (NO_x) dan asap. Selain itu, mesin diesel juga berperan dalam peningkatan emisi CO, CO₂, HC dan senyawa berbahaya lainnya [1]. Untuk mengatasi masalah tersebut, banyak kelompok penelitian yang secara aktif

terlibat dalam produksi dan pemanfaatan bahan bakar alternatif baru dan terbarukan untuk transportasi dan pembangkit listrik. Contoh bahan bakar alternatif yang dapat menggantikan solar untuk mesin diesel antara lain biofuel, hidrogen, gas alam cair dan gas [2]. Dalam beberapa tahun terakhir, bahan bakar alternatif seperti biodiesel dianggap mampu menggantikan bahan bakar minyak. Biodiesel bebas sulfur, bersih, terbarukan, biodegradable, dan tidak beracun. Selain itu, dapat dibuat dari bahan tanaman alami seperti minyak sawit [3]. Biodiesel bebas sulfur, bersih, terbarukan, biodegradable, dan tidak beracun. Selain itu,

dapat dibuat dari bahan tanaman alami seperti minyak sawit. Selanjutnya, bentuk biodiesel ini sudah tersedia di Asia Tenggara, terutama di Malaysia dan Indonesia. Sedangkan pada tahun 2016, luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 11,67 juta hektar, meningkat sepuluh tahun. Selain itu, biodiesel yang dihasilkan dari *Crude Palm Oil* (CPO) dianggap ramah lingkungan [4]. Biodiesel memiliki kelebihan *cetane number* yang lebih tinggi sehingga mampu mengurangi emisi SO_x , HC, dan partikulat. Hal ini disebabkan karena biodiesel memiliki kandungan oksigen yang tinggi dan dapat mengurangi emisi pada sistem pembuangan. Namun, biodiesel juga memiliki kekurangan, antara lain volatilitas rendah, viskositas tinggi, dan densitas tinggi sehingga lebih sulit untuk diatomisasi [5].

Biodiesel berbeda dengan bahan bakar fosil, namun memiliki sifat kimia dan fisik yang sama. Parameter mesin seperti rasio kompresi, waktu injeksi, dan tekanan injeksi mungkin tidak optimal untuk biodiesel, karena mesin dirancang untuk menggunakan bahan bakar diesel konvensional [6]. Penggunaan biodiesel tanpa modifikasi mesin dapat menyebabkan efisiensi termal menurun dan peningkatan emisi *smoke* pada mesin [7]. Dengan melihat kekurangan tersebut, maka diperlukan strategi untuk mengoptimalkan proses pembakaran pada mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel.

Untuk menganalisa penerapan biodiesel pada mesin dapat menggunakan dua metode, yaitu simulasi dan eksperimen. Simulasi dapat menekan waktu dan biaya penelitian, sehingga metode ini banyak digunakan peneliti. Hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen untuk menjamin validitas simulasi. Salah satu metode simulasi yang banyak digunakan peneliti adalah 3D *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD untuk menganalisis mesin diesel mampu memberikan pengetahuan proses dan kondisi didalam silinder yang tidak bisa dijangkau dengan eksperimen pengukuran

output mesin, konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang [8].

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya menyatakan bahwa waktu injeksi adalah salah satu strategi untuk mengontrol proses pembakaran, output mesin dan emisi. Penelitian ini membahas analisa numerik dan validasi eksperimen variasi *injection timing* terhadap karakteristik pembakaran mesin diesel 1 silinder berbahan bakar biodiesel B30. Parameter pembakaran yang diteliti yaitu, tekanan silinder, temperatur silinder, dan laju pelepasan panas. Sedangkan parameter emisi gas buang yang diteliti adalah CO , HC , NO_x , dan *particulate matter*.

2. Metode Penelitian

2.1 Model Numerik

Model numerik yang digunakan pada penelitian ini berbasis pada perangkat lunak *computational fluid dynamics* (CFD) ANSYS FORTE Student Edition.

2.2 Domain Komputasi

Tabel 1. Spesifikasi mesin

Parameter	Spesifikasi
Tipe Mesin	Diamond DI800
Kecepatan mesin	1500 rpm
Diameter x langkah piston	82 x 87 mm
Tipe piston	<i>Bowl-in piston</i>
Kapasitas silinder	411 cc
Rasio kompresi	18:1
Tekanan injeksi	220 kg/cm ²
Waktu injeksi pilot	13°
Durasi katup hisap	Buka 30° sebelum Titik Mati Atas (TMA) Tutup 50° sesudah TMA
Durasi katup buang	Buka 55° sebelum Titik Mati Bawah (TMB) Tutup 35° sesudah TMA
Daya mesin	8 HP

Simulasi dilakukan dengan menggunakan kode ANSYS FORTE CFD

dengan *solver chemkin*. Studi numerik dilakukan pada mesin diesel satu silinder yang dioperasikan pada beban konstan 1500 rpm. Spesifikasi teknis dari mesin dan kondisi pengoperasian yang digunakan disajikan pada Tabel 1. Parameter awal simulasi disajikan pada Tabel 2. Tabel 3 menyajikan kondisi operasi mesin yang disimulasikan pada variasi waktu injeksi.

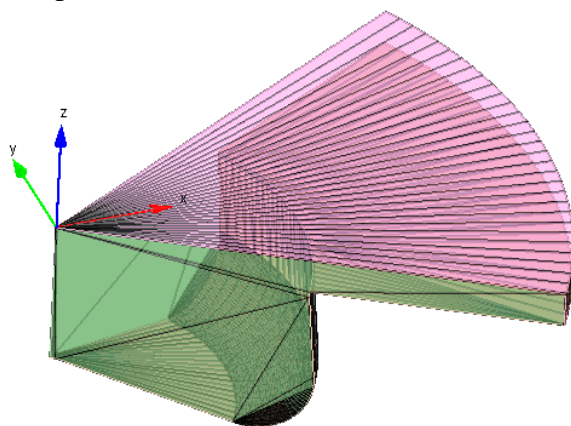
Tabel 2. Parameter awal simulasi

Parameter	Spesifikasi
Temperatur awal	362K
Temperatur <i>liner</i>	500K
Temperatur <i>head</i>	500K
Temperatur piston	500K
EGR	0%

Tabel 3. Kondisi operasi mesin yang disimulasikan

Titik uji	Putaran mesin (rpm)	Waktu injeksi (<i>crank angle/CA before Top Dead Center/bTDC</i>)
1	1500	13
2	1500	15
3	1500	17
4	1500	19
5	1500	21
6	1500	23

Gambar 1 menunjukkan sektor mesh 60° ruang bakar dalam tiga dimensi di posisi TDC. Simulasi dilakukan pada sistem tertutup dari *intake valve closed/IVC* pada -165°CA bTDC hingga *exhaust valve open/EVO* pada 150°CA aTDC (*after Top Dead Center*) untuk mengurangi waktu komputasi.



Gambar 1. Model ruang bakar dengan sektor mesh 60°

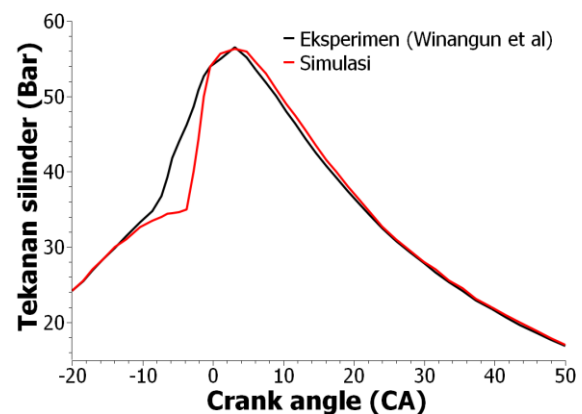
Bahan bakar yang digunakan pada simulasi ini adalah Biodiesel B30 produk PT Pertamina. Komposisi biodiesel B30 adalah 70% HSD (*High Speed Diesel*) dan 30% *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME). Berikut ini adalah tabel spesifikasi bahan bakar Biodiesel B30:

Tabel 4. Spesifikasi bahan bakar Biodiesel B30 [9]

Karakteristik	Unit	Hasil	Metode Uji
Angka setana	-	51	ASTM D613
Densitas (15°C)	kg/m ³	815	ASTM D4052
Viskositas (40°C)	mm ² /s	2	ASTM D445
Titik nyala	°C	370	ASTM D93
Titik kabut	°C	18	ASTM D2500
Kandungan FAME	% v/v	30	ASTM D7806

2.3 Validasi Model

Eksperimen yang digunakan untuk validasi tekanan pembakaran didalam silinder dilakukan sebelumnya oleh Winangun et al [10]. Mesin dioperasikan pada putaran 1500 rpm, waktu injeksi 13° CA, dan menggunakan bahan bakar biodiesel. Gambar 2 dibawah ini menunjukkan perbandingan antara eksperimen dan simulasi tekanan pembakaran didalam silinder. Tren grafik simulasi sesuai dengan eksperimen.



Gambar 2. Perbandingan tekanan pembakaran antara eksperimen dan simulasi pada putaran mesin 1500 rpm dan waktu injeksi 13° CA bTDC

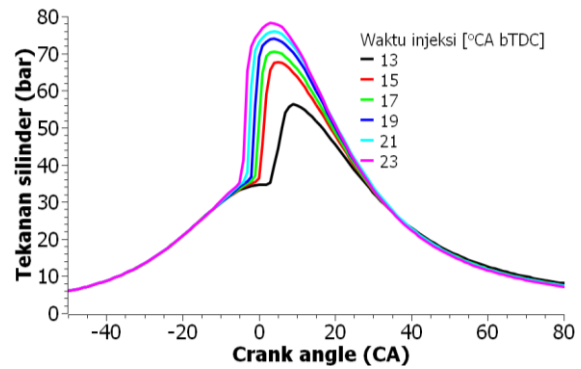
3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini terdiri dari 2 bagian pembahasan. Bagian pertama membahas tentang pengaruh variasi waktu injeksi terhadap karakteristik pembakaran seperti tekanan didalam silinder, laju pelepasan panas/*heat release rate* (HRR), dan temperatur gas rata-rata. Bagian kedua membahas pengaruh variasi waktu injeksi terhadap tingkat emisi gas buang antara lain: CO, HC, NO_x dan *particulate matter* (PM).

3.1 Karakteristik Pembakaran

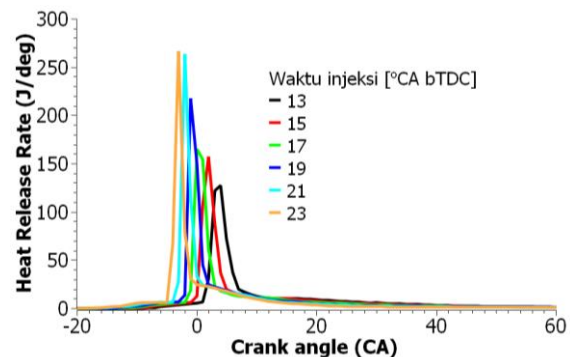
Gambar 3 dan 4 adalah grafik pengaruh variasi waktu injeksi terhadap tekanan silinder dan laju pelepasan panas. Seperti yang ditunjukkan pada grafik bahwa puncak tekanan pembakaran semakin tinggi seiring dengan majunya waktu injeksi bahan bakar. Ketika waktu injeksi dimajukan mulai dari 13° sampai 23°CA bTDC, penundaan pembakaran lebih panjang dan fase pembakaran mundur. Waktu tunda penyalaan lebih lama meningkatkan laju pencampuran udara dan bahan bakar sehingga pembakaran sempurna menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi [11][12].

Ketika waktu injeksi mendekati titik mati atas pada langkah kompresi, penundaan pengapian menjadi lebih pendek. Akibatnya fraksi bahan bakar terbakar lebih tinggi pada pembakaran difusi, sehingga menurunkan tekanan pembakaran maksimum silinder. Karena penundaan pengapian yang lebih pendek ini, puncak tekanan menjadi lebih kecil dan juga bergeser menjadi dari posisi titik mati atas pada langkah ekspansi. Pergeseran ini terlihat jelas pada grafik laju pelepasan panas dimana puncak grafik bergeser menjauhi titik mati atas pada langkah ekspansi dengan waktu injeksi yang lebih mundur [13]. Waktu injeksi bahan bakar pada mesin diesel mempengaruhi kondisi pembakaran. Memajukan waktu injeksi memperpanjang penundaan pembakaran sehingga berdampak positif pada peningkatan tekanan pembakaran dan temperatur silinder [14], [15].



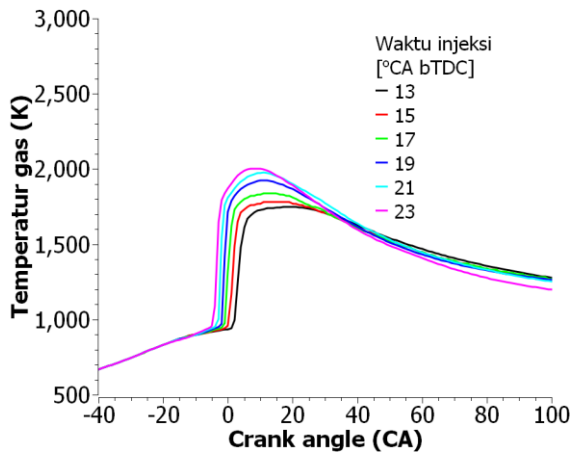
Gambar 3. Grafik tekanan silinder terhadap crank angle

Heat release rate (HRR) adalah laju pelepasan energi kimia bahan bakar saat proses pembakaran. Proses pembakaran pada mesin diesel dapat dipelajari dengan bantuan grafik HRR[16]. Gambar 4 menunjukkan grafik laju pelepasan panas/HRR dari mesin diesel dengan variasi waktu injeksi. Grafik tersebut mengindikasikan bahwa puncak dari laju pelepasan panas secara signifikan dipengaruhi oleh waktu injeksi utama.



Gambar 4. Grafik laju pelepasan panas/*heat release rate* terhadap crank angle

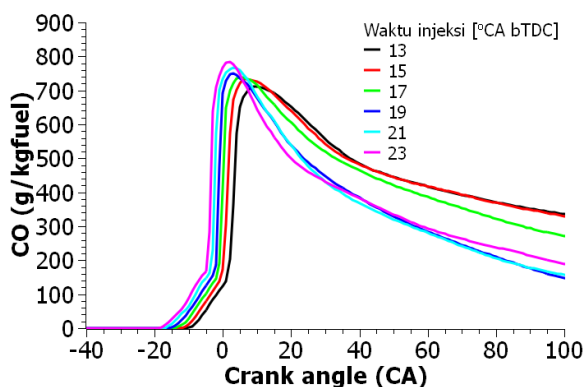
Gambar 5 menunjukkan bahwa dengan memajukan waktu injeksi mulai 13° sampai 23° CA bTDC dapat mengakibatkan peningkatan temperatur gas di dalam silinder. Tren grafik secara umum menunjukkan bahwa temperatur gas meningkat seiring dengan majunya waktu injeksi. Puncak temperatur gas didalam silinder paling tinggi dicapai pada waktu injeksi 23 CA bTDC mencapai 2000 K.



Gambar 5. Grafik temperatur gas terhadap *crank angle*

3.2 Analisis Emisi

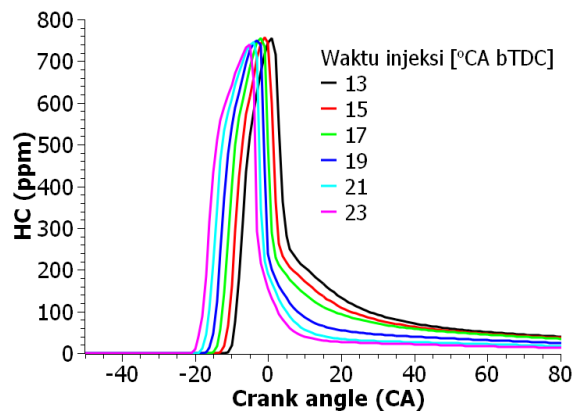
Gambar 6 menunjukkan grafik emisi CO biodiesel pada variasi waktu injeksi. Tingkat emisi tertinggi dicapai pada waktu injeksi 13°CA bTDC. Tingkat kandungan CO menurun ketika waktu injeksi dimajukan sampai 23°CA bTDC. Fenomena ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa, emisi CO pada waktu injeksi yang maju lebih rendah dibanding waktu injeksi standar [17]. Waktu injeksi yang lebih maju meningkatkan pencampuran udara-bahan bakar karena tersedia lebih banyak waktu untuk proses pencampuran. Oleh karena itu hal ini juga menyebabkan emisi CO dan HC yang lebih rendah [13].



Gambar 6. Grafik emisi CO terhadap *crank angle*

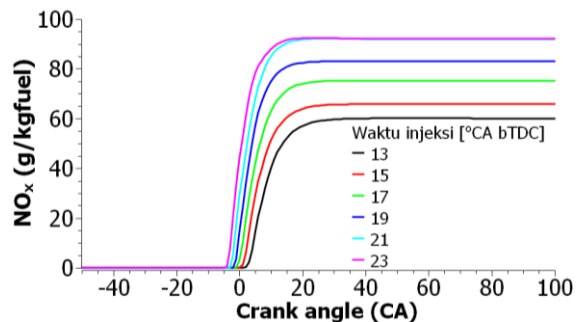
Gambar 7 mengilustrasikan pengaruh waktu injeksi terhadap emisi gas buang HC. Tingkat kandungan HC pada waktu injeksi pada 13°CA bTDC mencapai 755 ppm. Seiring dengan majunya waktu

injeksi tingkat kandungan emisi HC semakin turun. Tingkat emisi HC paling rendah dicapai pada waktu injeksi 23°CA bTDC sebesar 725 ppm. Analisis emisi HC ini didukung dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa, ada perbaikan dalam siklus penguapan dan peningkatan lebih lanjut selama persiapan campuran udara-bahan bakar, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap pembakaran yang bersih [18].



Gambar 7. Grafik emisi HC terhadap *crank angle*

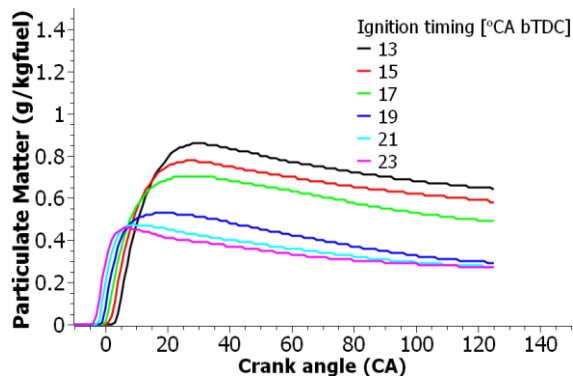
Gambar 8 menunjukkan grafik emisi NO_x pada variasi waktu injeksi. Seperti yang tersaji di gambar bahwa pada waktu injeksi 13°CA bTDC tingkat emisi NO_x rendah.



Gambar 8. Grafik emisi NO_x terhadap *crank angle*

Seiring dengan majunya waktu injeksi, emisi NO_x semakin meningkat. Emisi NO_x mencapai titik paling tinggi pada terjadi pada waktu injeksi 23°CA bTDC. Fenomena ini didukung dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa, pembentukan NO_x sangat bergantung pada temperatur maksimum gas pembakaran, kandungan oksigen, dan waktu tinggal yang tersedia agar reaksi dapat berlangsung pada kondisi ekstrim tersebut

[19][20][21]. Dengan memajukan waktu injeksi, partikel bahan bakar yang terbakar tetap berada di dalam silinder dan panas yang dilepaskan dari dinding silinder juga meningkatkan suhu silinder sehingga menghasilkan pembentukan NO_x[22].



Gambar 9. Grafik emisi PM terhadap *crank angle*

Gambar 9 menunjukkan tingkat emisi *particulate matter*/PM terhadap *crank angle* pada masing-masing variasi waktu injeksi bahan bakar. Seperti yang tersaji pada grafik, tingkat emisi PM menurun seiring dengan waktu injeksi yang maju. Tingkat emisi terendah dicapai pada waktu injeksi 23°CA bTDC. Alasan rendahnya emisi karena mesin dioperasikan dengan waktu injeksi optimal 23°CA bTDC, karena waktu tunggu pencampuran bahan bakar dan udara lebih lama sehingga menghasilkan pembakaran yang bersih [23].

4. Kesimpulan

Penggunaan bahan bakar biodiesel untuk bahan bakar mesin diesel membutuhkan pengaturan parameter injeksi pada mesin. Pada penelitian ini telah dipelajari bagaimana pengaruh variasi waktu injeksi terhadap karakteristik pembakaran dan emisi gas buang mesin diesel dengan metode simulasi numerik. Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa waktu injeksi 23° bTDC memberikan karakteristik pembakaran dan emisi yang lebih baik dibandingkan dengan waktu injeksi standar. Pada waktu injeksi 23° bTDC, penundaan pembakaran lebih lama sehingga berdampak positif pada

peningkatan tekanan pembakaran dan temperatur silinder. Sedangkan karakteristik emisi gas buang CO, HC dan asap dapat dikurangi dengan waktu injeksi 23° bTDC. Namun, emisi NO_x mengalami peningkatan signifikan, seiring dengan peningkatan waktu injeksi. Hal ini disebabkan karena temperatur silinder yang meningkat, sehingga terbentuk emisi NO_x yang lebih tinggi. Masalah emisi NO_x ini bisa menjadi topik penelitian lanjutan yang bisa diteliti dimasa yang akan datang.

Ucapan terimakasih

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada UPPM-PM Akademi Komunitas Negeri Pacitan yang telah mendukung penelitian ini lewat dana hibah penelitian internal.

Referensi

- [1] P. Mohamed Shameer, K. Ramesh, R. Sakthivel, and R. Purnachandran, "Effects of fuel injection parameters on emission characteristics of diesel engines operating on various biodiesel: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67. Elsevier Ltd, pp. 1267–1281, Jan. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.117.
- [2] A. K. Wamankar, A. K. Satapathy, and S. Murugan, "Experimental investigation of the effect of compression ratio, injection timing & pressure in a DI (direct injection) diesel engine running on carbon black-water-diesel emulsion," *Energy*, vol. 93, pp. 511–520, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.09.068.
- [3] K. Winangun, A. Setiyawan, and B. Sudarmanta, "The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 42, p.

- 102755, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102755.
- [4] A. Setiyawan, K. Winangun, and V. Sania, "Effect of Stored Dexlite and Palm Oil Biodiesel on Fuel Properties, Performance, and Emission of Single-Cylinder Diesel Engines," in *Recent Advances in Renewable Energy Systems*, M. Kolhe, A. Muhammad, A. El Kharbachi, and T. Y. Yuwono, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 333–340.
- [5] A. Bhikuning, Z. R. Irhashi, and D. Aldebaran, "The Simulation of Combustion Characteristics from Diesel Fuel and Biodiesel in Different Engine Rotation," *Aceh International Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 182–189, Dec. 2022, doi: 10.13170/aijst.11.3.22711.
- [6] V. Goel, N. Kumar, and P. Singh, "Impact of modified parameters on diesel engine characteristics using biodiesel: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82. Elsevier Ltd, pp. 2716–2729, Feb. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.112.
- [7] K. Winangun *et al.*, "Penggunaan bahan bakar terbarukan (biodiesel-hidrogen) pada mesin diesel dual fuel untuk mendukung energy transition di Indonesia," 2023, doi: 10.24127/trb.v12i1.2532.
- [8] M. Hawi, A. K. Abdel-Rahman, M. Bady, and S. Ookawara, "Prediction Of Diesel Combustion And Emission Characteristics In CI Engine Using Computational Fluid Dynamics Simulations-asme/terms-of-use." [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [9] PT Pertamina, "SPESIFIKASI PRODUK BBM, BBN & LPG." Accessed: Mar. 24, 2023. [Online]. Available: https://onesolution.pertamina.com/Product/Download?filename=20201201035120atc_spesifikasi.pdf
- [10] K. Winangun, A. Setiyawan, and B. Sudarmanta, "The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 42, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102755.
- [11] D. Babu and R. Anand, "Influence of fuel injection timing and nozzle opening pressure on a CRDI-assisted diesel engine fueled with biodiesel-diesel-alcohol fuel," in *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, Elsevier, 2018, pp. 353–390. doi: 10.1016/B978-0-08-102728-8.00013-9.
- [12] H. Zhou, H. W. Zhao, Y. P. Huang, J. H. Wei, and Y. H. Peng, "Effects of injection timing on combustion and emission performance of dual-fuel diesel engine under low to medium load conditions," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2019, doi: 10.3390/en12122349.
- [13] A. K. Agarwal, D. K. Srivastava, A. Dhar, R. K. Maurya, P. C. Shukla, and A. P. Singh, "Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine," *Fuel*, vol. 111, pp. 374–383, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2013.03.016.
- [14] Y. Liu, B. Xu, J. Jia, J. Wu, W. Shang, and Z. Ma, "Effect of Injection Timing on Performance and Emissions of DI-diesel Engine Fueled with Isopropanol," 2015.
- [15] H. M. Baek, G. S. Jung, Q. D. Vuong, J. U. Lee, and J. W. Lee, "Effect of Performance by Excessive Advanced Fuel Injection Timing on Marine Diesel Engine," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 16, Aug. 2023, doi: 10.3390/app13169263.

- [16] T. N. Puri Lng, L. R. Soni Lng, and S. Deshpande, "Combined Effects of Injection Timing and Fuel Injection Pressure on Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine Numerically Using CONVERGE CFD Tool," in *SAE Technical Papers*, SAE International, Jul. 2017. doi: 10.4271/2017-28-1953.
- [17] A. Saravanan, M. Murugan, M. Sreenivasa Reddy, and S. Parida, "Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua," *Fuel*, vol. 263, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116751.
- [18] A. Sharma, Y. Singh, N. K. Singh, and A. Singla, "Sustainability of jojoba biodiesel/diesel blends for DI diesel engine applications- taguchi and response surface methodology concept," *Ind Crops Prod*, vol. 139, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111587.
- [19] J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamental."
- [20] X. Zhang, "Analysis and Optimisation of a Novel Wind Turbine," no. July, 2013.
- [21] C. Sayin and M. Canakci, "Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine," *Energy Convers Manag*, vol. 50, no. 1, pp. 203–213, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.06.007.
- [22] S. V. Karthic, M. Senthil Kumar, G. Nataraj, and P. Pradeep, "An assessment on injection pressure and timing to reduce emissions on diesel engine powered by renewable fuel," *J Clean Prod*, vol. 255, May 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120186.
- [23] H. S. Ghaziaskar and C. C. Xu, "One-step continuous process for the production of 1-butanol and 1-hexanol by catalytic conversion of bio-ethanol at its sub-/supercritical state," *RSC Adv*, vol. 3, no. 13, pp. 4271–4280, Apr. 2013, doi: 10.1039/c3ra00134b.