ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN BAHAN BAKAR ALKOHOL TERHADAP PELEPASAN PANAS DAN KINERJA MESIN PEMBAKARAN

Tri Susilo Wirawan [1]

[1] Program Studi Teknik Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jl. Perintis Kemerdekaan KM.10, Tamalanrea, Makassar

wirawantrisusilo@poliupg.ac.id [1]

Abstrak

Mesin bensin memegang peran penting di sektor transportasi, namun ketergantungan pada bensin berbasis fosil yang kian menipis mendorong kebutuhan akan sumber energi terbarukan. Untuk itu, metanol bahan bakar alkohol terbarukan dari bahan nabati diuji dalam campuran 20% dengan bensin pada mesin bensin TV-1 berdaya 4,50 kW, satu silinder, empat langkah, dan volume 661,45 cc. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran metanol meningkatkan tekanan silinder dan pelepasan panas, dengan selisih maksimum masing-masing sebesar 1,91 bar dan 1,64 J/°C dibandingkan bensin murni. Namun, konsumsi bahan bakar spesifik campuran metanol tercatat 8,7% lebih tinggi. Penelitian ini akan membuktikan bahwa campuran metanol mampu meningkatkan performa pembakaran mesin bensin tanpa perubahan besar pada desain mesin, sehingga menawarkan alternatif energi terbarukan untuk sektor transportasi.

Kata kunci : bensin, metanol, alkohol, mesin, energi terbarukan.

Abstract

Gasoline engines remain vital in the transportation sector; however, the increasing depletion of fossil fuel reserves necessitates the exploration of renewable energy alternatives. In this study, methanol a renewable alcohol based fuel derived from biomass was blended at 20% with gasoline and tested on a TV-1 gasoline engine with a power output of 4.50 kW, single-cylinder, four-stroke configuration, and a displacement of 661.45 cc. The experimental results indicated that the methanol-gasoline blend enhanced cylinder pressure and heat release rates, with maximum increases of 1.91 bar and 1.64 J/°C, respectively, compared to pure gasoline. Nevertheless, the specific fuel consumption of the methanol blend was 8.7% higher than that of pure gasoline. This study contributes to the body of knowledge by demonstrating that methanol blending can improve combustion performance without requiring significant modifications to existing engine designs, thus presenting a promising renewable energy alternative for the transportation sector.

Key words : *gasoline, methanol, alkohol, engine, renewable energi.*

PENDAHULUAN

Proses Kemajuan teknologi transportasi telah mendorong pengembangan berbagai jenis mesin pembakaran dalam, termasuk mesin Otto yang banyak digunakan pada kendaraan penumpang. Hingga saat ini, mesin bensin masih menjadi tulang punggung sektor transportasi dan industri, terutama di negara-negara berkembang. Di Indonesia, lebih dari 98% kendaraan penumpang masih mengandalkan bensin sebagai bahan bakar utama [1]. Pada tahun 2019, konsumsi bensin nasional mencapai 201 ribu barel per hari [2], mencerminkan ketergantungan yang sangat tinggi terhadap sumber daya fosil. Namun, ketersediaan minyak bumi sebagai bahan bakar fosil tidak dapat dipertahankan dalam jangka panjang. Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2025, pasokan minyak bumi hanya akan mencapai 651,092 juta barel, sedangkan kebutuhan global diperkirakan mencapai 719,048 juta barel [3]. Ketimpangan ini menandakan urgensi dalam pencarian sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan.

Dalam menghadapi tantangan krisis energi global, bahan bakar alternatif dari sumber daya terbarukan menjadi pilihan strategis. Sumber energi ini diharapkan tidak hanya mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga dapat digunakan tanpa memerlukan modifikasi besar terhadap desain mesin yang ada [4]. Beberapa jenis bahan bakar alternatif, seperti bioetanol, telah dikembangkan dari bahan-bahan berbasis pertanian. Namun, penggunaan etanol berbasis glukosa dari tanaman pangan utama menimbulkan kekhawatiran terkait potensi gangguan terhadap ketahanan pangan

dan kestabilan ekonomi apabila digunakan secara luas. Oleh karena itu, bahan bakar rendah karbon dari sumber non-pangan seperti alkohol sintetik atau metanol yang berasal dari biomassa dan limbah padat kota (municipal solid waste/MSW) menjadi alternatif yang semakin menarik untuk diteliti [5].

Metanol merupakan salah satu kandidat bahan bakar yang menjanjikan karena berbagai keunggulan yang dimilikinya. Sebagai alkohol paling sederhana (CH_3OH), metanol memiliki karakteristik pembakaran yang bersih, efisiensi energi yang tinggi, serta biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan bahan bakar fosil konvensional [6]. Dengan berat molekul 32,04 dan titik didih 64,5°C, metanol bersifat mudah menguap dan terbakar, menjadikannya bahan bakar yang efisien untuk mesin pembakaran dalam. Selain itu, metanol dapat diproduksi dari berbagai sumber terbarukan yang tidak bersaing langsung dengan sektor pangan, sehingga lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan [7].

Dalam konteks transisi energi dan pengembangan teknologi bahan bakar bersih, penggunaan metanol sebagai campuran bahan bakar dalam mesin bensin perlu dieksplorasi lebih lanjut. Penggunaan campuran metanol-bensin dapat menjadi solusi praktis untuk mengurangi emisi karbon tanpa mengorbankan performa mesin [8]. Namun demikian, aplikasi metanol dalam jumlah besar pada sistem bahan bakar tidak terlepas dari tantangan teknis yang perlu diatasi. Salah satu isu utama adalah potensi korosi pada komponen logam akibat sifat kimia alkohol yang agresif terhadap material logam [9]. Hal ini menuntut pengembangan strategi teknis seperti penyesuaian rasio campuran atau inovasi dalam desain sistem bahan bakar untuk meminimalkan dampak negatif tersebut [10].

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini berjudul "Analisis Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Alkohol terhadap Pelepasan Panas dan Kinerja Mesin Pembakaran" bertujuan untuk mengevaluasi performa termal mesin pembakaran dalam yang menggunakan campuran metanol dan bensin. Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan bahan bakar alternatif yang tidak hanya efisien dan bersih, tetapi juga layak secara teknis dan ekonomis untuk digunakan dalam sistem kendaraan modern [11].

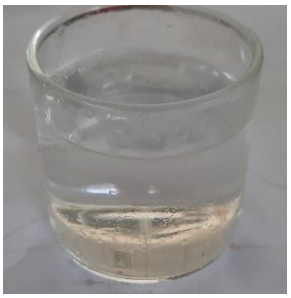
METODE PENELITIAN

Metode Penelitian ini dilakukan di laboratorium mesin pembakaran dalam di Universitas Hasanuddin. Mesin yang digunakan adalah mesin bensin penelitian dengan daya keluaran 4,50 kW pada kecepatan maksimum 1800 rpm. Mesin ini memiliki 1 silinder, empat langkah, kecepatan variabel 1200-1800 rpm, berpendingin air, dengan diameter silinder 87,50 mm, panjang langkah 110,00 mm, panjang batang penghubung 234,00 mm, rasio kompresi 10, dan volume silinder 661,45 cc. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software ICenginesoft* dan dilakukan dengan mengambil rata rata nilai dari 3 percobaan.

Gambar 1 Mesin Bensin

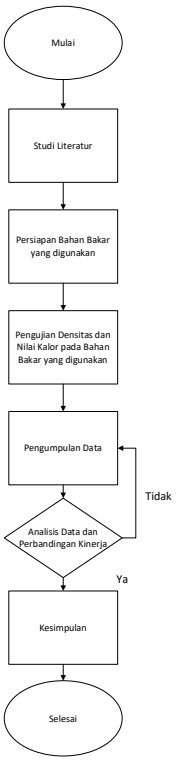
Bahan bakar yang digunakan adalah bensin kelas industri dengan angka oktan 90, dan alkohol yang digunakan adalah metanol dengan kemurnian 99%. Persentase campuran yang digunakan adalah 20% metanol dan 80% bensin, yang kemudian disimbolkan sebagai A20. Pencampuran metanol dan bensin dilakukan secara terpisah sebelum dimasukkan ke dalam tangki. Uji nilai kalor dan densitas dilakukan sebelum pengumpulan data pada mesin bensin. Uji nilai kalor dilakukan menggunakan kalorimeter bom pada semua sampel bahan bakar.

Gambar 2 Bensin RON 90



Gambar 3. Metanol

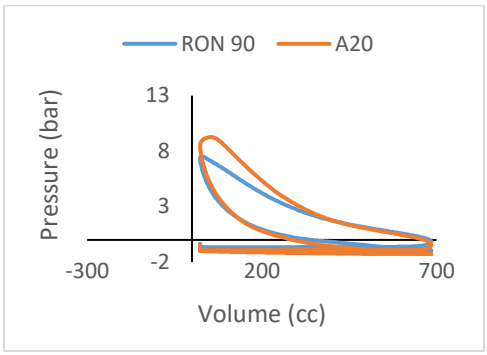
Sebelum mengumpulkan data dalam kondisi yang diinginkan, mesin dioperasikan pada putaran kosong selama 4-5 menit. Kondisi operasional dicapai secara bertahap dengan meningkatkan pembukaan throttle ke 1200 rpm, kemudian 1400, 1600, hingga 1800 rpm dengan rasio kompresi 10 dan beban 1 kg.



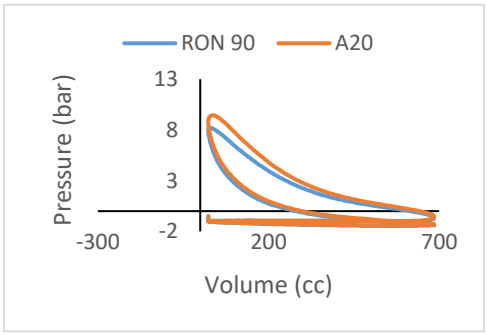
Gambar 4. Flowchart Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

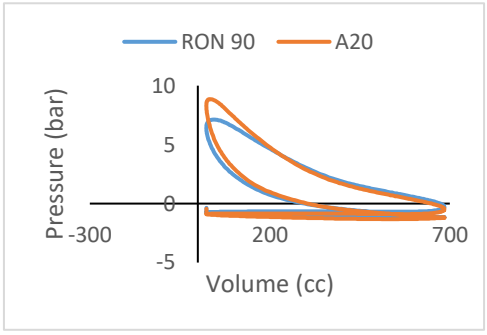
Bagian ini memuat data (dalam bentuk ringkas), analisis data dan interpretasi terhadap hasil. Pembahasan dilakukan dengan mengkaitkan studi empiris atau teori untuk interpretasi.



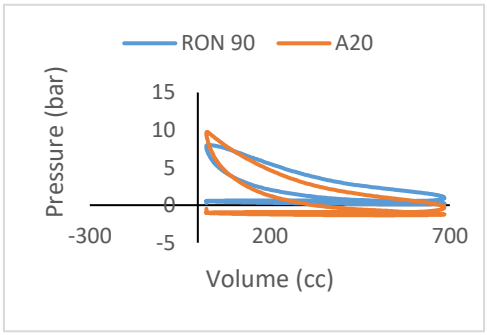
Gambar 5. Hubungan antara volume dan tekanan di dalam ruang bakar pada 1200 rpm.



Gambar 6. Hubungan antara volume dan tekanan di dalam ruang bakar pada 1400 rpm.



Gambar 7. Hubungan antara volume dan tekanan di dalam ruang bakar pada 1600 rpm.



Gambar 8. Hubungan antara volume dan tekanan di dalam ruang bakar pada 1800 rpm.

Gambar 5 hingga Gambar 8 menunjukkan hubungan antara tekanan silinder dan volume

silinder pada berbagai kecepatan putaran mesin, yakni dari 1200 rpm hingga 1800 rpm. Kurva-kurva ini menggambarkan dinamika tekanan di dalam ruang bakar sepanjang siklus kerja mesin, mencerminkan pengaruh kombinasi bahan bakar terhadap proses pembakaran. Secara umum, terlihat bahwa pada semua kecepatan yang diuji, penggunaan campuran bensin dengan metanol menghasilkan tekanan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan bensin murni.

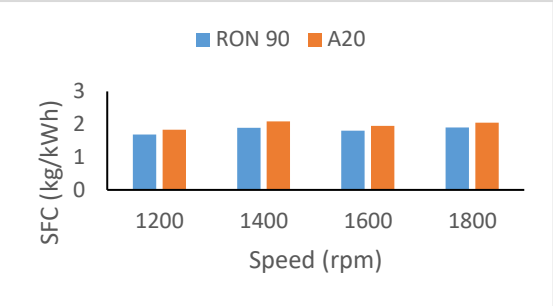
Peningkatan tekanan silinder ini merupakan indikasi dari efisiensi pembakaran yang lebih baik. Salah satu faktor utama yang menyebabkan fenomena ini adalah karakteristik kimia metanol. Metanol, sebagai alkohol dengan struktur CH_3OH, mengandung oksigen dalam molekulnya. Kehadiran oksigen ini berperan sebagai oksidan tambahan dalam campuran udara-bahan bakar, sehingga mendukung reaksi pembakaran yang lebih cepat dan lebih lengkap. Proses oksidasi yang berlangsung lebih efisien menyebabkan pelepasan energi yang lebih besar dalam waktu yang lebih singkat, sehingga menghasilkan lonjakan tekanan di dalam [12][13].

Selain itu, metanol memiliki bilangan oktan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bensin konvensional, yakni sekitar 109, dibandingkan dengan 91–95 pada bensin [14]. Nilai oktan yang tinggi memungkinkan mesin bekerja dengan rasio kompresi lebih tinggi tanpa mengalami detonasi dini. Kondisi ini sangat penting dalam konteks termodinamika siklus Otto, di mana peningkatan rasio kompresi berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi termal ideal mesin.

Secara kuantitatif, pengujian menunjukkan bahwa tekanan silinder maksimum saat mesin beroperasi pada 1800 rpm dengan campuran bahan bakar metanol mencapai 9,74 bar. Sebaliknya, pada kondisi serupa dengan penggunaan bensin murni, tekanan maksimum hanya mencapai 8,01 bar. Selisih sebesar 1,73 bar tersebut menandakan perbedaan performa yang substansial, mengingat tekanan puncak di dalam silinder memiliki korelasi langsung terhadap daya indikator serta efisiensi pembakaran.

Hasil ini sejalan dengan temuan [15], yang melaporkan peningkatan tekanan pembakaran maksimum dan efisiensi termal hingga 12% pada mesin bensin yang menggunakan campuran metanol 20% (M20) dibandingkan dengan bensin murni. Selain itu, studi oleh [16], menunjukkan bahwa peningkatan kandungan oksigen dari metanol tidak hanya meningkatkan tekanan pembakaran, tetapi juga secara signifikan mengurangi emisi CO dan HC sebagai hasil dari pembakaran yang lebih lengkap.

Secara keseluruhan, peningkatan tekanan silinder akibat penambahan metanol tidak hanya menunjukkan potensi peningkatan performa mesin, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi yang lebih bersih. Dengan mengoptimalkan karakteristik fisik dan kimia bahan bakar seperti metanol, sistem pembakaran dalam dapat diarahkan menuju efisiensi energi yang lebih tinggi dan keberlanjutan lingkungan jangka panjang.



Gambar 9. Hubungan antara RPM dan konsumsi bahan bakar spesifik di berbagai rentang RPM dan jenis bahan bakar.

Gambar 9 menyajikan pengaruh variasi kecepatan putaran mesin terhadap nilai konsumsi bahan bakar spesifik, atau Brake Specific Fuel Consumption (BSFC), yang merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi efisiensi termal mesin pembakaran dalam. BSFC mengukur banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan daya (kW) dalam satuan waktu (g/kWh), sehingga nilai yang lebih rendah menunjukkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada semua tingkat kecepatan mesin yang diuji (1200–1800 rpm), penggunaan campuran bahan bakar A20 (20% metanol dan 80% bensin) menghasilkan nilai BSFC yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan bensin murni. Peningkatan nilai BSFC ini bersifat konsisten di seluruh rentang putaran mesin dan merupakan konsekuensi dari perbedaan sifat termokimia bahan bakar yang digunakan.

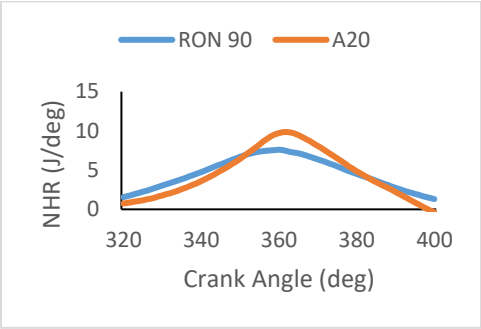
Salah satu faktor utama yang menyebabkan peningkatan BSFC pada penggunaan campuran metanol adalah nilai kalor (lower heating value/LHV) metanol yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan bensin. Nilai kalor metanol hanya sekitar 19.9 MJ/kg, sedangkan bensin memiliki nilai kalor sekitar 43–44 MJ/kg [15]. Rendahnya nilai kalor berarti energi yang dilepas per satuan massa bahan bakar lebih kecil, sehingga untuk menghasilkan daya yang sama, volume bahan bakar yang harus dibakar menjadi lebih besar. Dengan demikian, meskipun A20 hanya mengandung 20% metanol, kandungan tersebut cukup untuk menurunkan densitas energi keseluruhan bahan bakar dan meningkatkan konsumsi bahan bakar per satuan daya.

Secara termodinamika, penurunan efisiensi energi ini juga terkait dengan struktur kimia metanol yang mengandung oksigen internal. Meskipun kandungan oksigen tersebut mendukung pembakaran yang lebih lengkap dan menurunkan emisi gas buang seperti CO dan HC, ia juga mengurangi jumlah energi panas yang dilepaskan karena sebagian dari unsur pengoksidasi telah "tertanam" dalam struktur bahan bakar, bukan berasal dari udara luar. Dalam perbandingan dengan hidrokarbon murni seperti heptana atau iso-oktan dalam bensin, metanol menyimpan lebih sedikit energi bebas untuk dikonversi menjadi kerja mekanis [16].

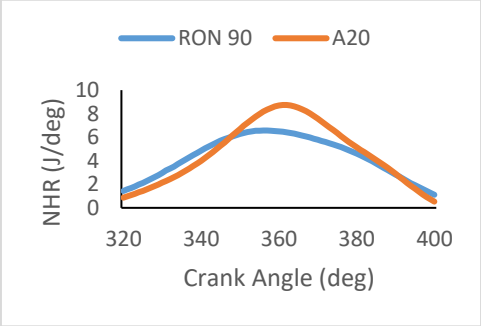
Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh [13], yang menemukan bahwa pada campuran metanol 20–30%, terjadi peningkatan BSFC sebesar 8–15% dibandingkan bensin murni, tergantung kondisi beban dan putaran mesin. Penelitian serupa oleh [9], juga menunjukkan bahwa pada beban parsial dan kecepatan tinggi, BSFC meningkat secara nyata karena kebutuhan penginjeksian bahan bakar yang lebih tinggi akibat densitas energi rendah dari metanol.

Lebih jauh lagi, nilai BSFC yang tinggi juga menunjukkan perlunya penyesuaian sistem pembakaran. Dalam konteks pengoperasian mesin modern, sistem pengapian dan injeksi bahan bakar sangat berperan dalam menentukan efisiensi pembakaran. Penggunaan bahan bakar campuran seperti A20 memerlukan retuning terhadap timing ignition, durasi injeksi, dan rasio udara-bahan bakar (lambda) agar pembakaran dapat berlangsung optimal. Tanpa penyesuaian ini, performa mesin justru dapat menurun meskipun karakteristik pembakaran metanol mendukung efisiensi secara teoritis [6].

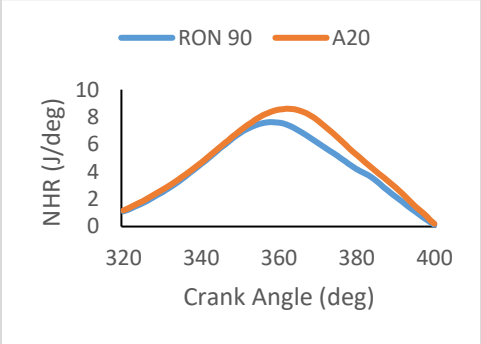
Dengan demikian, meskipun campuran metanol menawarkan sejumlah keunggulan seperti pembakaran bersih, bilangan oktan tinggi, dan pengurangan emisi, tantangan utama dari sisi konsumsi bahan bakar tetap menjadi perhatian. Peningkatan BSFC dalam skenario tanpa optimasi sistem mesin menunjukkan bahwa integrasi bahan bakar alkohol ke dalam aplikasi otomotif membutuhkan pendekatan holistik, termasuk pada aspek desain sistem kontrol dan kalibrasi mesin.



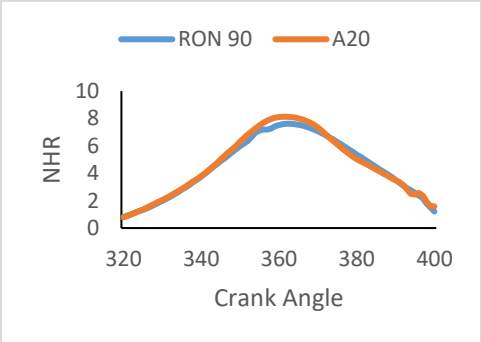
Gambar 10. Hubungan antara sudut engkol dan pelepasan panas bersih pada 1200 RPM



Gambar 11. Hubungan antara sudut engkol dan pelepasan panas bersih pada 1400 RPM



Gambar 12. Hubungan antara sudut engkol dan pelepasan panas bersih pada 1600 RPM.



Gambar 13. Hubungan antara sudut engkol dan pelepasan panas bersih pada 1800 RPM.

Gambar 10 hingga Gambar 13 menyajikan representasi visual hubungan antara laju pelepasan panas (heat release rate, HRR) terhadap sudut engkol (crank angle) pada rentang kecepatan putaran mesin antara 1200 hingga 1800 rpm. Data ini memberikan pemahaman mendalam mengenai dinamika pembakaran dalam ruang silinder, terutama dalam konteks variasi komposisi bahan bakar. Berdasarkan hasil eksperimen, peningkatan rasio kompresi secara konsisten menunjukkan peningkatan signifikan dalam laju pelepasan panas. Secara termodinamika, fenomena ini dapat dijelaskan oleh peningkatan densitas campuran udara dan bahan bakar, yang mengarah pada peningkatan tekanan dan suhu sebelum penyalaan, sehingga mempercepat proses inisiasi pembakaran. Kenaikan suhu dinding silinder akibat kompresi tinggi turut mempercepat laju reaksi kimia, memperpendek jeda pembakaran (ignition delay), dan meningkatkan kecepatan nyala api (flame speed). Keseluruhan efek ini berkontribusi pada pelepasan panas yang lebih intensif, cepat, dan efisien di dalam ruang bakar [17].

Selain rasio kompresi, variabel tekanan silinder selama proses pembakaran memainkan peran krusial terhadap pola pelepasan panas. Tekanan tinggi meningkatkan efisiensi termal karena mempercepat laju reaksi oksidasi dan memperbesar nilai kerja bersih yang dihasilkan dari siklus termodinamik Otto. Penelitian [18], mendukung temuan ini, di mana tekanan puncak yang lebih tinggi berkorelasi dengan peningkatan HRR dan efisiensi energi secara keseluruhan.

Dalam hal jenis bahan bakar, karakteristik kimia dan fisik metanol menjadikannya unggul dibandingkan bensin dalam konteks pelepasan panas. Metanol, dengan struktur molekul sederhana dan titik didih tunggal, memungkinkan penguapan dan pencampuran yang lebih homogen dalam intake manifold dan ruang bakar. Sebaliknya, bensin yang merupakan campuran kompleks dari berbagai hidrokarbon dengan rentang titik didih luas, memiliki kecenderungan menghasilkan pembakaran yang kurang seragam, terutama pada suhu rendah atau kondisi transien. Efek homogenisasi ini menyebabkan pembakaran metanol berlangsung lebih merata dan cepat, yang tercermin dalam nilai HRR yang lebih tinggi [19].

Keunggulan lain dari metanol terletak pada kandungan oksigen intrinsiknya. Molekul CH_3OH mengandung sekitar 50% oksigen berdasarkan massa, yang berfungsi sebagai built-in oxidizer. Oksigen ini memperkaya campuran udara-bahan bakar, meningkatkan laju reaksi oksidasi, dan memungkinkan pembakaran yang lebih lengkap. Sebagai hasilnya, pelepasan panas berlangsung lebih efektif, serta emisi senyawa tidak terbakar seperti CO dan HC dapat ditekan secara signifikan [20].

Hasil eksperimen memperlihatkan bahwa nilai puncak pelepasan panas tertinggi tercapai pada campuran bahan bakar A20 (20% metanol dan 80% bensin) pada kecepatan mesin 1600 rpm, yaitu sebesar 8,61 joule per derajat engkol. Sebagai perbandingan, pada kondisi yang sama, bensin murni hanya menghasilkan HRR maksimum sebesar 7,63 joule per derajat engkol. Selisih sebesar 0,98 J/°CA ini bukan hanya menunjukkan keunggulan termokimia metanol, tetapi juga menunjukkan bahwa pada putaran mesin menengah (1600 rpm), terjadi sinergi optimal antara dinamika pembakaran dan kondisi geometri mesin yang menghasilkan efisiensi termal terbaik. Temuan ini juga konsisten dengan hasil [21], yang melaporkan bahwa penggunaan alkohol dalam komposisi optimal dapat meningkatkan efisiensi sistem pembakaran hingga 10% pada mesin bensin konvensional.

Dengan demikian, kombinasi antara peningkatan rasio kompresi dan pemanfaatan metanol sebagai aditif bahan bakar bensin mampu meningkatkan laju pelepasan panas secara signifikan. Kecepatan mesin 1600 rpm dapat dianggap sebagai titik operasi optimum, di mana parameter desain mesin dan kualitas bahan bakar berpadu secara sinergis untuk menghasilkan pembakaran yang cepat, stabil, dan efisien secara energi. Implikasi praktis dari hasil ini adalah potensi pemanfaatan campuran metanol dalam rasio moderat untuk meningkatkan performa dan efisiensi mesin bensin tanpa memerlukan modifikasi besar pada desain mesin.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan melalui eksperimen dengan bensin dan bensin yang dicampur dengan metanol, ditemukan hasil yang signifikan. Studi ini menunjukkan bahwa bensin yang dicampur dengan 20% metanol menghasilkan tekanan silinder dan pelepasan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan bensin murni. Hasil ini menunjukkan bahwa menambahkan metanol ke bensin dapat meningkatkan kinerja pembakaran dan efisiensi energi. Namun, dalam kondisi pengujian yang sama, konsumsi bahan bakar spesifik untuk campuran metanol juga lebih tinggi dibandingkan dengan bensin murni. Ini menunjukkan bahwa meskipun campuran metanol meningkatkan tekanan silinder dan pelepasan panas, efisiensi bahan bakar keseluruhan menurun karena jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk mencapai hasil yang sama lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Badan Pusat Statistik. (2020). Statistik Transportasi Darat. Jakarta: BPS Indonesia.
[2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2020). Outlook Energi Indonesia 2019. Jakarta: ESDM.
[3] International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook 2021.
[4] Zhang, J., Wang, L., & Zhao, Y. (2021). Renewable fuel adoption in internal combustion engines: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 143, 110934.
[5] Li, X., Guo, J., Wang, J., & Zhang, Y. (2023). Production of methanol from municipal solid waste: Pathways and potential. Bioresource Technology Reports, 21, 101228. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101228.
[6] Song, H., Lee, S. Y., & Kim, J. (2022). The role of methanol as a sustainable fuel: Properties, applications, and production from renewable sources. Journal of Cleaner Production, 367,132955.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132955.
[7] Kumar, S., & Singh, A. (2020). Life cycle assessment of methanol fuel derived from biomass: Environmental and economic implications. Renewable Energy, 155, 350–362. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.128.
[8] Chen, M., Li, H., & Gao, W. (2021). Alcohol-based fuel technologies: A review on combustion, emissions, and engine optimization. Energy Conversion and Management, 236, 114057.https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114057.
[9] Wang, Q., & Liu, Y. (2024). Corrosion behavior of engine components exposed to methanol–gasoline blends. Fuel, 356, 129211. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.129211.
[10] Harsono, E. B., & Suwono, A. (2022). Bioenergy transition in Southeast Asia: The case of Indonesia. Energy Reports, 8, 1543–1552. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.041.
[11] Yuliana, D., & Hartanto, R. (2021). Integrating methanol as an alternative fuel in Indonesia's national energy strategy. Journal of Energy Research and Reviews, 10(4), 45–58. https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v10i430255.
[12] Song, Y., Lee, H., & Kim, J. (2022). Combustion and emission analysis of methanol blended gasoline in SI engines. Fuel, 308, 121994. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121994.
[13] Chen, X., Li, Y., & Gao, H. (2021). Performance and emission characteristics of a spark-ignition engine fueled with methanol–gasoline blends. Energy Conversion and Management, 239, 114157. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114157.
[14] Wang, T., & Liu, Y. (2024). Influence of alcohol-based fuels on corrosion behavior in fuel systems: A comprehensive review. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 52(1), 112–126. https://doi.org/10.1016/j.jfct.2023.11.003.
[15] Zhao, D., Xu, H., & Wang, F. (2023). Fuel economy and emission performance of methanol blends in spark ignition engines. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 117, 103599. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103599.
[16] Li, J., Wang, Z., Zhou, X., & Sun, Y. (2023). Effect of methanol-gasoline blends on combustion, performance and emissions in spark-ignition engines: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 180, 113246. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113246.
[17] Chen, Y., Wang, J., & Zhang, L. (2022). The influence of compression ratio on combustion performance and emissions of gasoline engines. Journal of Engineering Thermophysics, 41(3), 553-560. https://doi.org/10.1016/j.jthermoeng.2021.08.012.
[18] Liu, W., Li, X., & Zhang, H. (2023). Investigation on the effect of cylinder pressure and fuel properties on combustion performance in gasoline engines. Energy Conversion and Management, 242, 114299. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114299.
[19] Tang, H., Zhao, Y., & Xu, Y. (2021). Combustion characteristics and performance of methanol in gasoline engines. Fuel, 287, 119566. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119566.
[20] Wang, Y., & Duan, J. (2024). The effects of oxygenated fuels on engine performance and emissions: A review. Fuel Processing Technology, 211,106579. https://doi.org/10.1016/j.fuproc. 202 0.106579.
[21] Zhou, X., Zhang, M., & Liu, Z. (2020). Influence of alcohol-gasoline blends on engine combustion and emissions. Applied Energy, 261, 114460. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019. 114460.