

Pengaruh Aditif Metanol-Butanol-Etanol (MBE) Terhadap Suplai Bahan Bakar Spark Ignition-Engine Yang Ramah Lingkungan Serta Mengoptimalkan Performansi.

The Effect of Methanol-Butanol-Ethanol (MBE) Additives on the Supply of Environmentally Friendly Spark Ignition-Engine Fuel and Optimizing Performance.

Gatot Setyono, Dwi Khusna, Navik Kholili, Nova Arizal Diantoro, Firman Dirga Saputra

Universitas Wijaya Putra, Surabaya

Corresponding author : gatotsetyono@uwp.ac.id

Abstrak

Meningkatnya kekhawatiran lingkungan atas pemanasan global dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil mendorong para peneliti untuk meneliti bahan bakar ramah lingkungan seperti bahan bakar etanol, methanol dan butanol yang tidak hanya menunjukkan penurunan emisi secara optimal tetapi juga meningkatkan kinerja mesin. Penelitian ini menekankan pengaruh campuran bahan bakar etanol, methanol dan butanol yang berbeda dalam bensin terhadap kinerja mesin dan emisi untuk kecepatan mesin berkisar antara 4000 hingga 9000 rpm. Hasil kinerja yang diperoleh menunjukkan bahwa daya output dan efisiensi termal meningkat dengan peningkatan persentase campuran etanol, methanol dan butanol dalam bensin. Konsumsi bahan bakar spesifik minimum (SFC) dipastikan menggunakan bensin murni diikuti oleh MBE1, MBE2 dan kemudian MBE3. Emisi HC mengalami peningkatan dari MBE1, MBE2, MBE3 dan bensin murni. MBE3 mempunyai kinerja lebih baik di antara semua campuran dalam hal emisi gas buang dan kinerja mesin. Namun, MBE3 yang dicampur dengan bensin secara signifikan mengurangi CO. MBE3 menghasilkan emisi CO 25% lebih rendah dibanding MBE2 dan bensin murni.

Kata Kunci : Metanol-Butanol-Etanol (MBE), Ramah Lingkungan, Performansi.

Abstract

The increasing environmental concerns over global warming and the depletion of fossil fuel reserves have prompted researchers to investigate green fuels such as ethanol, methanol, and butanol, which show optimum emission reduction and enhance engine performance. This study highlights the effect of different blends of ethanol, methanol, and butanol fuels in gasoline on engine performance and emissions for engine speeds ranging from 4000 to 9000 rpm. The performance results show that the power output and thermal efficiency increase with increasing blend percentage of ethanol, methanol, and butanol in gasoline. The minimum specific fuel consumption (SFC) was ascertained using pure gasoline, followed by MBE1, MBE2, and then MBE3. HC emission increased from MBE1, MBE2, MBE3, and pure gasoline. MBE3 performed better among all the blends regarding exhaust emissions and engine performance. However, MBE3 blended with gasoline significantly reduced CO. MBE3 produced 25% lower CO emissions than MBE2 and pure gasoline.

Keywords : Methanol-Butanol-Ethanol (MBE), Environmentally Friendly, Performance.

PENDAHULUAN

Eksplorasi sumber daya energi dan pemanfaatannya secara efektif merupakan fokus utama penelitian yang sedang berlangsung. Sarana utama untuk memenuhi kebutuhan energi adalah bahan bakar fosil (Malik et al. 2022). Penggunaan bahan bakar fosil terus meningkat setiap harinya seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi penduduk (T. Palani et al. 2024). Salah satu kelemahan utama bahan bakar ini adalah kenyataan bahwa emisinya disertai dengan risiko lingkungan yang besar, yaitu pemanasan global (Purayil et al. 2024). Masalah lainnya adalah menipisnya sumber daya bahan bakar fosil dan, sesuai proyeksi, sumber daya ini akan habis dalam waktu 40 tahun (Ijaz Malik et al. 2023). Sementara sebagian besar konsumsi energi saat ini berasal dari bahan bakar fosil, di masa depan, akan menjadi sangat sulit untuk memenuhi kebutuhan energi kita berdasarkan bahan bakar fosil. Mempertimbangkan situasi ini, kebutuhan untuk menggunakan energi bersih meningkat dan dunia mencari bahan bakar yang lebih bersih untuk digunakan dalam mobil dan aplikasi lainnya (Gandolfo, Lawler, and Gainey 2024). Selain itu, minyak fusel ini (etanol dan metanol) tidak memerlukan modifikasi signifikan apa pun pada mesin SI, yang menjadikannya alternatif yang cocok untuk bensin. Kedua bahan bakar ini dianggap sebagai salah satu bahan bakar alkohol terbaik karena nilai oktannya yang lebih tinggi, titik nyala yang lebih tinggi, efisiensi volumetrik yang lebih tinggi, dan *Low Heating Value* (LHV) yang lebih tinggi (Ijaz Malik et al. 2021). Rasio massa jenis campuran udara-bahan bakar yang ditarik ke dalam silinder mesin pada tekanan atmosfer selama langkah hisap terhadap massa jenis volume udara yang sama di *intake manifold* dikenal sebagai efisiensi volumetrik. Hal ini secara langsung mencerminkan konsumsi bahan bakar, karena efisiensi volumetrik yang lebih tinggi berarti penggunaan bahan bakar yang lebih rendah untuk menghasilkan daya yang sama (Shang et al. 2024).

Aditif bahan bakar dapat memainkan peran penting dalam mengoptimalkan kinerja mesin dengan meningkatkan kualitas bahan bakar dan memastikan pembakarannya lebih efisien. Aditif bahan bakar dapat meningkatkan penghematan bahan bakar karena bahan bakar terbakar dengan efisiensi yang lebih tinggi, meningkatkan daya keluaran mesin, dan mengurangi emisi (Farooq and Vinay Kumar 2023). Efek penambahan bahan bakar oksigenat, etanol dan n-butanol, pada karakteristik kinerja dan emisi mesin multi-point fuel ignition (MPFI). Mesin uji dioperasikan pada beban 20 Nm dengan kecepatan antara 1600 dan 2800 rpm. Karakteristik kinerja, pembakaran dan emisi mesin dianalisis untuk berbagai oksigenat (etanol dan n-butanol) dan campuran bensin (EB5, EB10, EB15, EB20). Eksperimen menggunakan metode Response Surface Methodology (RSM). Nilai optimum campuran, beban dan kecepatan yang diprediksi masing-masing adalah 20%, 20 Nm dan 2702 rpm. Untuk nilai prediksi optimum, pengujian data pada efisiensi termal (BTE) sebesar 20,9%, konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) sebesar 0,46 kg/kWh, karbon monoksida (CO) sebesar 0,0145%, hidrokarbon (HC) sebesar 136,45 ppm dan oksida nitrogen (NOx)

4587 ppm. Penelitian ini menemukan kurang dari 5% variasi antara hasil eksperimen dan prediksi untuk kinerja dan emisi mesin. Penelitian ini juga menemukan bahwa campuran etanol/n-butanol/bensin (EB–bensin) menghasilkan kinerja dan hasil emisi yang lebih baik dibandingkan dengan campuran n-butanol–bensin (B–bensin). Campuran EB–bensin menunjukkan efisiensi 1,8% lebih tinggi dibandingkan dengan campuran B–bensin (Thennarasu Palani et al. 2024).

(Örs, Sayın Kul, and Ciniviz 2020) melakukan percobaan pada mesin SI dengan mencampur metanol dan etanol dengan bensin. Mereka menemukan bahwa penambahan metanol meningkatkan nilai konsumsi bahan bakar spesifik rem (BSFC) sebesar 10,3% dibandingkan dengan penambahan etanol, sedangkan efisiensi termal rem (BTE) berkurang sebesar 6,12%. Penambahan metanol menurunkan emisi HC, CO₂, NO_x dan CO masing-masing sebesar 4,75%, 6,48%, 9,16% dan 26,6% dibandingkan dengan etanol. Dalam studi lain, (Asrar Hussain et al. 2022) mencatat dampak butanol–bensin pada kinerja mesin SI. Mereka menemukan BP, BTE, dan suhu gas buang (EGT) yang masing-masing lebih tinggi sebesar 12,15%, 3,25%, dan 28%, dalam kasus B12 (butanol 12% dalam bensin 88%). Namun, emisi CO dan HC menurun masing-masing sebesar 31% dan 27% dalam kasus B12. Mereka juga menyoroti bahwa, seiring meningkatnya konsentrasi butanol, oli pelumas mulai memburuk lebih awal. (Ijaz Malik et al. 2021) menyimpulkan dengan perbandingan antara M12 (12% metanol dalam 88% bensin) dan bensin murni. Hasilnya menggambarkan peningkatan daya rem (BP) sebesar 6,69% dan efisiensi tertinggi yang dicapai sebesar 23,69% untuk M12. Namun, suhu gas buang (EGT), NO_x dan CO₂ juga meningkat masing-masing sebesar 16,91%, 27,58 dan 2,61% untuk M12. Suhu yang lebih tinggi bertanggung jawab atas emisi gas rumah kaca yang lebih besar dan degradasi awal oli pelumas. Viskositas kinematik, jumlah asam total (TAN) dan kadar abu untuk oli pelumas yang dioperasikan pada M12 meningkat masing-masing sebesar 4,57%, 10,23% dan 0,97%.

Literatur yang diteliti mengungkap bahwa terdapat kesenjangan dalam menganalisis dampak campuran Metanol-Butanol-Etanol (MBE) dalam bensin terhadap emisi gas buang dan karakteristik kinerja mesin bensin. Dalam konteks ini, penelitian ini difokuskan untuk memastikan dampak campuran Metanol-Butanol-Etanol dalam bensin terhadap kinerja dan polutan gas buang mesin SI empat langkah. Selain itu, tinjauan pustaka mengungkap bahwa emisi CO₂ dan NO_x meningkat untuk bahan bakar alkohol. CO₂ merupakan kontributor utama terhadap efek rumah kaca dan pemanasan global, sedangkan NO_x merupakan indikator EGT yang lebih tinggi. Suhu yang lebih tinggi akan menjadi bukti degradasi oli pelumas yang prematur. Oleh karena itu, berbagai upaya dilakukan untuk mengembangkan campuran tersebut yang tidak hanya mengurangi CO₂ tetapi juga NO_x dan EGT untuk mempertahankan kondisi optimal bagi kinerja mesin. Ini tentunya akan menjadi tambahan yang berharga bagi penelitian tentang campuran Metanol-Butanol-Etanol. Dalam penelitian saat ini, ditemukan bahwa, meskipun konsumsinya lebih besar karena bahan bakar Metanol-

Butanol-Etanol bernilai kalor yang lebih rendah, bahan bakar ini menghasilkan daya rem, EGT, emisi CO₂ dan NO_x yang lebih besar. Emisi CO₂, EGT, dan NO_x yang lebih tinggi menunjukkan pembakaran bahan bakar yang lebih baik dan akhirnya meningkatkan BTE dan mengurangi emisi CO dan HC.

METODE

Penelitian ini menggunakan bahan bakar bensin dengan RON 90 menggunakan campuran aditif Metanol-Butanol-Etanol (MBE). Pada tabel 1 menunjukkan kapasitas percampuran bahan bakar dengan aditif mempunyai proporsi sebagai berikut MBE1 (12:8:1), MBE2 (15:10:1) dan MBE3 (18:12:1) untuk memastikan pengujian kinerja mesin dan emisi gas buang. Tabel 2 menunjukkan Mesin yang digunakan dengan tipe SI-Engine merupakan jenis mesin pembakaran internal yang menggunakan busi untuk menyalakan campuran udara-bahan bakar di ruang bakar pada akhir langkah kompresi dengan sistem transmisi CVT. Oleh karena itu, campuran udara-bahan bakar mengalami pembakaran dan gas yang mengembang menyebabkan piston bergerak ke bawah dan memutar poros engkol untuk memutar roda kendaraan. Mesin SI menggunakan bensin sebagai bahan bakar. Mesin SI dipilih untuk penelitian saat ini karena memiliki banyak keunggulan dibandingkan mesin diesel, termasuk emisi yang lebih rendah, bobot yang ringan, lebih sedikit kebisingan dan getaran serta efisiensi bahan bakar. Gambar 1 menampilkan proses pengujian dan mesin yang digunakan untuk evaluasi kinerja mesin. Pengujian kendaraan menggunakan Dynotest Chassis BRT-50L dengan putaran mesin berkisar 4000-9000 rpm dan uji emisi gas buang tipe EPSG4 dengan komposisi HC dan CO.

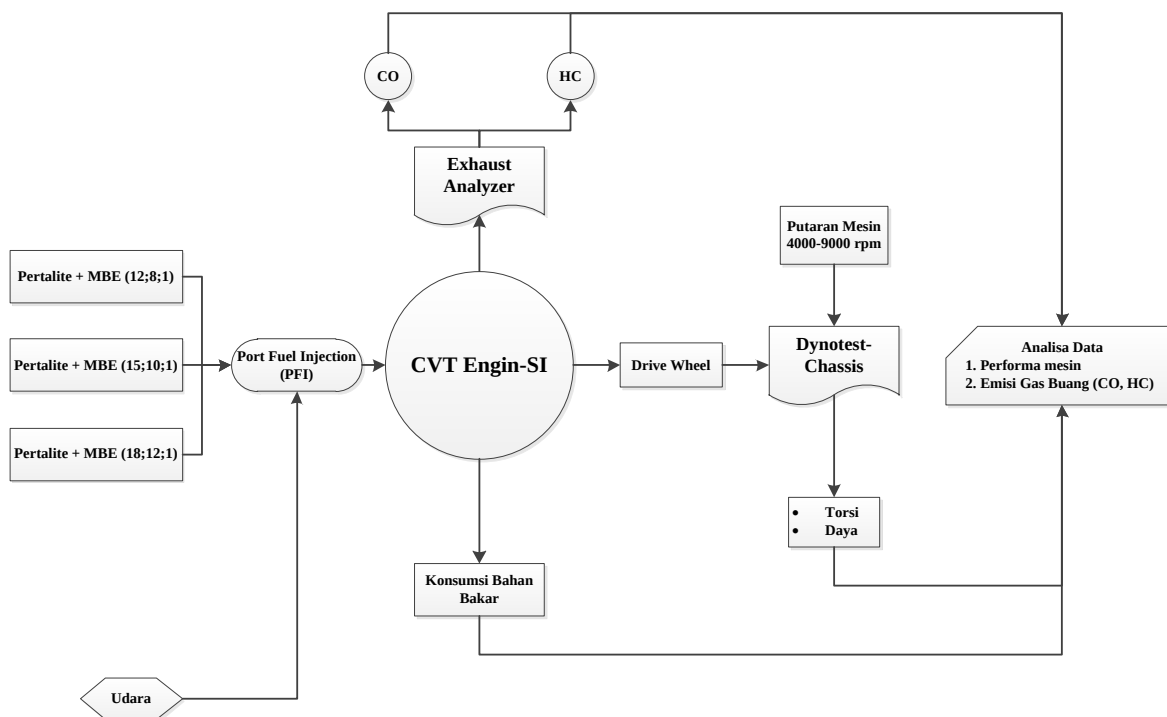
Tabel 1.
Kapasitas Metanol-Butanol-Etanol pada Bahan Bakar

Index Blends	Metanol	Butanol	Etanol	RON-90
MBE1	120 ml	80 ml	10 ml	790 ml
MBE2	150 ml	100 ml	10 ml	740 ml
MBE3	180 ml	120 ml	10 ml	690 ml

Tabel 2.
Spesifikasi Mesin SI yang Digunakan

Detail	Spesifikasi
Kapasitas Ruang Rakar (cm ³)	: 124,8 cc-4 Langkah
Kompresi Rasio	: 9,5 : 1
Daya Output Maksimum (kW)	: 8.500 rpm / 8,2 kW
Berat Total (kg)	: 112 kg
Sistem Pendingin Mesin	: Air system

Sistem Supali Bahan Bakar	: PGM-FI
Sistem Transmisi	: CVT
Model Kopling	: <i>ACCD Type</i>
Sistem Pengapian	: Iridium SI

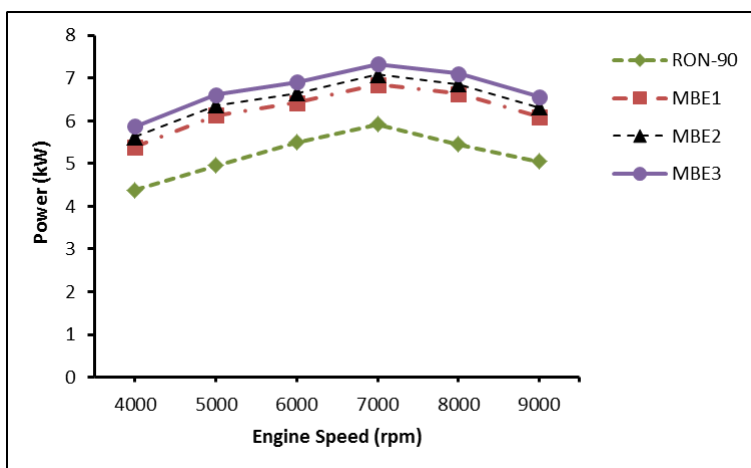


Gambar 1:
Skema Uji Performa Mesin Matic

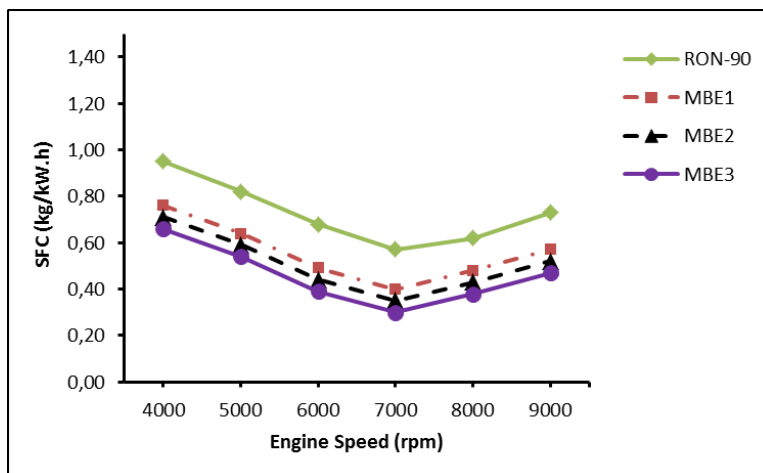
HASIL DAN PEMBAHASAN

Daya *output* adalah ukuran daya keluaran mesin atau jumlah daya yang disalurkan ke poros mesin setelah memperhitungkan kerugian dan dinyatakan dalam kW. Perbedaan daya output untuk berbagai campuran bahan bakar Metanol-Butanol-Etanol (MBE) dijelaskan dalam Grafik 1. Daya output diamati lebih tinggi untuk MBE3 daripada MBE1 dan paling rendah untuk bensin murni. Ini menunjukkan bahwa daya output meningkat dengan meningkatkan persentase campuran Metanol-Butanol-Etanol dalam bensin. Daya output tercatat berada pada nilai maksimumnya untuk MBE3, yaitu 7,33 kW, diikuti oleh 7,08 kW untuk MBE2, 6,85 kW untuk MBE1 dan pada nilai minimumnya untuk bensin murni 5,92 kW. Nilai maksimum MBE3 dan MBE2 terjadi pada 7000 rpm. Daya output bertambah dengan peningkatan konsentrasi Metanol-Butanol-Etanol (MBE) dalam bensin. Namun, penelitian tidak akan dilakukan pada persentase yang lebih tinggi untuk masuk ke wilayah

operasi mesin yang aman. Telah dipelajari dalam literatur bahwa campuran dengan proporsi sekitar 10% dapat digunakan tanpa modifikasi mesin apa pun dan menghasilkan hasil yang paling optimal. Karena alasan inilah persentase campuran spesifik ini dipilih. Peningkatan masing-masing 19,24%, 16,38% dan 13,58% dalam daya output dicapai untuk MBE3, MBE2 dan MBE1. Peningkatan yang lebih tinggi dalam campuran bahan bakar Metanol-Butanol-Etanol (MBE) daripada bensin dapat dijelaskan oleh nilai kalor campuran aditif yang lebih tinggi. Selain itu, peningkatan daya output untuk campuran MBE3 dibandingkan dengan bensin murni dikonversi ke panas penguapan yang lebih tinggi untuk aditif yang menghasilkan pendinginan muatan udara-bahan bakar di dalam silinder, yang selanjutnya menyebabkan kepadatan muatan yang lebih tinggi. Kepadatan muatan udara-bahan bakar yang tinggi memberi lebih banyak tekanan pada permukaan piston, yang menyebabkan daya meningkat (Mohammed et al. 2021). Hal yang sama adalah alasan untuk kasus campuran etanol (Kumbhar and Khot 2023). Nilai LHV yang lebih tinggi untuk etanol dibandingkan dengan metanol telah beralasan dengan daya output yang lebih besar untuk campuran etanol daripada campuran etanol-metanol (cesur and Eren 2024).

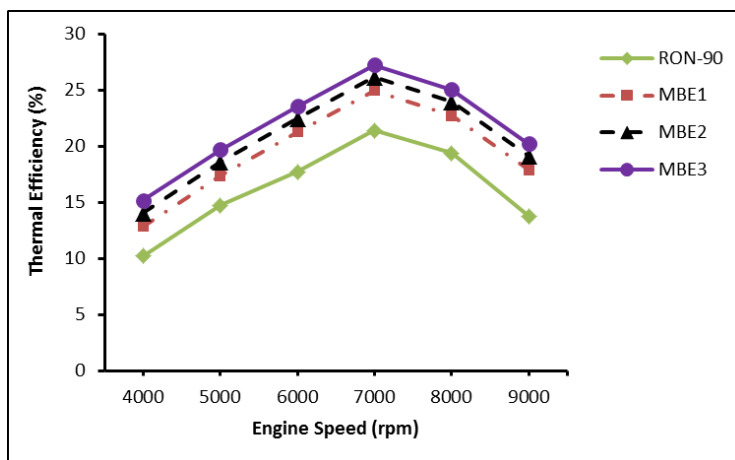


Grafik 1 :
Uji performa Mesin Perbandingan Daya Dengan *Engine Speed*



Grafik 2 :
Uji performa Mesin Perbandingan SFC Dengan *Engine Speed*

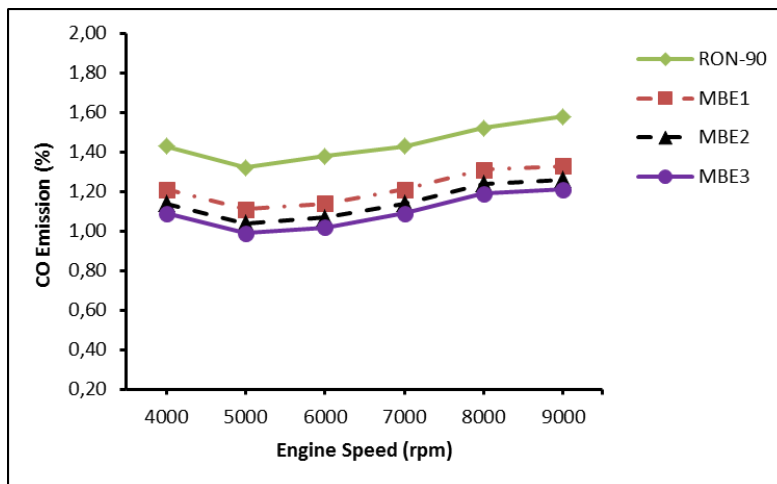
Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC) adalah rasio konsumsi bahan bakar per unit daya dan menggambarkan efektivitas mesin untuk konsumsi bahan bakar, dinyatakan dalam kg/kWh. Tren SFC untuk berbagai rasio campuran dan jenis campuran ditunjukkan pada grafik 2. SFC mula-mula menurun dan kemudian meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan mesin. Hal ini dapat dikaitkan dengan konsumsi bahan bakar yang lebih besar di awal untuk mengatasi efek inersia dan memungkinkan kondisi pengoperasian mesin. Selain itu, kehilangan termal di seluruh dinding mesin awalnya lebih tinggi untuk laju rpm yang lebih rendah, dan sebagai akibatnya, menyebabkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi untuk mengganti kehilangan termal. SFC terus menurun seiring dengan meningkatnya rpm mesin, dan kemudian, setelah 7000 rpm, SFC mulai meningkat. Pembakaran mengalami kondisi yang mendekati stoikiometris selama kondisi SFC terendah. SFC yang lebih tinggi pada rpm mesin yang lebih tinggi disebabkan oleh konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi untuk menyesuaikan dengan kebutuhan daya yang lebih tinggi. Jelas bahwa SFC untuk MBE1, MBE2 dan MBE3 lebih optimal dari bensin murni. SFC minimum yang diperoleh adalah 0,57 kg/kWh untuk bensin murni diikuti oleh 0,40 kg/kWh untuk MBE1, 0,35 kg/kWh untuk MBE2 dan kemudian 0,30 kg/kWh untuk MBE3. Nilai SFC yang lebih tinggi untuk campuran MBE3 disebabkan oleh fakta bahwa etanol memiliki nilai kalor yang lebih rendah daripada bensin, dan untuk menghasilkan daya yang sama atau lebih banyak daripada bensin, hal tersebut membutuhkan lebih banyak bahan bakar dan karenanya SFC meningkat (Kumbhar and Khot 2023). Demikian pula, campuran etanol-metanol membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan daya yang sama dengan bensin (cesur and Eren 2024). Membandingkan SFC untuk campuran etanol dan etanol-metanol, campuran etanol-metanol menghasilkan SFC yang lebih tinggi karena nilai kalor metanol yang lebih rendah dibandingkan dengan etanol (Örs et al. 2023).



Grafik 3 :
Uji performa Mesin Perbandingan Efisiensi Termal Dengan Engine Speed

Efisiensi termal adalah ukuran seberapa efisien mesin mengubah energi panas bahan bakar menjadi kerja mekanis yang berguna, yang dinyatakan sebagai persentase. Efisiensi termal menunjukkan jumlah produksi Daya output mesin sehubungan dengan energi bahan bakar. Tren Efisiensi termal generik yang ditunjukkan oleh campuran bahan bakar seperti yang terungkap dalam grafik 3 mengungkapkan kenaikan Efisiensi termal pertama ke nilai maksimum, dan kemudian, akhirnya Efisiensi termal turun. Dinyatakan bahwa efisiensi mesin berbanding terbalik dengan kehilangan panas. Lebih jauh, Efisiensi termal menunjukkan hubungan terbalik dengan SFC dan nilai kalor (Setyono, Khusna, Kholili, Sanjaya, and Putra 2023; Setyono, Khusna, Kholili, Sanjaya, Galang, et al. 2023b; Setyono et al. 2024). LHV bahan bakar alkohol yang lebih tinggi (etanol, methanol dan butanol) berkontribusi atas penyerapan panas dari dinding silinder. Akibatnya, campuran bahan bakar harus dikompresi untuk menurunkan dan akhirnya menambah efisiensi termal (Usman et al. 2023). Proliferasi nyala laminar yang lebih cepat untuk bahan bakar alkohol menandai fenomena pelepasan panas pembakaran yang lebih cepat sebelum terjadi kehilangan termal yang signifikan dan dengan dampak isometrik yang lebih baik (Elfasakhany 2023). Jelas bahwa Efisiensi termal menurun dalam urutan MBE1, MBE2, MBE3 dan bensin murni. MBE3 menunjukkan nilai Efisiensi termal maksimum, yaitu 27,24%, diikuti oleh 26,14% untuk MBE2, 24,94% untuk MBE1 dan 21,38% untuk bensin murni. Nilai maksimum untuk campuran MBE3, MBE2 dan MBE1 terlihat pada 7000 rpm dan untuk bensin murni juga terjadi pada 7000 rpm. Penambahan etanol-metanol-butanol ke bensin meningkatkan efisiensi dan titik optimum bergeser ke kecepatan yang lebih tinggi. Nilai Efisiensi termal yang lebih tinggi untuk campuran MBE3, MBE2 dan MBE1 dibandingkan dengan bensin murni dapat dijelaskan oleh kandungan oksigen yang lebih tinggi dalam etanol yang

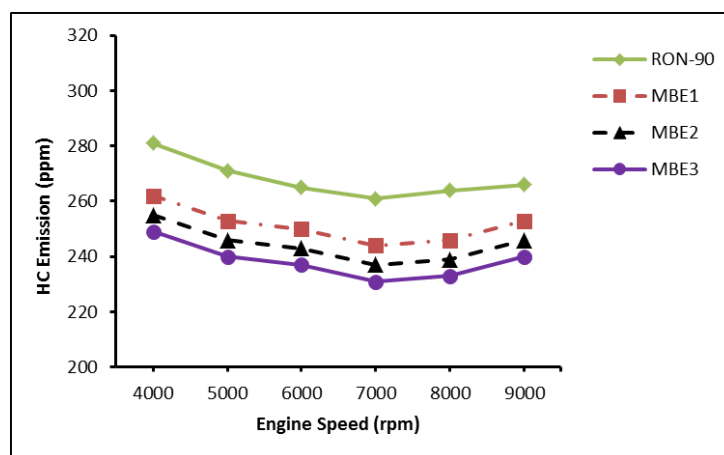
meningkatkan pembakaran (Purayil et al. 2024). Di antara campuran MBE3, MBE2 dan MBE1 menunjukkan nilai Efisiensi termal yang lebih tinggi karena pembakaran yang lebih baik dan nilai kalor bawah etanol yang lebih tinggi (Shang et al. 2024). Atribut antiknock yang diinduksi ke dalam bahan bakar karena nilai oktan yang lebih tinggi menunjukkan peran penting dalam mengurangi gesekan, yang pada akhirnya meningkatkan daya output dan akhirnya meningkatkan Efisiensi termal (Setyono and Arifin 2020; Setyono and Kholili 2021).



Grafik 4 :
Uji performa Mesin Perbandingan Emisi CO Dengan Engine Speed

Penambahan etanol, metanol dan butanol menurunkan emisi CO, seperti yang dibuktikan pada grafik 4. Penurunan emisi CO sebesar 25%, 21,21% dan 15,91% tercatat untuk MBE3, MBE2 dan MBE1, berturut-turut. Ketika persentase etanol, methanol dan butanol meningkat, emisi CO berkurang dibandingkan dengan bensin. Alasannya adalah bahwa penambahan etanol, metanol dan butanol dalam bensin meningkatkan kandungan oksigen, yang meningkatkan pembakaran. Peningkatan pembakaran mengurangi emisi CO [50]. Emisi CO yang lebih rendah untuk campuran bahan bakar alkohol dapat dikaitkan dengan kandungan oksigen yang lebih tinggi yang meningkatkan rasio oksigen (O) terhadap karbon (C) di dalam silinder, sehingga lebih mungkin membentuk karbon dioksida (CO₂) daripada CO karena ketersediaan oksigen yang lebih tinggi. Demikian pula, campuran etanol, methanol dan butanol memberikan emisi CO paling sedikit dibandingkan dengan bensin murni. Kandungan karbon yang berkurang di kedua alkohol juga mengurangi emisi CO [37]. Campuran etanol-metanol memberikan emisi yang lebih besar dibandingkan dengan etanol karena kandungan karbon yang meningkat ketika etanol dan metanol ditambahkan ke bensin dibandingkan dengan penambahan kandungan oksigen yang lebih tinggi yang meningkatkan rasio oksigen (O) terhadap karbon (C) di dalam silinder, membuatnya lebih mungkin membentuk karbon dioksida (CO₂) daripada CO karena ketersediaan oksigen yang lebih

tinggi. Demikian pula, campuran etanol-metanol memberikan emisi CO paling sedikit dibandingkan dengan bensin murni. Kandungan karbon yang berkurang di kedua alkohol juga mengurangi emisi CO [37]. Campuran etanol-metanol memberikan emisi yang lebih besar dibandingkan dengan E karena kandungan karbon yang meningkat ketika etanol dan metanol ditambahkan ke bensin dibandingkan dengan penambahan hanya etanol [51]. LHV bahan bakar alkohol yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan efisiensi volumetrik (VE), karena menjamin pencampuran yang homogen karena difusivitas molekuler yang lebih baik dan batas mudah terbakar yang lebih tinggi, yang pada akhirnya meningkatkan pembakaran bahan bakar alkohol di dalam mesin [63].



Grafik 5 :
Uji performa Mesin Perbandingan Emisi HC Dengan Engine Speed

Perbedaan konsentrasi hidrokarbon (HC) di semua bahan bakar uji ditampilkan dalam grafik 5. MBE3 menghasilkan emisi HC paling sedikit, masing-masing yaitu 231 ppm dibandingkan dengan 237 ppm, 244 ppm dan 261 ppm untuk MBE2, MBE1 dan bensin murni. Campuran MBE3, MBE2 dan MBE1 menunjukkan nilai yang lebih rendah daripada bensin murni karena pembakaran yang lebih baik dan kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan bensin murni (Setyono et al. 2024; Setyono, Khusna, Kholili, Sanjaya, Galang, et al. 2023a, 2023b). Rata-rata, MBE3, MBE2 dan MBE1 menghasilkan emisi HC 11,49%, 9,20% dan 5,51% lebih rendah daripada bensin. Emisi hidrokarbon dihasilkan dari pembakaran yang tidak tepat dan penguapan bahan bakar yang tidak terbakar ke lingkungan. Selain itu, kebocoran dari manifold knalpot, kondisi bahan bakar selama pemanasan dan start dingin, penumpukan bahan bakar yang tidak mudah terbakar di celah-celah dan pengendapan lapisan oli merupakan faktor signifikan yang berkontribusi terhadap emisi HC (Setyono, Khusna, Kholili, Sanjaya, Galang, et al. 2023b). Pencampuran bahan bakar konvensional dengan bahan bakar beroksigen menghasilkan oksidasi bahan bakar konvensional selama kondisi pasca nyala yang dapat diperhitungkan sebagai alasan utama untuk menurunkan

emisi HC (Örs et al. 2020). Kandungan oksigen di dalam alkohol bertanggung jawab atas pembakaran yang efektif karena oksigen mengalami reaksi dengan hidrogen dan karbon untuk menghasilkan H_2O dan CO_2 , masing-masing (T. Palani et al. 2024). Akibatnya, akan lebih kecil kemungkinan terjadinya reaksi antara karbon dan hidrogen dan emisi HC akan diturunkan. Angka oktan yang lebih tinggi secara alami dari bahan bakar alkohol menyebabkan atribut antiknock pada bahan bakar yang terutama mengurangi gesekan, akhirnya meningkatkan pembakaran, dan akhirnya menurunkan emisi HC (Usman et al. 2023).

KESIMPULAN

Bahan bakar yang mempunyai kandungan oksigen tinggi mempunyai dampak yang signifikan terhadap pembakaran di mesin SI. Kesimpulan ini menunjukkan persentase campuran yang berbeda dari MBE1, MBE2 dan MBE3 dalam bensin untuk mesin SI. Daya output meningkat dengan peningkatan campuran etanol, methanol dan butanol dalam bensin. Peningkatan tersebut masing-masing sebesar 13,58%, 16,58% dan 19,24% untuk variasi campuran, dibandingkan dengan bensin murni. SFC menunjukkan nilai minimum untuk bensin murni dibandingkan dengan campuran MBE1, MBE2 dan MBE3. Di antara semua campuran, MBE3 menunjukkan SFC yang lebih kecil dibandingkan dengan MBE2 dan MBE1 masing-masing sebesar 38,60% dan 29,82%, dibandingkan dengan bensin murni. Efisiensi termal meningkat dengan meningkatnya campuran etanol, methanol dan butanol dibandingkan dengan bensin murni. Hal Itu dapat diidentifikasi pada kandungan oksigen yang lebih tinggi dan peringkat oktan dalam bahan bakar alkohol. Campuran MBE3 menunjukkan Efisiensi termal yang lebih tinggi bersaing dengan campuran MBE2. Efisiensi termal untuk MBE2 dan MBE3 meningkat sebesar 21,51% dan 18,21%, masing-masing, dibandingkan dengan bensin murni. Emisi HC menurun dengan meningkatnya campuran etanol, methanol dan butanol dibandingkan dengan bensin murni. Campuran MBE3 menunjukkan emisi HC yang lebih rendah daripada campuran MBE2. MBE2 dan MBE3 menunjukkan emisi HC yang lebih rendah sebesar 11,49% dan 9,20% dibandingkan dengan bensin murni.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendanai penelitian ini. Terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat-LPPM UWP, Fakultas Teknik dan Program Studi Teknik Mesin. Penelitian dilaksanakan sesuai prosedur yang ada melalui Penerima Pendanaan Litabmas Internal Nomor 036/LPPM-UWP/K-I/VII/2024 dan Surat Tugas Litabmas Internal Nomor 058.29/ST/LPPM-UWP/K-I/VII/2024. Harapannya penelitian ini dapat bermanfaat bagi masyarakat dan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Asrar Hussain, Syed Khizar, Muhammad Usman, Jamal Umer, Muhammad Farooq, Fahad Noor, and Rizwana Anjum. 2022. "A Novel Analysis of N-Butanol–Gasoline Blends Impact on Spark Ignition Engine Characteristics and Lubricant Oil Degradation." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. doi: 10.1080/15567036.2022.2036874.
- cesur, idris, and Beytullah Eren. 2024. "Examining the Eco-Friendly Aspects of Ethanol-Methanol Blended Gasoline on Engine Performance and Emissions." *International Journal of Energy for a Clean Environment*. doi: 10.1615/INTERJENERCLEANENV.2024051065.
- Elfasakhany, Ashraf. 2023. "Comparative Analysis of the Engine Performance and Emissions Characteristics Powered by Various Ethanol–Butanol–Gasoline Blends." *Processes* 2023, Vol. 11, Page 1264 11(4):1264. doi: 10.3390/PR11041264.
- Farooq, Sk., and D. Vinay Kumar. 2023. "Experimental Investigation of Gasoline Ethanol Methanol Iso-Stoichiometric Blends on SI Engine." *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/J.MATPR.2023.06.138.
- Gandolfo, John, Benjamin Lawler, and Brian Gainey. 2024. "Experimental Study of High Compression Ratio Spark Ignition with Ethanol, Ethanol–Water Blends, and Methanol." *Fuel* 375:132528. doi: 10.1016/J.FUEL.2024.132528.
- Ijaz Malik, Muhammad Ali, Muhammad Usman, Maaz Akhtar, Muhammad Farooq, Hafiz Muhammad Saleem Iqbal, Muneeb Irshad, and Muhammad Haris Shah. 2023. "Response Surface Methodology Application on Lubricant Oil Degradation, Performance, and Emissions in SI Engine: A Novel Optimization of Alcoholic Fuel Blends." *Science Progress* 106(1). doi: 10.1177/00368504221148342/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_00368504221148342-FIG16.JPEG.
- Ijaz Malik, Muhammad Ali, Muhammad Usman, Nasir Hayat, Syed Wasim Hassan Zubair, Rehmat Bashir, and Ehtasham Ahmed. 2021. "Experimental Evaluation of Methanol-Gasoline Fuel Blend on Performance, Emissions and Lubricant Oil Deterioration in SI Engine." *Advances in Mechanical Engineering* 13(6). doi: 10.1177/16878140211025213/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_16878140211025213-FIG11.JPEG.
- Kumbhar, S. V., and S. A. Khot. 2023. "Experimental Investigations of Ethanol-Gasoline Blends on the Performance, Combustion, and Emission Characteristics of Spark Ignition Engine Spark Ignition (S.I) Engine with Partial Addition of n-Pentane." *Materials Today: Proceedings* 77:647–53. doi: 10.1016/J.MATPR.2022.11.284.
- Malik, Muhammad Ali Ijaz, Muhammad Usman, Rehmat Bashir, Muhammad Sohaib Hanif, and Syed Wasim Hassan Zubair. 2022. "Use of Methanol-Gasoline Blend: A Comparison of SI Engine Characteristics and Lubricant Oil Condition." *Journal of the*

- Chinese Institute of Engineers* 45(5):402–12. doi: 10.1080/02533839.2022.2061599.
- Mohammed, Mortadha K., Hyder H. Balla, Zaid Maan H. Al-Dulaimi, Zaid S. Kareem, and Mudhaffar S. Al-Zuhairy. 2021. “Effect of Ethanol-Gasoline Blends on SI Engine Performance and Emissions.” *Case Studies in Thermal Engineering* 25:100891. doi: 10.1016/J.CSITE.2021.100891.
- Örs, İlker, Bahar Sayın Kul, and Murat Ciniviz. 2020. “A Comparative Study of Ethanol and Methanol Addition Effects on Engine Performance, Combustion and Emissions in the SI Engine.” *International Journal of Automotive Science And Technology* 4(2):59–69. doi: 10.30939/IJASTECH..713682.
- Örs, İlker, Savaş Yelbey, Halil Erdi Gülcan, Bahar Sayın Kul, and Murat Ciniviz. 2023. “Evaluation of Detailed Combustion, Energy and Exergy Analysis on Ethanol-Gasoline and Methanol-Gasoline Blends of a Spark Ignition Engine.” *Fuel* 354:129340. doi: 10.1016/J.FUEL.2023.129340.
- Palani, T., G. S. Esakkimuthu, G. Dhamodaran, and S. Seetharaman. 2024. “Experimental Study on Dual Oxygenates (Ethanol, n-Butanol) with Gasoline on MPFI Engine Performance and Emission Characteristics.” *International Journal of Environmental Science and Technology* 21(1):245–54. doi: 10.1007/S13762-023-04852-6/METRICS.
- Palani, Thennarasu, Ganapathy Sundaram Esakkimuthu, Gopinath Dhamodaran, and Arivazhagan Sundaraganesan. 2024. “Performance Optimization of Gasoline Engine Fueled with Ethanol/n-Butanol/Gasoline Blends Using Response Surface Methodology.” *Biofuels* 15(1):33–45. doi: 10.1080/17597269.2023.2215631.
- Purayil, S. T. P., Mohammad O. Hamdan, SAB Al-Omari, MYE Selim, and E. Elnajjar. 2024. “Influence of Ethanol–Gasoline–Hydrogen and Methanol–Gasoline–Hydrogen Blends on the Performance and Hydrogen Knock Limit of a Lean-Burn Spark Ignition Engine.” *Fuel* 377:132825. doi: 10.1016/J.FUEL.2024.132825.
- Setyono, Gatot., and Ahmad Anas. Arifin. 2020. “Effect Of Ethanol-Gasoline Mixes On Performances In Last Generation Spark-Ignition Engines Within The Spark-Plug No Ground-Electrodes Type.” *Mekanika : Jurnal Teknik Mesin* 5(2):19–26. doi: <https://doi.org/10.12345/jm.v5i02.3003.g2577>.
- Setyono, Gatot, and Navik Kholili. 2021. “Combustion Conduct Of A Single-Cylinder Spark-Ignition Affected By Ethanol Fuel Mixtures of Supplement Hydroxy Gas (HHO).” *Jurnal Teknik Mesin* 14(2):125–29. doi: 10.30630/JTM.14.2.669.
- Setyono, Gatot, Navik Kholili, Galih Ageng Kurniawan, and Deny Surya Pratama. 2024. “Investigation on Exhaust Emission and Performance of SI-Matic Engine Applied Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Fuel Mixtures.” *Infotekmesin* 15(1):128–34. doi: 10.35970/INFOTEKMESIN.V15I1.2128.
- Setyono, Gatot, Dwi Khusna, Navik Kholili, Lingga Putra Sanjaya, Fajar Galang, and Argil Putra. 2023a. “Effect of Butanol-Gasoline Blend Toward Performance Matic-Transmission Applied in Single Cylinder Capacity Engine.” *Infotekmesin* 14(1):28–34.

- doi: 10.35970/INFOTEKMESIN.V14I1.1629.
- Setyono, Gatot, Dwi Khusna, Navik Kholili, Lingga Putra Sanjaya, Fajar Galang, and Argil Putra. 2023b. "Investigation of Exhaust Emissions Combustion Characteristics in Single Spark Ignition-Engine Matic with Butanol-Gasoline Mixture." *Infotekmesin* 14(2):273–79. doi: 10.35970/INFOTEKMESIN.V14I2.1903.
- Setyono, Gatot, Dwi Khusna, Navik Kholili, Lingga Putra Sanjaya, and Fajar Galang Argil Putra. 2023. "Effect of Butanol-Gasoline Blend Toward Performance Matic-Transmission Applied in Single Cylinder Capacity Engine." *Infotekmesin* 14(1):28–34. doi: 10.35970/INFOTEKMESIN.V14I1.1629.
- Shang, Zhen, Xiumin Yu, Luquan Ren, Ziyuan Li, Huan Wang, Yinan Li, and Yangjun Wang. 2024. "Synergic Effect of Hydrogen and N-Butanol on Combustion and Emission Characteristics of a Hydrogen Direct Injection SI Engine Fueled with n-Butanol/Gasoline." *International Journal of Hydrogen Energy* 49:945–56. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.09.213.
- Usman, Muhammad, Muhammad Ali Ijaz Malik, Tariq Nawaz Chaudhary, Fahid Riaz, Sohaib Raza, Muhammad Abubakar, Farrukh Ahmad Malik, Hafiz Muhammad Ahmad, Yasser Fouad, Muhammad Mujtaba Abbas, and Muhammad Abul Kalam. 2023. "Comparative Assessment of Ethanol and Methanol–Ethanol Blends with Gasoline in SI Engine for Sustainable Development." *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7601 15(9):7601. doi: 10.3390/SU15097601.