



Studi Eksperimental Efek Aseton-Butanol-Etanol (ABE) Pada Kinerja Dan Karakteristik Emisi Mesin-Continuous Variable Transmission-Spark Ignition.

Experimental Study of Effects of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) on the Performance and Emission Characteristics of Engines-Continuous Variable Transmission-Spark Ignition.

Gatot Setyono¹, Navik Kholili², Galih Ageng Kurniawan³, Deny Surya Pratama⁴

^{1,2,3,4} Universitas Wijaya Putra, Surabaya

Corresponding author : gatotsetyono@uwp.ac.id

Abstrak

Kebutuhan Sumber energi fosil berupa bahan bakar cair yang semakin meningkat setiap tahun. Kondisi tersebut berbanding lurus dengan penggunaan kendaraan untuk aktifitas sehari-hari. Sangat penting sekali untuk mengeksplor sumber energi terbaru untuk menggantikan fosil yang setiap tahun semakin menipis. Bahan bakar biofuel sangat dibutuhkan untuk menggantikan energi fosil seperti etanol, butanol dan aseton. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan mengkolaborasi penggunaan bahan bakar Research Octane Number (RON 90) dengan Aseton-Butanol-Etanol (ABE) yang berkapasitas ABE-1 (5%v/v Aseton, 2%v/v Butanol dan 1%v/v Etanol), ABE-2 (8%v/v Aseton, 4%v/v Butanol dan 1%v/v Etanol), ABE-3 (10%v/v Aseton, 6%v/v Butanol dan 1%v/v Etanol). Mesin yang digunakan adalah Continuous Variable Transmission-Spark Ignition. Uji performa dan emisi gas buang kendaraan menggunakan Dynotest Chassis BRT-50L dan EPSG4 Gas Analyzer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ABE pada RON 90 mengakibatkan dampak peningkatan signifikan terhadap performa mesin antara lain torsi, Mep dan efisiensi termal. Peningkatan tersebut terjadi pada putaran rendah hingga medium (4000-8000 rpm) rerata sebesar 23%, 7% dan 29%. Emisi gas buang HC dan CO mengalami penurunan pada putaran mesin 5000-9000rpm rerata sebesar 44% dan 28%. Hal tersebut menunjukkan bahwa bahan bakar ABE sangat kompeten digunakan sebagai pengganti sumber energi fosil untuk suplai kendaraan sehari-hari.

Kata Kunci : Aseton-Butanol-Etanol (ABE), Kinerja, Karakteristik Emisi dan Continuous Variable Transmission.

Abstract

The need for fossil energy sources in the form of liquid fuels is increasing every year. This condition is directly proportional to the use of vehicles for daily activities. It is very important to explore new energy sources to replace fossils which are depleting every year. Biofuels are urgently needed to replace fossil energy such as Ethanol, Butanol and Acetone. This study used an experimental method by collaborating on the use of Research Octane Number (RON 90) fuel with Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) with a capacity of ABE-1 (5%v/v Acetone, 2%v/v Butanol and 1%v/v Ethanol), ABE-2 (8%v/v Acetone, 4%v/v Butanol and 1%v/v Ethanol), ABE-3 (10%v/v Acetone, 6%v/v Butanol and 1% v/v Ethanol). The engine used is a Continuous Variable Transmission-Spark Ignition. Test performance and vehicle exhaust emissions using the Dynotest Chassis BRT-50L and EPSG4 Gas Analyzer. The results showed that adding ABE to RON 90 significantly increased engine performance, including torque, Mep and thermal efficiency. This increase occurred at low to medium rotation (4000-8000 rpm), an average of 23%, 7% and 29%. HC and CO exhaust emissions decreased at 5000-9000rpm engine speed on average by 44% and 28%. It shows that ABE fuel can be used as a substitute for fossil energy sources to supply daily vehicles.



Keywords : *Acetone-Butanol-Ethanol (ABE), Performance, Emission Characteristics and Continuous Variable Transmission.*

PENDAHULUAN

Baru-baru ini, kendaraan listrik dan kendaraan hybrid berkembang pesat karena menurunkan tingkat suplai bahan bakar yang lebih optimal serta menghasilkan rendah emisi gas buang (Z. Li, Khajepour, and Song 2019). *Internal Combustion Engine (ICE)* akan tetap menjadi sumber tenaga utama bagi kendaraan dan mesin pembangkit energi karena persyaratan kemampuan manuver, kehandalan, dan daya tahannya. Namun, peningkatan yang signifikan dalam konsumsi bahan bakar fosil terhadap pertumbuhan industrialisasi dan motorisasi di negara-negara berkembang sehingga menyebabkan penipisan yang sangat cepat terhadap bahan bakar tak terbarukan ini (Guo et al. 2020; Liu and Dumitrescu 2019; Veza, Said, and Latiff 2019). Penggunaan aditif bahan bakar adalah salah satu teknik sederhana untuk mengubah sifat bahan bakar dasar untuk meminimalkan emisi dan meningkatkan kinerja. Komponen bahan bakar seperti alkohol, eter, aseton, dll., adalah komponen bahan bakar beroksigen yang biasa digunakan pada mesin Spark-Ignition (SI) untuk kinerja termal yang lebih baik. Alkohol adalah bahan bakar alternatif terbarukan yang dapat berasal dari sumber daya berbasis bio-energi. Di negara-negara berkembang, di mana pertanian merupakan sumber ekonomi utama, limbah berbasis bio tersedia melimpah. Ini dapat bermanfaat digunakan untuk produksi alkohol (Benajes et al. 2019; Dinesha, Mohan, and Kumar 2022; Guo et al. 2020).

Biobutanol telah terbukti menjadi biofuel alternatif unggul dalam mesin pembakaran internal (ICEs). Rekayasa fermentasi aseton-butanol-etanol (ABE) adalah teknik khas untuk produksi biobutanol. Namun, tingginya biaya dan konsumsi energi ekstra dalam proses pemulihan biobutanol dari pelarut fermentasi menengah (yaitu campuran ABE) telah menghambat penerapannya dalam skala besar. Semakin banyak perhatian untuk menginvestigasi ABE sebagai biofuel alternatif yang potensial. Produksi dan pembakaran ABE pada mesin ICE telah dipelajari secara luas. Dalam eksperimen ini, metode fermentasi ABE yang dilakukan terdiri dari beberapa aspek: (i) pemilihan suitable strain yang sesuai; (ii) ketersediaan substrat yang lebih murah; (iii) pengembangan teknik fermentasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa ABE adalah alternatif yang lebih baik untuk bahan bakar bensin atau solar karena proses manufaktur ramah lingkungan dan potensi untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi polutan (Y. Li et al. 2019). Investigasi karakteristik Mesin Spark-Ignition (SI) menggunakan bensin yang dicampur dengan Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) yang difungsikan sebagai pembawa hidrogen dan oksigen. Eksperimen dilakukan dengan kondisi full-factorial design, dimana persentase campuran ABE dan kecepatan yang digunakan sebagai parameter input dan efisiensi termal (BTE), emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC) dan nitrogen oksida (NOx) sebagai bahan analisis. Hasil



prediksi dengan model regresi akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. *Particle Swarm Optimization* (PSO) digunakan untuk menentukan masing-masing BTE, CO, HC, dan NO_x. Analisis eksperimen menunjukkan bahwa ketika mesin dijalankan pada kecepatan 1500 rpm, dengan campuran bahan bakar yang mengandung etanol 5,4%, diperoleh nilai minimum 0,58% CO, 211 ppm HC, menghasilkan BTE maksimum 28%. Begitu pula saat mesin dijalankan pada 2264 rpm dengan campuran etanol 5%, diperoleh emisi NO_x minimal 1029 ppm dan BTE maksimal 30% (Dinesha et al. 2022).

Penggunaan ABE secara langsung dapat mengatasi masalah tingginya harga bio-butanol. Penelitian ini mengeksplorasi kinerja mesin SI dengan injeksi port ABE (ABE-PI) ditambah injeksi langsung bensin (GDI) pada rasio udara yang berbeda ($\lambda = 0.9, 1.0, 1.1, 1.2$) dan rasio injeksi port ABE (ABE-PIr = 0, 25 %, 50%, 75%, 100%). Hasilnya menunjukkan bahwa CA₁₀₋₉₀ menurun dengan meningkatnya ABE-PIr. CA₀₋₁₀ dan CA₀₋₉₀ menurun dengan ABEPir meningkat pada $\lambda = 0.9$, dan pertama turun lalu naik pada $\lambda = 1.0, 1.1$ dan 1.2 . Koefisien variasi IMEP (CoV-IMEP) mencapai nilai minimum pada ABE-PIr = 75%. Ketika ABEPir meningkat, tekanan dalam silinder puncak (P_{max}), menunjukkan tekanan efektif rata-rata (IMEP) dan efisiensi termal rem (BTE) meningkat pada $\lambda = 0,9$ sementara peningkatan pertama dan kemudian menurun pada $\lambda = 1,0, 1,1$ dan $1,2$, mencapai nilai maksimum pada ABE-PIr = 75%. Hidrokarbon (HC) mencapai nilai minimum pada ABEPr = 50%. Jumlah partikel menurun drastis saat ABE-PIr meningkat dari 0% menjadi 50% dan tetap pada tingkat yang sangat rendah saat ABE-PIr lebih besar dari 50%. Singkatnya, ABE cocok untuk mesin SI sebagai bahan bakar alternatif dan bahan bakar dengan rasio ABE tinggi ($\geq 50\%$) dapat secara efektif meningkatkan pembakaran dan emisi partikel dengan injeksi kombinasi ABE-PI + GDI (Guo et al. 2020).

Masalah utama dalam penggunaan butanol pada mesin Spark-Ignition (SI) adalah biaya produksinya yang relatif tinggi. Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) merupakan produk hasil proses fermentasi bio-butanol, ABE tidak hanya sebagai bahan bakar alternatif pengganti energi fosil, selain itu sebagai bahan bakar yang mempunyai tingkat oksigen tinggi. Dengan pengembangan teknologi fermentasi ABE yang optimal, persentase volume aseton, butanol, dan etanol dalam bio-pelarut dapat dikontrol dengan tepat. Dalam proposal ini, penggunaan bahan bakar ABE dengan rasio volumetrik yang bervariasi yaitu (A:B:E dari 5:2:1, 8:4:1 dan 10:6:1) dengan sistem suplai bahan bakar Port Fuel Injection pada mesin matic-SI kapasitas 109.5cc . pengujian mesin dengan kecepatan tidak konstan yaitu 3000-9000 rpm. Uji performa mesin menggunakan dynotest-chassis tipe Super-Dyno 50L. Data hasil pengujian berupa indeks performa mesin yaitu daya, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, tekanan efektif rata-rata dan efisiensi termal. Emisi gas buang yang dihasilkan adalah HC, CO dan NO_x.

METODE.



1. Variasi Bahan Bakar Yang Digunakan.

Penelitian ini menginfestigasi penambahan ABE pada bensin standar, yang ditunjukkan pada Tabel 1. ABE merupakan bahan bakar yang optimal, memiliki kapasitas energi yang lebih kompetitif dan tingkat penyalaan yang tinggi. Karakteristik ABE yang memiliki densitas laminar dan laju penyalaan yang lebih optimal dibandingkan bahan bakar lainnya sehingga ABE memiliki prospek sebagai energi alternatif. Pada penelitian ini, tiga variasi campuran bahan bakar yang diuji yaitu ABE1 (5%v/v Aseton, 2%v/v Butanol dan 1%v/v Etanol), ABE2 (8%v/v Aseton, 4%v/v Butanol dan 1%v/v Etanol), ABE3 (10%v/v Aseton, 6%v/v Butanol dan 1%v/v Etanol). Semua variasi bahan bakar akan dihitung berdasarkan rasio campuran. Kandungan ABE dapat meningkatkan kapasitas oksigen, panas laten, dan laju pengapian di ruang bakar. Kepadatan dan suhu pengapian otomatis meningkat dengan sedikit peningkatan kandungan butanol. *Low calorific value* (LCV), *Research Octane Number* (RON), dan rasio stoikiometri udara/bahan bakar menurun dengan meningkatnya kandungan butanol. Sifat campuran butanol-bensin akan mempengaruhi performa mesin.

2. Eksperimen Pengujian Mesin-Matic.

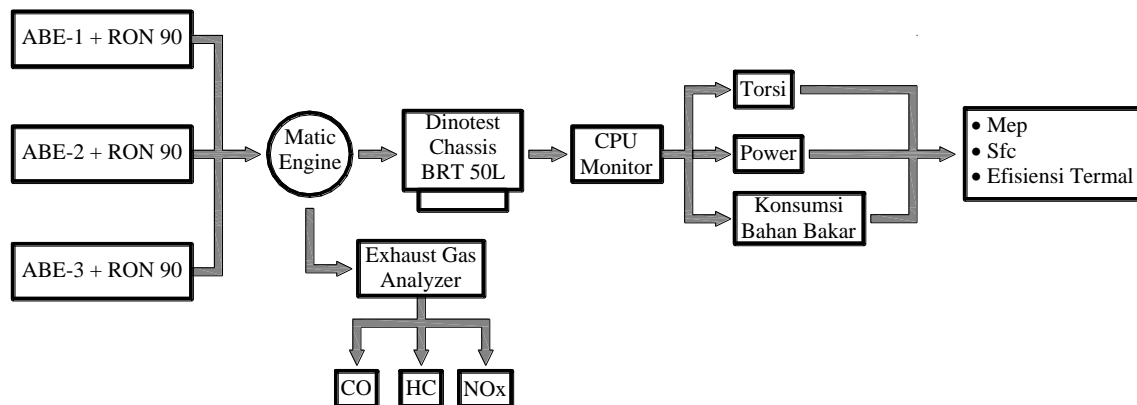
Penelitian ini menggunakan motor matik dengan rasio kompresi 9,5:1 dengan dimensi silinder panjang langkah 63,1 mm dan bore 47 mm. Tenaga maksimal yang dihasilkan sebesar 8,2 kW pada 8.500 rpm dan torsi sebesar 9,3 N·m pada putaran mesin 5.500 rpm. Kopling yang digunakan adalah tipe kering sentrifugal otomatis. Laboratorium Teknik Mesin Surabaya adalah tempat menguji performa kendaraan matic yang merupakan rekomendasi bagus. Uji performa dan emisi gas buang kendaraan menggunakan Dynotest Chassis BRT-50L dan EPSG4 Gas Analyzer. Alat uji yang digunakan adalah *single roller chassis dynamometer* dengan tipe *Super-Dyno* 50L. Pengambilan data performance dengan *dyno-test* menggunakan putaran mesin 4000-9000 rpm. Alur pendataan performa meliputi penentuan tinggi udara dan bahan bakar ke saluran masuk ruang bakar menggunakan injektor, dan proses pembakaran akan terjadi setelah adanya penyalaan bunga api dari busi sehingga berdampak pada putaran poros engkol akibat proses pembakaran. Pengujian diamati pada sasis-dinamometer dan ditampilkan sebagai grafik daya atau torsi pada CPU-*Super-Dyno* 50L.

Tabel 1.
Spesifikasi Bahan Bakar Aseton-Butanol-Etanol

Spesifikasi	Ethanol	Butanol	Acetone
Chemical formula	C ₂ H ₅ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₃ H ₆ O
Oxygen content (wt%)	34.8	21.6	27.6
C/H atom ratio	0.33	0.4	0.5
Density (kg/m ³) at 20 °C	795	81.3	791
Lower heating value (MJ/kg)	26.8	33.1	29.6
Energy density (MJ/l)	21.3	26.9	23.4
Octane number	100	96	117
Cetane number	5-8	25	-
Latent heat at 298 K (kJ/kg)	904	582	518
Auto-ignition temperature (K)	434	343	465
Flash point (°C)	13	35	-20
Flammability limits (vol.%) at 25 °C	3.5-11	1.4-11.2	2.6-12.8
Stoichiometric AFR	9	11.2	9.5
Saturation pressure (kPa) at 38 °C	13.8	2.3	52.5
Solubility in water (g/l) at 25 °C	Miscible	73	Miscible
Laminar flame speed (cm/s)	-39 ^f	-48 ^g	-34 ^h

Sumber (Dinesha et al. 2022; Guo et al. 2020, 2020; Y. Li et al. 2019; Veza et al. 2019)

Gambar 1:
Skema Uji Performa Mesin Matic

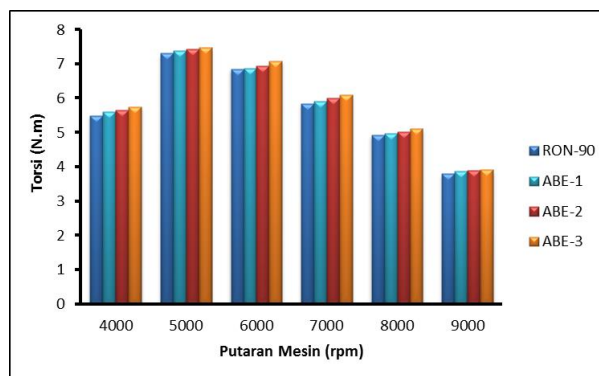


HASIL DAN PEMBAHASAN

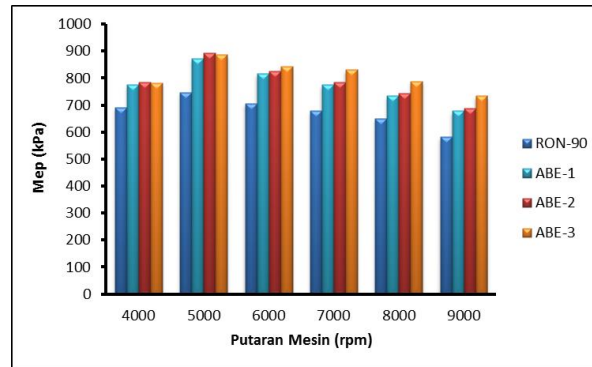
Tingkat kondisi mesin dalam menentukan kerja disebut siklus MPD disebut Torsi. Implementasi torsi pada kehidupan sehari-hari dideskripsikan pada kondisi mengoptimalkan hambatan dijalan atau menaikkan laju mesin (Guo et al. 2022). Deskripsi torsi terhadap putaran mesin matic, terlihat adanya tren kenaikan yang signifikan mulai dari putaran mesin rendah hingga putaran medium. Konsis sebaliknya terjadi pada putaran medium sampai dengan putaran tinggi, torsi mengalami penurunan. Hal tersebut dikarenakan adanya loses yang terjadi pada ruang bakar yang mengalami peningkatan (Tang et al. 2020). Grafik 1 menunjukkan fenomena penambahan ABE-1, ABE-2 dan ABE-3 terhadap bahan bakar RON 90. Pada putaran rendah sampai dengan medium (4000-6000rpm) torsi mengalami peningkatan 7.4 N.m pada penggunaan ABE-3, hal tersebut dipengaruhi oleh campuran bahan bakar yang kaya akan kandungan oksigen (Dinesha et al. 2022; Guo et al. 2020, 2020). Peningkatan torsi dari putaran rendah hingga medium sebesar 19%. Hal berbeda pada kondisi putaran medium hingga tinggi yang mengalami penurunan torsi 3,9 N.m, hal tersebut dipengaruhi oleh loses yang terjadi selama proses pembakaran (Yu et al. 2020). Penurunan torsi pada putaran medium hingga tinggi sebesar 25%.

Grafik 2 menunjukkan tren tekanan efektif (Mep) terhadap putaran mesin. Mep berbanding lurus dengan torsi yang terjadi bahwa peningkat Mep pada putaran rendah hingga medium sebesar 845 kPa dengan menggunakan bahan bakar ABE-3, hal tersebut dipengaruhi oleh partikel bahan bakar yang kaya akan oksigen terhadap proses pembakaran (Veza et al. 2021). Hal sebaliknya pada putaran medium hingga tinggi, untuk penggunaan bahan bakar ABE mengalami penurunan sebesar 14%. Pengaruh temperature yang semakin meningkat dengan signifikan mengakibatkan loses pada ruang bakar semakin meningkat. Hal tersebut perlu adanya system pendinginan pada ruang bakar yang optimal (Duan et al. 2021; Guillin-Estrada et al. 2021).

Grafik 1 :
Fenomena Uji Performa Putaran Mesin Terhadap Torsi



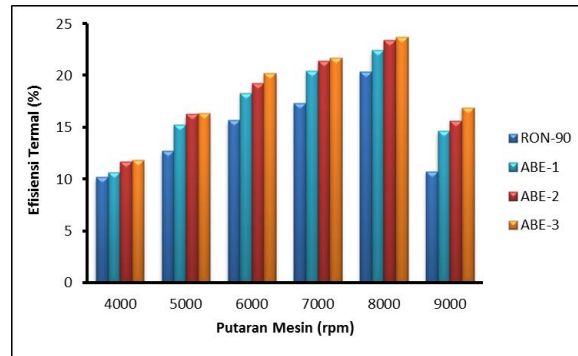
Grafik 2 :
Fenomena Uji Performa Putaran Mesin Terhadap Tekanan Efektif (Mep)



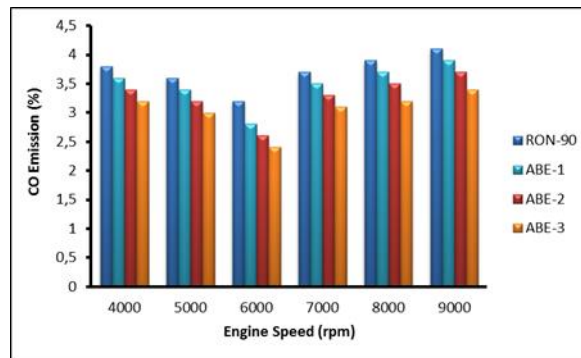
Efisiensi termal mesin terjadi optimal pada ruang bakar apabila percampuran bahan bakar dan udara pada rasio yang sesuai. Pada grafik 3 menunjukkan tren yang hampir sama dengan torsi dan Mep, karena proses terjadinya efisiensi termal itu sendiri tergantung pada torsi, daya dan tekanan yang terjadi pada proses pembakaran pada mesin. Fenomena peningkatan efisiensi termal putaran rendah hingga medium terjadi pada putaran mesin 8000rpm sebesar 24%. Efek peningkatan tersebut disebabkan oleh peningkatan temperatur dan tingkat turbulensi campuran bahan bakar ABE-3 di ruang bakar yang optimal. Sebaliknya terjadi pada putaran tinggi bahwa efisiensi termal mengalami penurunan 18% yang disebabkan banyak losses di ruang bakar.

Selama proses kompresi dan pembakaran, peningkatan tekanan di ruang bakar akan memaksa sejumlah gas masuk ke celah kecil di ruang bakar (misalnya celah antara piston dan liner). Gas-gas tersebut akan keluar pada saat pemuaihan dan langkah buang serta menjadi sumber hidrokarbon pada knalpot kendaraan. Sumber lainnya adalah lapisan minyak pelumas yang menempel pada dinding liner, piston, dan kepala silinder (Cylinder Head). Lapisan minyak ini dapat menyerap (*absorb*) dan kemudian melepaskan (*desorb*) komponen hidrokarbon dalam campuran (sebelum dan sesudah pembakaran) sehingga sebagian bahan bakar dapat keluar selama pembakaran. Sumber HC sebagaimana tersebut di atas juga akan keluar melalui gas buang ke udara bebas sehingga meningkatkan kadar CO yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor. Penjelasan di atas menunjukkan bahwa sumber CO lebih kompleks dan tidak hanya disebabkan oleh kekurangan oksigen untuk pembakaran. Grafik 4 menunjukkan bahwa pada bahan bakar butanol-bensin, pada putaran mesin rendah-tinggi (4000 – 9000 rpm), kadar emisi gas buang kedua CO yang dihasilkan oleh RON 90 lebih tinggi dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh ABE-3. Penggunaan RON 90 mengalami peningkatan yang signifikan pada putaran 6000 rpm dengan nilai 4,3%, dan ABE-3 mengalami penurunan yang signifikan sebesar 2,3% pada putaran 6000 rpm.

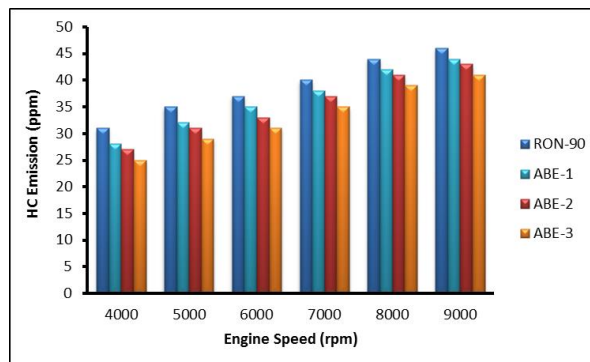
Grafik 3 :
Fenomena Uji Performa Putaran Mesin Terhadap Efisiensi Termal



Grafik 4 :
Fenomena Uji Performa Putaran Mesin Terhadap Emisi CO



Grafik 5 :
Fenomena Uji Performa Putaran Mesin Terhadap Emisi HC



Dari Grafik 5 dengan bahan bakar ABE-bensin terlihat bahwa pada putaran mesin rendah-sedang (4000 – 6000 rpm), kadar gas buang HC yang dihasilkan oleh RON 90 lebih tinggi dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh ABE-3. Bahan bakar RON 90 mengalami peningkatan emisi HC sebesar 48ppm pada putaran mesin 9000rpm. Sedangkan bahan bakar B18 mengalami penurunan sebesar 35ppm pada putaran mesin 9000rpm. Adapun analisa tenaga dan torsi, putaran mesin rendah-sedang ini disebabkan



pembakaran yang tidak sempurna di ruang bakar sehingga fraksi campuran bahan bakar dan udara yang terbakar menjadi tenaga yang kecil, dan kerugian yang besar. Salah satu bentuk kehilangan tersebut adalah gas buang yang terbentuk dari hasil pembakaran. Pada putaran mesin sedang-tinggi (6000-9000 rpm), kadar gas buang HC yang dihasilkan oleh B0 lebih rendah dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh ABE-3. Hal ini dikarenakan pembakaran yang sempurna di dalam ruang bakar sehingga fraksi campuran bahan bakar dan udara yang terbakar menjadi tenaga yang besar, dan kerugian yang kecil. Salah satu bentuk kehilangan tersebut adalah gas buang yang terbentuk dari hasil pembakaran.

KESIMPULAN

Inovasi bahan bakar ABE-bensin harus terus ditingkatkan, terutama dalam penggunaan kendaraan berkapasitas kecil-menengah untuk kegiatan sehari-hari. Penelitian ini menunjukkan peran penting energi alternatif dalam bentuk campuran bahan bakar ABE-bensin. Dari analisis penelitian yang telah diulas di atas, disimpulkan bahwa ABE-gasoline dengan kapasitas varian ABE-1, ABE-2 dan ABE-3 telah meningkatkan performa mesin torsi, Mep dan efisiensi termal berturut-turut sebesar 18%, 7% dan 29%. Emisi gas buang menurunkan kadar CO, HC berturut-turut sebesar 42% (6000rpm) dan 28% (8000rpm).

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 066/LPPM-UWP/K-I/VII/2023 dan Surat Tugas Litabmas Internal Nomor 073.32/ST/LPPM-UWP/K-I/VI/2023. Harapannya penelitian ini dapat bermanfaat bagi masyarakat dan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Benajes, J., R. Novella, J. Gomez-Soriano, P. J. Martinez-Hernandiz, C. Libert, and M. Dabiri. 2019. "Evaluation of the Passive Pre-Chamber Ignition Concept for Future High Compression Ratio Turbocharged Spark-Ignition Engines." *Applied Energy* 248:576–88. doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.04.131.
- Dinesha, P., Sooraj Mohan, and Shiva Kumar. 2022. "Experimental Investigation of SI Engine Characteristics Using Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) – Gasoline Blends and Optimization Using Particle Swarm Optimization." *International Journal of Hydrogen Energy* 47(8):5692–5708. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.119.
- Duan, Xiongbo, Zhengxin Xu, Xingyu Sun, Banglin Deng, and Jingping Liu. 2021. "Effects of Injection Timing and EGR on Combustion and Emissions Characteristics of the Diesel Engine Fuelled with Acetone–Butanol–Ethanol/Diesel Blend Fuels." *Energy* 231:121069. doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.121069.
- Guillin-Estrada, Wilson, Daniel Maestre-Cambronel, Antonio Bula-Silvera, Arturo Gonzalez-Quiroga, and Jorge Duarte-Forero. 2021. "Combustion and Performance Evaluation of a Spark Ignition Engine Operating with Acetone–Butanol–Ethanol and Hydroxy." *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 5282 11(11):5282. doi: 10.3390/APP11115282.
- Guo, Zezhou, Xiumin Yu, Wei Dong, Ping Sun, Weibo Shi, Yaodong Du, Zhen Shang, Zhe Zhao, Decheng Li, and Tianqi Wang. 2020. "Research on the Combustion and Emissions of an SI Engine with Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Port Injection plus Gasoline Direct Injection." *Fuel* 267:117311. doi: 10.1016/J.FUEL.2020.117311.
- Guo, Zezhou, Xiumin Yu, Yaodong Du, and Tianqi Wang. 2022. "Comparative Study on Combustion and Emissions of SI Engine with Gasoline Port Injection plus Acetone-Butanol-Ethanol (ABE), Isopropanol-Butanol-Ethanol (IBE) or Butanol Direct Injection." *Fuel* 316:123363. doi: 10.1016/J.FUEL.2022.123363.
- Li, Yuqiang, Wei Tang, Yong Chen, Jiangwei Liu, and Chia fon F. Lee. 2019. "Potential of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) as a Biofuel." *Fuel* 242:673–86. doi: 10.1016/J.FUEL.2019.01.063.
- Li, Zhenhe, Amir Khajepour, and Jinchun Song. 2019. "A Comprehensive Review of the Key Technologies for Pure Electric Vehicles." *Energy* 182:824–39. doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.06.077.
- Liu, Jinlong, and Cosmin E. Dumitrescu. 2019. "Combustion Partitioning inside a Natural Gas Spark Ignition Engine with a Bowl-in-Piston Geometry." *Energy Conversion and Management* 183:73–83. doi:



10.1016/J.ENCONMAN.2018.12.118.

Tang, Qijun, Xiongbo Duan, Yiqun Liu, Shuai Li, Zhichao Zhao, Kai Ren, Yangyang Li, and Hongbo Chang. 2020. "Experimental Study the Effects of Acetone–Butanol–Ethanol (ABE), Spark Timing and Lambda on the Performance and Emissions Characteristics of a High-Speed SI Engine." *Fuel* 279:118499. doi: 10.1016/J.FUEL.2020.118499.

Veza, Ibham, Muhammad Faizullizam Roslan, Mohd Farid Muhamad Said, Zulkarnain Abdul Latiff, and Mohd Azman Abas. 2021. "Physico-Chemical Properties of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE)-Diesel Blends: Blending Strategies and Mathematical Correlations." *Fuel* 286:119467. doi: 10.1016/J.FUEL.2020.119467.

Veza, Ibham, Mohd Farid Muhammad Said, and Zulkarnain Abdul Latiff. 2019. "Progress of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) as Biofuel in Gasoline and Diesel Engine: A Review." *Fuel Processing Technology* 196:106179. doi: 10.1016/J.FUPROC.2019.106179.

Yu, Xiumin, Decheng Li, Song Yang, Ping Sun, Zezhou Guo, Hang Yang, Yinan Li, and Tianqi Wang. 2020. "Effects of Hydrogen Direct Injection on Combustion and Emission Characteristics of a Hydrogen/Acetone-Butanol-Ethanol Dual-Fuel Spark Ignition Engine under Lean-Burn Conditions." *International Journal of Hydrogen Energy* 45(58):34193–203. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2020.09.080.