

Brake specific fuel consumption, brake thermal efficiency, dan emisi gas buang mesin bensin EFI dengan sistem EGR berbahan bakar premium dan butanol

Firman Lukman Sanjaya^{1*}, Syaiful², Syarifudin³

^{1,3}Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Harapan Bersama
Jl. Mataram no.9, Kota Tegal, Jawa Tengah, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto SH, Tembalang, Semarang, Indonesia

*Corresponding author: sanjaya.firman51@gmail.com

Abstract

The increase in vehicle volume causes an increase in the use of gasoline fuel and air pollution. Therefore, alternative fuels such as butanol are one of the solutions to overcome this problem. Butanol has a high octane value and oxygen content so that the combustion process is more perfect and reduces exhaust emissions. The use of butanol is expected to improve engine performance and reduce exhaust emissions. The purpose of this study was to observe the effect of butanol on gasoline engines with the EGR system on Brake Specific Fuel Consumption (BSFC), Brake Thermal Efficiency (BTE), and exhaust emissions. Testing uses a Toyota Kijang 7K gasoline engine with an EFI fuel system. The percentage of butanol used is 5%, 10%, 15% in the condition without EGR, hot EGR, and cold EGR. The test is carried out at a fixed engine rotation speed of 2500 rpm. Retrieval of engine performance data using a dynamometer while the exhaust emissions using the GA analyzer. The test results showed the addition of butanol increased the BSFC value by 0.9% and BTE by 2%. However, a decrease occurred in CO emissions by 74.2% and HC by 33.6% compared to pure premium. The use of hot EGR decreased BSFC by 19.3% and BTE by 23.9%. The highest CO emissions were 3.23% while the highest HC emissions of 259 ppm occurred in the use of cold EGR.

Keywords : butanol, EGR, BSFC, BTE, exhaust gas emissions

Abstrak

Peningkatan volume kendaraan menyebabkan peningkatan penggunaan bahan bakar bensin dan polusi udara. Oleh karena itu, bahan bakar alternatif seperti butanol adalah salah satu solusi untuk mengatasi masalah tersebut. Butanol memiliki nilai oktan dan kandungan oksigen yang tinggi sehingga proses pembakaran lebih sempurna dan mereduksi emisi gas buang. Penggunaan butanol diharapkan dapat meningkatkan performa mesin dan menurunkan emisi gas buang. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengobservasi pengaruh butanol pada mesin bensin dengan sistem EGR terhadap *Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)*, *Brake Thermal Efficiency (BTE)* dan emisi gas buang. Pengujian menggunakan mesin bensin toyota kijang 7K dengan sistem bahan bakar EFI. Prosentase butanol yang digunakan 5%, 10%, 15% pada kondisi tanpa EGR, EGR panas dan EGR dingin. Pengujian dilakukan pada kecepatan putaran mesin tetap 2500 rpm. Pengambilan data performa mesin menggunakan *dynamometer* sedangkan emisi gas buang menggunakan *gaz analyzer*. Hasil pengujian menunjukkan penambahan butanol meningkatkan nilai BSFC sebesar 0,9% dan BTE sebesar 2%. Namun, penurunan terjadi pada emisi CO sebesar 74,2% dan HC sebesar 33,6% dibanding premium murni. Penggunaan EGR panas menurunkan BSFC sebesar 19,3% dan BTE sebesar 23,9%. Emisi CO tertinggi sebesar 3,23% sedangkan emisi HC tertinggi sebesar 259 ppm terjadi pada penggunaan EGR dingin.

Kata kunci: Butanol, EGR, BSFC, BTE, emisi gas buang

Pendahuluan

Peningkatan volume kendaraan mengakibatkan penggunaan bahan bakar bensin meningkat. Hal ini menyebabkan kelangkaan bahan bakar fosil. Selain itu, emisi gas buang yang dihasilkan kendaraan menyebabkan tingginya polusi udara. Oleh karena itu, perlu adanya bahan bakar alternatif yang mampu menggantikan bahan bakar bensin yang dapat diperbaharui dan ramah lingkungan [1].

Butanol merupakan bahan bakar alternatif yang memiliki karakteristik lebih baik dan dapat menggantikan bahan bakar bensin. Butanol memiliki nilai oktan yang tinggi sehingga mampu menahan tekanan tinggi saat langkah kompresi. Hal ini mengakibatkan performa mesin meningkat [2]. Panas laten penguapan yang tinggi pada butanol menyebabkan bahan bakar menguap lebih baik sehingga proses pembakaran lebih baik dan meningkatkan efisiensi termal mesin [3].

Butanol juga dapat mereduksi emisi CO dan HC karena tingginya kandungan oksigen pada butanol yang menyebabkan proses pembakaran dalam ruang bakar lebih sempurna. Namun, butanol meningkatkan emisi *Nitrogen Oxide* (NO_x) [4][5]. Campuran nitrogen dan oksigen yang terpapar oleh suhu tinggi menghasilkan emisi NO_x . EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) merupakan sistem pada mesin yang dapat mereduksi emisi NO_x . Cara kerja EGR yaitu mensirkulasi kembali sebagian dari gas buang dari *exhaust manifold* kembali ke ruang bakar (*combustion chamber*) [6]. Selain itu, EGR juga mampu meningkatkan penghematan konsumsi bahan bakar. Hal ini karena bahan bakar yang tidak terbakar disirkulasikan kembali ke ruang bakar sehingga injektor mengurangi jumlah bahan bakar yang disemprotkan [7]. Penggunaan EGR juga menyebabkan peningkatan kualitas pembakaran dan *thermal efficiency* [8].

Menurut Yuanxu Li (2018) [4] butanol memiliki nilai kalor rendah sehingga temperatur pada ruang bakar menurun. Hal ini mengakibatkan kebutuhan bahan bakar meningkat. Yunqian Li (2016)

[3] menjelaskan pada penelitiannya bahwa panas laten penguapan yang tinggi pada butanol menyebabkan proses penguapan bahan bakar lebih baik sehingga pembakaran dalam silinder meningkat. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi termal mesin. Sependapat dengan penelitian sebelumnya, Syarifudin (2019) [9] memaparkan bahwa butanol mampu meningkatkan efisiensi termal mesin karena tingginya kadar oksigen pada butanol yang dapat meningkatkan proses pembakaran. Menurut Zheng, dkk. (2017) [10] juga menjelaskan tingginya kandungan oksigen pada butanol mampu mereduksi emisi CO dan HC. Namun, penggunaan butanol meningkatkan emisi NO_x .

Deepak Agarwal (2011) [11] menjelaskan bahwa sistem EGR mensirkulasikan kembali sebagian gas buang ke ruang bakar. Oksigen dari udara segar yang masuk tergantikan oleh gas buang hasil sirkulasi sehingga konsentrasi oksigen pada ruang bakar menurun dan meningkatkan panas spesifik campuran udara. Hal ini menghasilkan suhu api yang lebih rendah sehingga sistem EGR dapat mereduksi NO_x . Fangxi Xie (2017) [7] pada penelitiannya menjelaskan bahwa sistem EGR membawa beberapa bahan bakar yang tidak terbakar kembali ke ruang bakar dan membantu proses pembakaran. Hal ini menyebabkan bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar menurun. Dari hasil penelitian Haiqiao Wei, dkk., (2012) [8] dapat dijelaskan bahwa penggunaan EGR meningkatkan *Break Thermal Efficiency* karena adanya gas buang yang menggantikan udara segar yang masuk ke dalam silinder sehingga prosentase oksigen mengalami peningkatan.

Penambahan butanol pada bahan bakar bensin dapat memberikan dampak positif pada mesin. Sistem EGR juga dapat memperbaiki performa mesin. Oleh karena itu, penelitian ini mengobservasi *brake spesific fuel consumption*, *brake thermal efficiency*, dan emisi gas buang mesin bensin EFI berbahan bakar premium dan butanol dengan sistem EGR.

Tinjauan Teoritis

1. Brake Specific Fuel Consumption

Brake specific fuel consumption adalah mengindikasikan banyaknya bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan satu satuan daya [12].

$$BSFC = \frac{mf}{P} \quad (1)$$

BSFC adalah konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kW.jam), *mf* adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/jam), dan *P* adalah daya mesin (kW).

2. Brake Thermal Efficiency

Brake Thermal Efficiency (BTE) adalah mengindikasikan seberapa besar energi dari bahan bakar dikonversi menjadi tenaga. Besarnya *brake thermal efficiency* (BTE) dapat diformalkan sebagai berikut [12]:

$$BTE = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad (2)$$

Dimana *BTE* adalah efisiensi termal (%), Q_{HV} merupakan nilai kalor dari bahan bakar (MJ/kg) dan \dot{m}_f adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/jam).

Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *Brake Specific Fuel Consumption* (*BSFC*), *Brake Thermal Efficiency* (*BTE*) dan emisi gas buang mesin bensin pada kondisi tanpa EGR, EGR panas dan EGR dingin. Bahan bakar yang digunakan adalah premium (P) dan butanol (B) dengan prosentase campuran butanol 5% (PB5), 10% (PB10) dan 15% (PB15) dari total volume campuran bahan bakar. Sifat-sifat fisik bahan bakar ditampilkan pada Tabel 1. Penelitian ini menggunakan mesin bensin EFI dengan spesifikasi mesin seperti pada Tabel 2. Percobaan dilakukan dengan kecepatan putaran mesin tetap 2500 rpm. Mesin bensin dan perlengkapannya disusun sesuai dengan Gambar 1. Aliran bahan bakar diukur untuk menentukan konsumsi bahan bakar mesin. *Output* mesin terhubung ke dinamometer tipe DYNomite Land & Sea untuk mengukur performa pada mesin. Emisi gas buang diukur

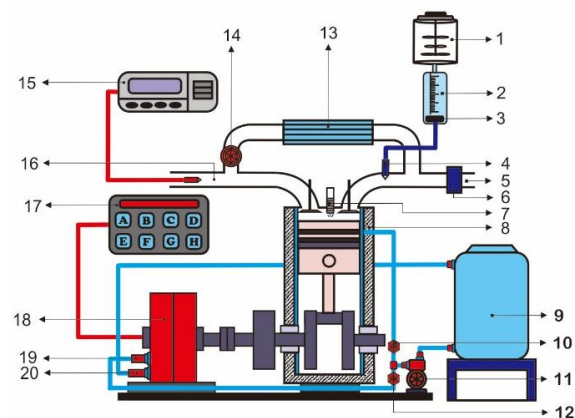
menggunakan alat analisa gas (*Gaz Analyzer*) Stargass 898. Pengukuran emisi gas buang digunakan untuk menentukan tingkat HC dan CO.

Tabel 1. Propertis bahan bakar

No	Propertis	Satuan	Premi um	But anol
1	Angka Oktan	RON	88	98,3
2	Kadar Air	%V	0,003	>5
3	Viskositas (pada suhu 40°C)	mm ² /s	0,22	2,63
4	Nilai Kalor	MJ/kg	42,7	33,3
5	Kandungan Oksigen	%	-	21,6
6	Massa Jenis	Kg/m ³	744	815

Tabel 2. Spesifikasi mesin bensin

Merk	Kijang 7K
Produksi	Toyota
Tipe Mesin	Bensin
Jumlah Silinder	4
Kapasitas	1789 cc
Jumlah Katup	(SOHC) 8 Katup
Daya Maksimum	94 Hp – 5000 rpm
Torsi Maksimum	155 N.m – 3200 rpm
Sistem Bahan Bakar	EFI



Gambar 1. Eksperimental Set Up
Keterangan Gambar 1:

1. Mixer
2. Burret
3. Pompa bahan bakar
4. Injektor
5. *Intake manifold*
6. *Air flow sensor*
7. Busi
8. Mesin bensin
9. Tangki air
10. Katup air pendingin
11. Pompa air
12. Katup air pembebanan
13. EGR *cooler*
14. Katup EGR
15. *Gaz analyzer*
16. *Exhaust manifold*
17. Panel display utama
18. Dynamometer
19. Saluran air masuk
20. Saluran air keluar

Bahan bakar bensin dan butanol dicampurkan menggunakan *mixer* sehingga bahan bakar tercampur secara homogen. Bahan bakar yang sudah tercampur dialirkan ke injektor dengan bantuan pompa bahan bakar melalui buret. Buret berfungsi sebagai alat ukur bahan bakar yang terpakai selama proses pengujian dalam satuan waktu. Setelah itu bahan bakar disemprotkan ke ruang bakar oleh injektor bahan bakar. Kecepatan mesin terbaca pada monitor oleh tachometer dengan mendeteksi putaran mesin menggunakan sensor jarak. Dynamometer digunakan untuk mengukur torsi yang dihasilkan mesin. Poros Dynamometer terpasang secara *inline* dengan poros out mesin sehingga tenaga yang dihasilkan mesin langsung tersalurkan pada dynamometer. Beban mesin tetap 25% dari kemampuan beban yang dapat dicapai oleh mesin dengan mengubah laju aliran air yang mengalir ke dynamometer. Besarnya torsi yang dibaca oleh dynamometer ditampilkan pada display beban.

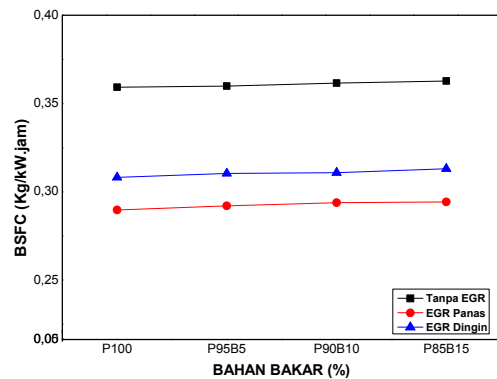
Percobaan dilakukan dengan variasi prosentase campuran bahan bakar dengan kecepatan putaran mesin tetap yaitu 2500 rpm. Beberapa gas buang disirkulasikan (EGR) kembali ke *intake manifold* dan

tercampur oleh udara segar yang masuk dalam silinder. *Gas analyser* digunakan untuk mengukur emisi gas buang hasil dari pembakaran mesin.

Hasil dan Pembahasan

1. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

Penelitian ini menggunakan variasi campuran bahan bakar premium-butanol dengan prosentase butanol 5%, 10%, dan 15%. Nilai BSFC dengan dan tanpa menggunakan sistem EGR dibandingkan dengan hasil nilai BSFC pada tiap variasi campuran bahan bakar. Hasil pengujian BSFC untuk variasi campuran bahan bakar dengan dan tanpa EGR ditunjukkan pada Gambar 2.



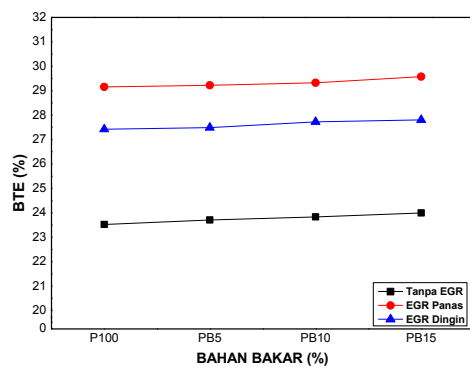
Gambar 2. *Brake specific fuel consumption* mesin bensin untuk variasi campuran bahan bakar dengan dan tanpa EGR pada putaran mesin 2500 rpm

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan butanol pada bahan bakar premium meningkatkan BSFC mesin bensin. Peningkatan nilai BSFC tertinggi sebesar 0,9 % pada campuran bahan bakar BP15 dibanding premium murni (P100). Peningkatan BSFC karena rendahnya nilai kalor (LHV) butanol dibanding premium sehingga terjadinya penurunan temperatur ruang bakar yang menyebabkan jumlah injeksi bahan bakar lebih banyak untuk mempertahankan panas ruang di keadaan idealnya. Oleh karena itu, konsumsi bahan bakar meningkat [13]. Penggunaan EGR menurunkan nilai BSFC mesin bensin. Hal ini karena bahan bakar yang tidak terbakar tersirkulasikan kembali ke ruang bakar dan

membantu proses pembakaran selanjutnya sehingga bahan bakar yang perlu diinjeksikan berkurang [7][14]. Penggunaan EGR panas dapat menurunkan BSFC tertinggi hingga 19,33% dibanding tanpa EGR.

2. Brake Thermal Efficiency (BTE)

Penelitian ini menggunakan sistem EGR dan tanpa EGR dengan variasi campuran butanol 5%, 10% dan 15% pada bahan bakar premium. Hasil pengujian BTE dari campuran bahan bakar akan dibandingkan bahan bakar premium murni untuk menentukan BTE tertinggi dengan dan tanpa sistem EGR. Hasil pengujian BTE ditunjukkan pada Gambar 3.



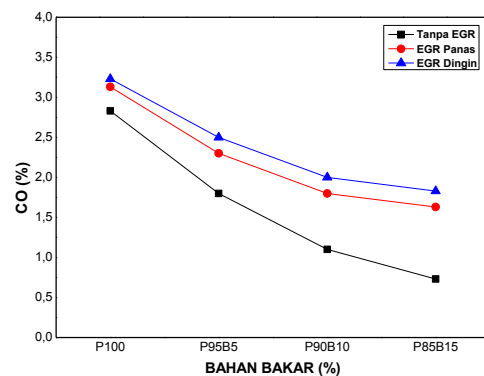
Gambar 3. Brake Thermal Efficiency mesin bensin menggunakan EGR dan tanpa EGR dengan variasi campuran bahan bakar pada kecepatan putaran mesin 2500 rpm.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa BTE mengalami peningkatan dengan bertambahnya proses tase butanol pada bahan bakar premium. Peningkatan BTE tertinggi pada campuran bahan bakar BP15 sebesar 2 % dibanding premium murni (P100). Penambahan butanol pada bahan bakar premium meningkatkan kandungan oksigen. Selain itu, penambahan butanol juga meningkatkan panas laten penguapan campuran bahan bakar sehingga bahan bakar menguap lebih baik di ruang bakar. Hal ini menyebabkan proses pembakaran lebih sempurna sehingga efisiensi termal meningkat [3][4]. Dari hasil studi dapat ditunjukkan bahwa penggunaan EGR meningkatkan BTE. Oksigen yang terbawa oleh gas buang tersirkulasikan kembali pada intake manifold sehingga bercampur dengan udara segar yang masuk ke dalam silinder.

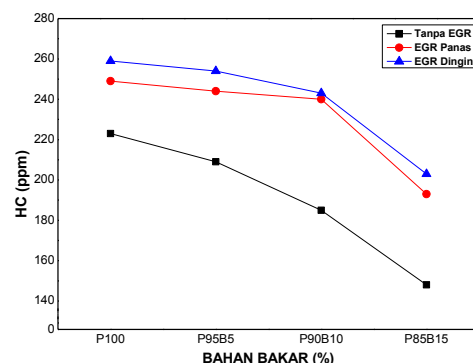
Proses ini menyebabkan kandungan oksigen dalam ruang bakar meningkat yang mengakibatkan pembakaran lebih sempurna dan meningkatkan efisiensi termal mesin [8]. Penggunaan EGR panas meningkatkan BTE tertinggi hingga 23,93% dibanding tanpa EGR.

3. Emisi Gas Buang Carbon Monoxide (CO) dan Hidrocarbon (HC)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan butanol 5%, 10% dan 15% pada bahan bakar premium dengan menggunakan sistem EGR pada mesin bensin. Hasil pengujian emisi gas buang dari variasi campuran bahan bakar dibandingkan dengan bahan bakar premium murni untuk menentukan emisi gas buang terbaik. Hasil pengujian emisi gas buang CO dan HC dipaparkan pada Gambar 4. dan Gambar 5.



Gambar 4. Emisi gas buang CO mesin bensin menggunakan EGR dan tanpa EGR dengan variasi campuran bahan bakar pada kecepatan putaran mesin 2500 rpm.



Gambar 5. Emisi gas buang HC mesin bensin menggunakan EGR dan tanpa EGR dengan variasi campuran bahan bakar pada kecepatan putaran mesin 2500 rpm.

Gambar 4. dan Gambar 5. menunjukkan penurunan emisi CO dan HC seiring dengan penambahan prosentase butanol pada bahan bakar premium. Penambahan butanol meningkatkan kadar oksigen pada campuran bahan bakar sehingga *effect leaning* meningkat. *Effect leaning* merupakan peningkatan kadar oksigen pada bahan bakar sehingga proses pembakaran lebih sempurna. Proses ini dapat mereduksi emisi CO dan HC [5][15]. Selain itu, butanol juga meningkatkan kecepatan nyala api sehingga pembakaran dalam silinder meningkat yang mengakibatkan penurunan kadar emisi CO dan HC [2]. Namun, penggunaan EGR meningkatkan emisi CO dan HC. Gas buang yang disirkulasikan kembali oleh EGR menggantikan sebagian udara segar dalam ruang bakar sehingga campuran bahan bakar menjadi heterogen. Campuran bahan bakar yang heterogen memperburuk proses pembakaran sehingga bahan bakar tidak terbakar [16]. Selain itu, penggunaan EGR menurunkan pelepasan panas pada bahan bakar sehingga proses oksidasi memburuk. Proses oksidasi yang buruk menyebabkan proses pembakaran tidak sempurna dan meningkatkan emisi CO dan HC [17][18].

Pada Gambar 4, menunjukkan pengaruh campuran bahan bakar terhadap emisi CO cenderung turun. Penurunan emisi CO tertinggi terjadi pada campuran bahan bakar PB15 sebesar 74,2% dibanding premium murni. Namun, penggunaan EGR meningkatkan emisi CO. Emisi CO tertinggi 3,23% terjadi pada penggunaan EGR dingin. Sama halnya emisi CO, pada Gambar 5. menunjukkan penurunan emisi HC seiring dengan meningkatnya prosentase butanol pada bahan bakar premium. Penurunan emisi HC tertinggi pada campuran bahan bakar BP15 sebesar 33,6% dibanding premium murni. Penggunaan EGR dingin meningkatkan emisi HC tertinggi 259 ppm pada penggunaan premium murni.

Kesimpulan

Brake Spesific Fuel Consumption (BSFC) tertinggi 0,362 kg/kW.Jam pada

campuran bahan bakar PB15. Penurunan BSFC tertinggi 19,33% pada penggunaan EGR panas dibanding tanpa EGR.

Brake thermal efficiency (BTE) mengalami peningkatan tertinggi 2% pada campuran bahan bakar PB15 dibanding premium murni. Penggunaan EGR panas meningkatkan BTE tertinggi 23,93% dibanding tanpa EGR.

Campuran bahan bakar PB15 mereduksi emisi CO dan HC tertinggi masing-masing 72,2% dan 33,6% dibanding premium murni. Namun, penggunaan EGR meningkatkan emisi CO dan HC. Emisi CO dan HC tertinggi masing-masing 3,23% dan 259 ppm dengan penggunaan EGR dingin.

Referensi

- [1] Syarifudin and Syaiful, 2019, "Pengaruh Penggunaan Energi Terbarukan Butanol Terhadap Penurunan Emisi Jelaga Mesin Diesel Injeksi Langsung Berbahan Bakar Biodiesel Campuran Solar Dan Jatropa," *Infotekmesin*, vol. 10, no. 1, pp. 18–22.
- [2] Yusoff M. N. A. M., *et al.*, 2017, "Performance and emission characteristics of a spark ignition engine fuelled with butanol isomer-gasoline blends," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 57, no. September, pp. 23–38.
- [3] Li, Y., *et al.*, 2016, "Effect of water-containing acetone-butanol-ethanol gasoline blends on combustion, performance, and emissions characteristics of a spark-ignition engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 117. pp. 21–30.
- [4] Li, Y., Ning, Z. C. fon F. Lee, Yan, J. and Lee, T. H., 2019, "Effect of acetone-butanol-ethanol (ABE)-gasoline blends on regulated and unregulated emissions in spark-ignition engine," *Energy*, vol. 168, pp. 1157–1167.
- [5] Zaharin, M. S. M., Abdullah, N. R., Masjuki, H. H., Ali, O. M., Najafi, G., and Yusaf, T., 2018, "Evaluation on

- physicochemical properties of iso-butanol additives in ethanol-gasoline blend on performance and emission characteristics of a spark-ignition engine,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 144, pp. 960–971.
- [6] Ladommatos, N., Balian, R., Horrocks, R., and Cooper, L., 1996, “The effect of exhaust gas recirculation on combustion and NOx emissions in a high-speed direct-injection diesel engine,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 15, no. 10, pp. 1442–1450.
- [7] Xie, F., Hong, W., Su, Y., Zhang, M., and Jiang, B., 2017, “Effect of external hot EGR dilution on combustion, performance and particulate emissions of a GDI engine,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 142, pp. 69–81.
- [8] Wei, H., et al., 2012, “Gasoline engine exhaust gas recirculation - A review,” *Appl. Energy*, vol. 99, no. X, pp. 534–544.
- [9] Syarifudin, 2019, “Daya Dan Emisi Jelaga Dari Mesin Diesel Berbahan Bakar Solar-Jatropa-Butanol,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 3, p. 142.
- [10] Chen, Z., Zhang, Y., Wei, X., Zhang, Q., Wu, Z., and Liu, J., 2017, “Thermodynamic process and performance of high n-butanol/gasoline blends fired in a GDI production engine running wide-open throttle (WOT),” *Energy Conversion and Management*, vol. 152, pp. 57–64.
- [11] Agarwal, D., Singh, S. K., and Agarwal, A. K., 2011, “Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 8, pp. 2900–2907.
- [12] C. N. Grimaldi and F. Mollo, *Internal Combustion Engine (ICE) Fundamentals*, vol. 21, 2015.
- [13] Feng, H., Zhang, H., Wei, B., Li, and Wang, D., 2019, “The influence of mixing ratio of low carbon mixed alcohols on knock combustion of spark ignition engines,” *Fuel*, vol. 240, no. 66, pp. 339–348.
- [14] Zhang, Z., Zhang, H., Wang, T., and Jia, M., 2014, “Effects of tumble combined with EGR (exhaust gas recirculation) on the combustion and emissions in a spark ignition engine at part loads,” *Energy*, vol. 65, no. x, pp. 18–24.
- [15] Sharudin, H., Abdullah, N. R., Najafi, G., Mamat, R., and Masjuki, H. H., 2017, “Investigation of the effects of iso-butanol additives on spark ignition engine fuelled with methanol-gasoline blends,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 593–600.
- [16] Huang, H., Li, Z., Teng, W., Huang, R., Liu, Q., and Wang, Y., 2019, “Effects of EGR rates on combustion and emission characteristics in a diesel engine with n-butanol/PODE3-4/diesel blends,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 146, pp. 212–222.
- [17] Hergueta, C., Bogarra, M., Tsolakis, A., Essa, K., and Herreros, J. M., 2017, “Butanol-gasoline blend and exhaust gas recirculation, impact on GDI engine emissions,” *Fuel*, vol. 208, pp. 662–672.
- [18] Ayodhya, A. S., Lamani, V. T., Bedar, P., and Kumar, G. N., 2018, “Effect of exhaust gas recirculation on a CRDI engine fueled with waste plastic oil blend,” *Fuel*, vol. 227, no. X, pp. 394–400.