

ANALISIS EFEKTIVITAS SISTEM *DUAL INJECTION* BIOETANOL-*GASOLINE* TERHADAP EMISI GAS BUANG MOTOR BAKAR EMPAT LANGKAH

Yudiono¹, Dimas Rama Aprilian Sasangka², Sofyan Soleh³, Ahmad Nur Fitratulloh⁴, M Syiham Lazuardi Samson⁵, Riswan Sepriyatno⁶

¹Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22101052060@unisma.ac.id

²Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22210152015@unisma.ac.id

³Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22201052021@unisma.ac.id

⁴Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22401052014@unisma.ac.id

⁵Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22301053029@unisma.ac.id

⁶Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : riswan.sepriyatno@unisma.ac.id

Abstract

Exhaust emissions from fossil-fuel combustion contribute significantly to air pollution and global warming. Bioethanol is considered a cleaner alternative fuel; however, direct blending with gasoline often leads to phase separation due to polarity differences. This study evaluates the effect of a dual injection bioethanol–gasoline system on exhaust emissions of a four-stroke engine. Experimental testing was conducted using fuel variations of 0%, 25%, and 50% bioethanol. Emission parameters measured included CO, HC, CO₂, and O₂ using a gas analyzer, and results were compared with the Indonesian emission standard SNI 19-7118.3-2005. The findings indicate that the dual injection system effectively reduces CO and HC emissions by 67,12% and 64,42%, respectively, compared to pure gasoline, and all blended fuels met national emission limits. Overall, the dual injection configuration improves combustion efficiency, overcomes phase separation issues, and demonstrates strong potential for cleaner engine operation.

Keywords: *Bioethanol-Gasoline, Dual Injection, Exhaust Emissions, Emission Regulation, Renewable Fuel.*

Abstrak

Emisi gas buang dari pembakaran bahan bakar Konvensional berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara dan pemanasan global. Bioetanol merupakan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan, namun pencampuran langsung dengan *gasoline* sering menyebabkan ketidakstabilan akibat perbedaan polaritas. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh sistem *dual injection* bioetanol-*gasoline* terhadap emisi gas buang motor bakar empat langkah. Pengujian dilakukan secara eksperimen dengan variasi campuran bioetanol 0%, 25%, dan 50%. Parameter yang diuji meliputi CO, HC, CO₂, dan O₂ menggunakan gas *analyzer*, kemudian hasilnya dibandingkan dengan standar SNI 19-7118.3-2005. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *dual injection* mampu menurunkan emisi CO dan HC masing-masing sebesar 67,12% dan 64,42% dibandingkan bensin murni, dan seluruh campuran telah memenuhi batas standar emisi nasional. Secara keseluruhan, konfigurasi *dual injection* meningkatkan efisiensi pembakaran, mengatasi pemisahan fase, dan berpotensi menghasilkan operasi mesin yang lebih bersih.

Kata kunci: *Bioetanol-Gasoline, Dual Injection, Emisi Gas Buang, Regulasi Emisi, Bahan Bakar Terbarukan.*

Pendahuluan

Peningkatan emisi gas buang dari pembakaran bahan bakar konvensional merupakan salah satu penyebab utama pencemaran udara dan pemanasan global. Data dari *United Nations*

Statistics Division pada tahun 2024 menunjukkan bahwa total emisi gas rumah kaca global pada tahun 2022 mencapai rekor tertinggi sebesar 57,4 gigaton setara CO₂, di mana sekitar dua pertiga di antaranya berasal dari pembakaran bahan bakar konvensional [1]. Kondisi tersebut menegaskan urgensi untuk

melakukan transisi menuju energi bersih yang lebih berkelanjutan. Pemerintah Indonesia telah berupaya menekan ketergantungan terhadap bahan bakar konvensional melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 32 Tahun 2008, yang mewajibkan pencampuran bioetanol sebesar 5% pada tahun 2020 dan ditingkatkan menjadi 20% pada tahun 2025[2]

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bioetanol sebagai bahan campuran *gasoline* mampu menurunkan emisi gas buang secara signifikan. Pencampuran bioetanol dengan *gasoline* dapat menurunkan emisi CO hingga 13,1% dan HC sebesar 8,8% [3]. Namun, metode pencampuran konvensional yang dilakukan secara langsung di dalam tangki (*pencampuran hulu*) masih menghadapi tantangan berupa ketidakstabilan campuran dan pemisahan fase akibat perbedaan polaritas. Secara kimia, bioetanol bersifat polar karena mengandung gugus hidroksil (OH), sedangkan *gasoline* bersifat non polar [4]. Perbedaan sifat ini menyebabkan keduanya sulit bercampur sempurna, terutama pada suhu rendah. Ketidakstabilan campuran tersebut menjadi kendala teknis utama yang menghambat implementasi bahan bakar bioetanol dalam skala luas pada kendaraan bermotor[5]r.

Sejumlah inovasi telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, seperti penambahan zat aditif, penggunaan *emulsifier*, maupun penerapan sistem injeksi campuran di hulu [6]. Meskipun demikian, hasil yang diperoleh belum sepenuhnya efektif dan justru menimbulkan kompleksitas sistem, baik dari sisi desain maupun pengendalian suplai bahan bakar. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang mampu menjaga stabilitas campuran sekaligus meningkatkan efisiensi proses pembakaran. Salah satu inovasi yang memiliki potensi besar adalah penerapan sistem *dual injection*, yaitu sistem injeksi terpisah antara bioetanol dan *gasoline* yang memungkinkan proses pencampuran terjadi langsung pada saluran masuk udara (*intake manifold*) sebelum pembakaran. Teknologi ini mengadopsi konsep *port fuel injection* (PFI) yang dapat mengatur rasio campuran bahan bakar secara dinamis, meningkatkan homogenitas campuran udara–bahan bakar, serta memperbaiki karakteristik pembakaran [7].

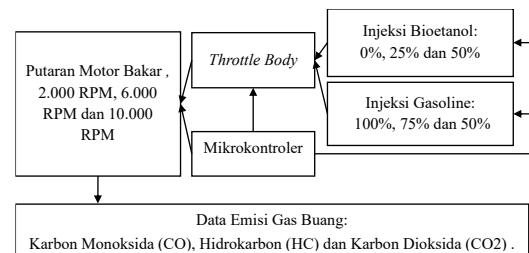
Penelitian ini difokuskan untuk mengkaji pengaruh penerapan sistem *dual injection* bioetanol-*gasoline* terhadap mesin dan emisi gas buang motor bakar empat langkah. Variasi campuran bioetanol yang digunakan mencakup beberapa tingkat persentase untuk mengetahui kecenderungan perubahan emisi terhadap kadar bioetanol yang berbeda. Parameter yang dianalisis meliputi kadar emisi CO, HC, CO₂, dan O₂ yang dihasilkan selama pengujian. Selain itu, hasil pengujian dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 19-

7118.3-2005 guna mengevaluasi kesesuaian emisi gas buang terhadap batas mutu yang ditetapkan secara nasional. Melalui pendekatan ini diharapkan dapat diperoleh bukti empiris bahwa sistem *dual injection* tidak hanya mampu mengatasi permasalahan pemisahan fase, tetapi juga berkontribusi nyata dalam menurunkan emisi gas buang kendaraan bermotor.

Bahan dan Metode

Pada penelitian ini, bahan utama yang digunakan adalah bioetanol dan *gasoline*. Bioetanol yang digunakan merupakan etanol hasil fermentasi molase dengan kadar kemurnian 96% sebagai bahan bakar alternatif, sedangkan *gasoline* yang digunakan memiliki nilai RON 90. Kedua bahan bakar disimpan pada tangki terpisah untuk mencegah ketidakstabilan campuran yang dapat terjadi akibat perbedaan sifat fisik dan kimianya. Pencampuran bioetanol-*gasoline* dilakukan secara langsung di *port intake* melalui sistem injeksi terpisah, sehingga potensi ketidakstabilan fase dapat diminimalkan.

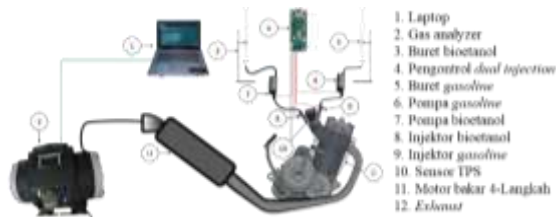
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen nyata untuk menguji efektivitas sistem *dual injection* bioetanol-*gasoline*. Pengujian dilakukan pada mesin bensin empat langkah satu silinder yang telah dimodifikasi dengan dua injektor terpisah. Variasi campuran bioetanol terdiri atas 0%, 25%, dan 50% pada putaran mesin *idle*, 2.000 rpm, 6.000 rpm, dan 10.000 rpm. Parameter yang diamati meliputi, serta emisi CO, HC, CO₂, dan O₂ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Analisis data dilakukan secara deskriptif melalui penyajian grafik dan tabel, serta secara komparatif mengacu pada standar emisi SNI 19-7118.3-2005 untuk mengevaluasi potensi penurunan emisi gas buang.



Gambar 1. Diagram blok skema penelitian.

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 2. Pada sistem ini, bioetanol dan *gasoline* disimpan pada tangki (3 dan 5). Ketika mesin (11) dinyalakan, kontroler membaca putaran mesin dan bukaan katup, kemudian mengatur kerja *fuel pump* (6 dan 7) untuk memompa masing-masing bahan bakar secara terpisah. Injektor (8 dan 9) selanjutnya menginjeksikan bahan bakar menuju *port intake*, tempat pencampuran bioetanol-*gasoline* terjadi sebelum masuk ke ruang bakar. Emisi hasil pembakaran dialirkan melalui *exhaust* (12) dan dianalisis menggunakan *gas analyzer* untuk mengukur parameter emisi. Data dari *gas analyzer*

kemudian dikirim ke laptop untuk direkam dan disimpan sebagai data penelitian.



Gambar 2. Skema pengujian emisi gas buang.

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian emisi gas buang pada tabel 1 dan tabel 2 menunjukkan bahwa penggunaan bioetanol secara signifikan menurunkan kadar CO dan HC dibandingkan dengan bensin murni. Campuran bioetanol 25% dan 50% telah memenuhi standar emisi SNI 19-7118.3-2005, sedangkan bensin murni melebihi ambang batas kadar CO dan HC. Penurunan emisi ini disebabkan oleh kandungan oksigen dalam bioetanol serta homogenitas campuran bioetanol-gasoline yang meningkatkan kesempurnaan proses pembakaran.

Tabel 1. Uji kelayakan emisi gas buang CO.

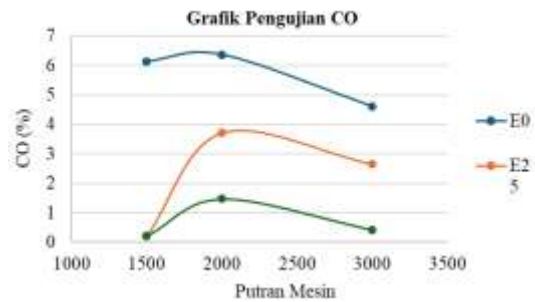
CAMPURAN	CO	KETERANGAN	KETENTUAN	SATUAN
E 0%	6,14	Tidak memenuhi		
E25%	0,21	Memenuhi	4	%
E 50%	0,2	Memenuhi		

Tabel 2. Uji kelayakan emisi gas buang HC

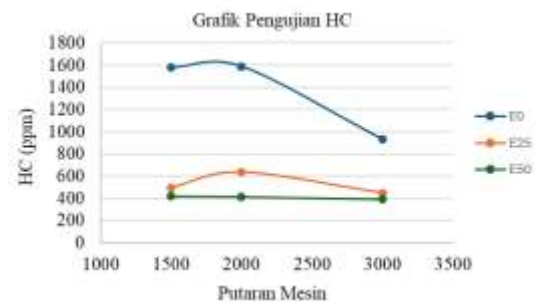
CAMPURAN	HC	KETERANGAN	KETENTUAN	SATUAN
E 0%	1582	Memenuhi		
E25%	498	Memenuhi	1800	PPM
E 50%	418	Memenuhi		

Hasil pengujian emisi gas buang menunjukkan bahwa penggunaan sistem *dual injection* memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan polutan hasil pembakaran. Pada Gambar 3 terlihat grafik emisi karbon monoksida (CO), sedangkan Gambar 4 menampilkan grafik emisi hidrokarbon (HC) kedua polutan ini merupakan hasil pembakaran tidak sempurna yang berdampak buruk terhadap kesehatan dan lingkungan. Pencampuran bioetanol yang diinjeksi secara terpisah terbukti mampu menurunkan emisi CO sebesar 67,12% dan HC sebesar 64,42%. Penurunan ini terjadi karena bioetanol memiliki kandungan oksigen internal yang membantu memperbaiki kualitas pembakaran, sehingga mengurangi pembentukan CO dan HC yang umumnya muncul akibat kekurangan oksigen dalam ruang bakar. Selain itu, pemisahan injeksi antara bioetanol dan gasoline membuat kedua bahan bakar dapat bercampur secara lebih merata dengan udara di port *intake*, sehingga proses pembakaran berlangsung lebih stabil dan optimal. Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, sistem *dual injection* bioetanol-gasoline terbukti mampu menciptakan pencampuran yang lebih homogen antara bahan

bakar dan udara, sehingga berdampak langsung pada penurunan emisi gas buang.

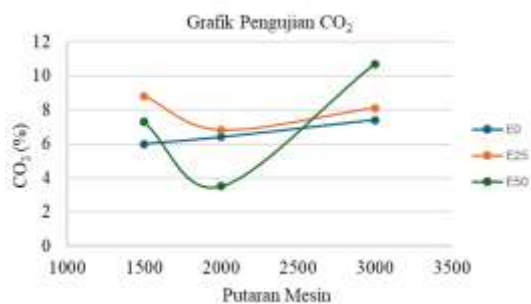


Gambar 3. Grafik hasil pengujian emisi gas buang CO.



Gambar 4. Grafik hasil pengujian emisi gas buang HC.

Berdasarkan Gambar 5, hasil pengujian emisi gas buang CO₂ pada variasi campuran bahan bakar E0%, E25%, dan E50% menunjukkan pola perubahan yang berbeda pada setiap rentang putaran mesin. Pada kondisi *idle*, campuran E25% menghasilkan emisi CO₂ tertinggi diikuti oleh E50%, sedangkan E0% memiliki nilai terendah, yang menunjukkan bahwa bioetanol dapat mengoptimalkan pembakaran melalui kandungan oksigen tambahan yang membantu proses oksidasi karbon pada putaran mesin rendah. Memasuki putaran menengah, kadar CO₂ pada seluruh variasi campuran mengalami penurunan, yang mengindikasikan terbentuknya campuran udara-bahan bakar yang lebih ramping (*lean mixture*) sehingga pembakaran tidak berlangsung seefektif kondisi *idle*. Pada putaran tinggi, kadar CO₂ kembali meningkat pada semua variasi bahan bakar akibat suplai udara yang lebih optimal dan turbulensi campuran yang lebih baik di ruang bakar. Secara keseluruhan, tren perubahan emisi CO₂ menunjukkan bahwa penambahan bioetanol dapat memengaruhi proses pembakaran dan berpotensi meningkatkan efisiensi pembakaran pada kondisi *idle* dan putaran tinggi dibandingkan bahan bakar tanpa campuran (E0%).



Gambar 5. Grafik hasil pengujian emisi gas buang CO₂.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian emisi gas buang menggunakan sistem *dual injection* pada variasi campuran bioetanol E0, E25, dan E50, dapat disimpulkan bahwa penambahan bioetanol memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan emisi polutan hasil pembakaran. Campuran bioetanol E25 dan E50 berhasil menurunkan emisi CO hingga 67,12% dan HC sebesar 64,42% dibandingkan bensin murni, di mana nilai emisi untuk kedua campuran tersebut telah memenuhi standar ambang batas emisi berdasarkan SNI 19-7118.3-2005, sementara bensin murni masih melebihi batas yang ditetapkan. Penurunan emisi ini dipengaruhi oleh kandungan oksigen internal dalam bioetanol yang meningkatkan kesempurnaan pembakaran serta dukungan sistem *dual injection* yang memungkinkan pencampuran bahan bakar dan udara lebih homogen di ruang bakar. Pada emisi CO₂, pola perubahan menunjukkan bahwa campuran bioetanol menghasilkan nilai CO₂ lebih tinggi pada kondisi *idle* dan putaran tinggi dibandingkan E0, yang menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung lebih sempurna pada kondisi tersebut. Secara keseluruhan, penggunaan bioetanol dengan sistem injeksi terpisah terbukti mampu meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi CO dan HC secara signifikan, sehingga berpotensi menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk aplikasi mesin berbahan bakar campuran bioetanol-*gasoline*.

Daftar Lambang

Lambang	Keterangan
CO	Emisi gas buang karbon monoksida
HC	Emisi gas buang hidro karbon
CO ₂	Emisi gas buang karbon dioksida
E0	Pencampuran bahan bakar bioetanol 0% dengan 100% <i>gasoline</i> RON 90.
E25	Pencampuran bahan bakar bioetanol 25% dengan 75% <i>gasoline</i> RON 90.

E50	Pencampuran bahan bakar bioetanol 50% dengan 50% <i>gasoline</i> RON 90.
-----	--

Referensi

- [1] United Nations Statistics Division, "Climate Action," United Nations. Accessed: May 22, 2025. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/Goal-13/>
- [2] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, "Permen ESDM Nomor 12 Tahun 2015," Mar. 2015, Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/143504/permen-esdm-no-12-tahun-2015>
- [3] S. M. Rosdi, Erdiwansyah, M. F. Ghazali, and R. Mamat, "Evaluation of engine performance and emissions using blends of gasoline, ethanol, and fusel oil," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 11, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.csee.2024.101065.
- [4] M. O. El-Faroug, F. Yan, M. Luo, and R. F. Turkson, "Spark ignition engine combustion, performance and emission products from hydrous ethanol and its blends with gasoline," *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 12, p. 984, Dec. 2016, doi: 10.3390/en9120984.
- [5] M. Amine, E. N. Awad, V. Ibrahim, and Y. Barakat, "Effect of ethyl acetate addition on phase stability, octane number and volatility criteria of ethanol-gasoline blends," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 567–572, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ejpe.2017.08.007.
- [6] R. Kunwer, S. Ranjit Pasupuleti, S. Sureshchandra Bhurat, S. Kumar Gugulothu, and N. Rathore, "Blending of ethanol with gasoline and diesel fuel – A review," *Mater Today Proc*, vol. 69, pp. 560–563, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.319.
- [7] C. Gong, W. Huang, and F. Liu, "Combined influence of injection pressure of gasoline direct-injected and ratio of ethanol port-injected on the performances in a spark-ignited ethanol port-injected plus gasoline direct-injected engine," *Energy*, vol. 320, p. 135201, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.135201.